

## ПРЕВЕНЦИЯ, ИЗБОР НА МОДЕЛ, МЕТОДИ И ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ВЪТРЕШНАТА КОРОЗИЯ В ПОДЗЕМНИ ТРЪБОПРОВОДИ

*Теодора Христова*

*Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, teodora@mgu.bg*

**РЕЗЮМЕ.** В доклада са определени основните фактори, които влияят на развитието на вътрешна корозия. Обобщени са тенденциите в развитието на техническите средства за измерването ѝ. От изброените тенденции е направен изводът, че основната работа на учените е насочена към разработване на устройства за диагностициране по целия диаметър на тръбопровода, определяне на размера на пукнатините и развитие на мобилните роботизирани системи. Предложени са критерии за сравнение на методите и въз основа на тях като подходящи за средата, характерна за вътрешността на тръбите, са препоръчани за прилагане ултразвуков и вихровотоков принцип.

### PREVENTION, MODEL SELECTION, METHODS AND TECHNICAL MEANS FOR MEASURING INTERNAL CORROSION OF UNDERGROUND PIPELINES

*Teodora Hristova*

*University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, teodora@mgu.bg*

**ABSTRACT.** The report identifies the main factors that influence the development of internal corrosion. It summarizes the trends in development of equipment for measuring of this corrosion. On the base of the trends it was made the conclusion that the main work of scientists is directed to the development of devices for diagnosing around the whole diameter of pipeline, determination of the size of the cracks and the development of mobile robotic systems. There were proposed criteria for comparing of different methods and on this base are recommended ultrasonic and eddy current principle as appropriate to the specific environment in the inside of the tubes.

### Въведение

Механичните повреди са преобладаваща причина за отчетените инциденти в подземните тръбопроводи, като някои от тях с тежки последици за обществото (Белингам, WA, 1999 година). Независимо, че определянето им няма да доведе до предотвратяване на 70 до 80 процента от тези дефекти, то откриването на 10 процента от вътрешните корозионни петна е достатъчен успех за фирмите, експлоатиращи подземните комуникации. За разлика от водопреносните структури стоманените тръбопроводи, транспортиращи нефт и газ, са значително по-податливи на авария, инициирана от корозия поради високото си работно налягане и неблагоприятни условия на заобикалящата среда [Shamsuddoha, 2013].

От тези данни може да се направи изводът, че компаниите трябва да инвестират средства за измерване и защита от корозия на вътрешната повърхност на петролни и газопроводите. Много важно е разработването на технологии за намаляване на вътрешната корозия, чийто относителен дял не е особено висок, но в абсолютно изражение непрекъснато нараства, защото на този етап вътрешната корозия все още се подценява [Neil G. Thompson, 2003].

### Аспекти при моделирането на корозионни поражения

Превенцията от вътрешна корозия обикновено включва активна и пасивна защита. Основни защитни средства са правилният избор на легирана стомана и фабрично поставяне на защитни покрития като лак, полимерни материали. За производство се използват стомани AISI 303, 304 L, 303 S и други, които са по стандарти ASTM A554, и ASTM A312. Вътрешните изолации са на основата на епоксидна смола, полиуретан, полиетилен или синтезиран материал от фенол и смола (Liquid Phenolic) [Христова, 2013]. Последният вид се препоръчва за нефтопроводите, защото издържа на CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>. Активната защита на вътрешната повърхност е посредством електрохимична защита на външната, най-често катодна защита.

За поддържане на тръбопроводите се предвиждат ремонтни дейности, като са разработени устройства, които поставят изолации, без да е необходимо да се разкопават увредените участъци. За постигане и контролиране на тези мерки най-важното условие е редовна инспекция.

Мониторинг в разглежданата инфраструктура е трудна задача поради големия брой непредвидими променливи, като бързо променящи се експлоатационни условия, промени в налягането на флуида, ерозия в резултат на остатъчни продукти от корозия, наличие на агресивна среда. С цел предвиждане вида на корозионните поражения е необходим модел на динамиката на химичните процеси на вътрешната корозия, който трябва да обхване следните аспекти:

(1) Електрохимичната активност в подземните тръбопроводи и резервоари зависи от свойствата на пренасяния флуид, който в повечето случаи е слабо основен. Установено е, че според корозионното си действие най-агресивен е нефтът, след това газът, а най-малко водата. Причината е съдържанието на смес от нефт, серни съединения, Fe, Ni, Cu, V, Na и висока концентрация на соли.

(2) Химичните процеси по повърхността на метала, като натрупване на оксиди, които влияят върху електрохимичната активност и ускоряват или намаляват корозията. Възможно е подобни примеси да водят до ерозия или локални разрушения. Характерно за металните тръби е образуването на трислойни железни корозионни продукти: макропорест слой от черна ръжда (магнетит,  $Fe_3O_4$ ) в контакт с метал, микропорест филм - смес от  $Fe_2+$  и  $Fe_3+$ , който покрива макрослоя, и най-горен слой на червената ръжда (главно гетит и хематит). Тези три слоя имат различно съпротивление помежду си и спрямо основния материал на тръбата. Въздействието на параметрите на средата като температура, pH на флуида, способност за обмен на катиони, повърхностни процеси също влияят на химичната активност. Например, смесването на нефт-вода с високо съдържание на соли води до развитието на локална корозия. Допълнително въздействие имат и различията на потенциала на вътрешната повърхност на подземната структура, които се индуцират от дефекти, възникнали при производството на стоманата, при свързване на тръбите, наличието въздух.

(3) Вида на движение на флуида, предизвикващ механична корозия. Освен химията на протичане на процесите, трябва да се вземе предвид движението на флуида през тръбата. В зависимост от числото на Рейнолдс потокът на флуида може да е ламинарен, преходен или турбулентен. Режимът на движение се дефинира като *ламинарен*, ако критерият на Reynolds е по-малък 2100, *турбулентен*, ако Reynolds е по-голям от 4000 и когато критерият на Reynolds е между 2100 и 4000 говорим за *преходен* режим на движение. Числото на Reynolds расте с повишаване на диаметъра на тръбата структура, плътността и налягането на флуида.

При ламинарни потоци при повишаване на скоростта на протичане на флуида расте скоростта на корозия, но все пак тя е бавна и обща. Големи загуби могат да се очакват в долната част на обекта. Едновременно с това флуидът пренася кислород, който реагира с металната повърхност. При по-висока скорост на флуида потокът е турбулентен и се иницират процеси по целия диаметър. Постепенно се повишава грапавостта на стената и следователно расте скоростта на корозия, развиват се локална, обща корозия и едновременно с тях и ерозия. В началото тя е бавна, защото тръбите са гладки, но после

скоростта се повишава поради грапавата корозирала повърхност. На този етап започват засилени процеси на развитие на интеркристална корозия [Juan Liang, 2013].

На базата на теоретични изследвания и от практиката е известно, че в магистралните тръбопроводи, които се изработват от стомана, потокът е турбулентен със скорост на флуида над 16 m/s, като може да достигне и 25 m/s. Въз основа на направения анализ е видно, че разрушенията във вътрешната повърхност на подземните комуникации са разнообразни и има голям риск от поява на дълбоки пукнатини, което изисква различни методи за наблюдение.

## Тенденции в методите и техническите средства за измерване на вътрешна корозия

За измерването на корозионните поражения се прилагат и методите, характерни за външна корозия, които според принципа на функциониране са резистивен, капацитивен, магнитен, ултразвуков, вихровотоков, оптичен, инфрачервен, пиезоелектричен [Христова, 2008]. Датчиците, приложими при измерване на вътрешна корозия според функциите, които изпълняват, могат да се класифицират по следния начин:

1. Устройства за определяне на загубата на материал – работят предимно на принципа на електромагнитната индукция, промяна на големината на тока, капацитета или с ултразвукови вълни, като определят дебелината на стената на тръбата. Недостатък на метода е необходимостта от предварително калибриране при ненаранена повърхност на инфраструктурата. Невъзможно е използването на радиоактивен метод.

2. Устройства за установяване на пукнатини – ултразвукови, електромагнитни вълни, еластични вълни, вихрови токове. Неудобството при тези методи е нуждата от измерване под различни ъгли, за да се определи точно големината на дефекта.

3. Устройства, използващи геометрични средства - оценяват се промените на формата, здравината и т.н.; това могат да бъдат механични пръсти, които минават по повърхността - ултразвукови вълни, жироскопско изследване, капацитивен, резистивен метод, оптични камери.

4. Устройства за измерване на течове чрез инфрачервен, оптичен или топлинен метод. Те се влияят от параметрите на околната среда и не са точни. Обикновено системата е положена под тръбопровода и се задейства при авария. Погледнато от екологична и енергийна гледна точка аварийно състояние за подземните структури, пренасящи нефт и газ, е недопустимо и за това тези методи няма да се разглеждат.

За разлика от външната корозия при регистриране на вътрешната има определени специфики, които трябва да се вземат под внимание. Датчиците, измерващи външна корозия, предават сигнала от регистрираната величина в повечето случаи през проводник, докато в подземните линии се използват записващи устройства или безжична връзка. Поставянето на постоянни уреди е възможно само при полагане на тръбите или при основен ремонт. Затова за стари инсталации се използват роботизирани системи,

които инспектират по дължина линията на определено време. Едно от основните ограничения при измерване в магистрални тръбопроводи е захранването с енергия на датчиците, с което идентифицирането на дефектните участъци е нетривиална задача. Освен това голяма трудност се среща при диагностицирането на локална корозия и пукнатини, а те са едни от основните причини за аварии. Затова водещ критерий за избор на метод за наблюдение е точното регистриране на пукнатините, определяне тяхната дълбочина и локация. Въз основа на него са разгледани предимствата и недостатъците на методите за обследване. Установено е, че най-ниска себестойност имат уредите, конструирани на резистивен, магнитен или капацитивен принцип. Използват се за регистриране на обща корозия, но се влияят от агресивността на флуида (без магнитния), имат кратък срок на служба и проста конструкция. Ултразвуковият, магнитният и резистивният метод не са ефективни при откриване на крекинг корозията без прилагането на няколко измервания от различен ъгъл.

Ултразвуковите сензори са идеални и предпочитани пред други методи за неразрушаващо тестване на петроло- и газопроводи с цел откриване, оразмеряване на пукнатини и локализация. Измерването не зависи от материал, цвят и степен на прозрачност на покритието, а ултразвуковата вълна се разпространява и в извивките и разклоненията на инсталацията. Имат много добра устойчивост на промишлени среди (конструирани са като компаундни елементи, изцяло капсулирани в смола). Работят надеждно в промишлено замърсени среди с дим, прах, шум и агресивен флуид. Няма движещи се части в сензора, следователно тези устройства имат стабилна механика и дълъг експлоатационен живот, независимо от броя на операционните цикли. Има възможност за изграждане на мониторингова система по целия тръбопровод, която да предава в реално време. [Bickerstaff, 2002]. Недостатъци на системата са високата цена в сравнение с резистивните и капацитивните методи, за определяне прецизно на дефектите е необходимо измерване под различни ъгли, което е предпоставка за усложняване на системата. Чувствителни са към условия, като вятър, радио сигнали и доплерови ефекти [D.Isa, R.Rajkumar]. При повишаване броя на дефектите се намалява точността им.

Пиезодатчиците са подходящи за обследване на грапавост и локални дефекти по стените на подземната мрежа, определят вибрациите и структурните изменения в резултат на корозията. Нечувствителни са към електромагнитни лъчения, което ги прави подходящи за инспекция при тежки условия. Обикновено се съвместяват с мобилна система за измерване тип „гъсеница“. Недостатък е, че се влияят от агресивността на флуида и са чувствителни към други величини. Затова в практиката се е наложило пиезосензорите да работят чрез MEMS системи, или да се поставя и трети датчик с друг принцип на работа.

Чрез акустичните методи се диагностицират вътрешната грапавост на тръбата т.е. на нивото на корозия и локални дефекти. Подходящи са за сложни структури, където трудно могат да се приложат други устройства за наблюдение. Такива са градските тръбопроводни мрежи.

[Z. M. Hafizi, C.K. E. Nizwan] Недостатък е, че са чувствителни към радиосигнали и шумови сигнали, доплер ефекти, което ги прави неизползваеми в неконтролируема среда, каквито е подземната инфраструктура.

Магнитоиндуктивната технология с използване на разпространение на вихровите токове (eddy current) не се влияе от наличието на покритие или оксиден филм, каквито са изолираните метални стени. Не зависи също и от агресивността на флуида, извивките на тръбата. Може да определя точно дълбочината на пукнатините, дебелината на стените и мястото на поражение (външна или вътрешна страна), заради което се използва масово за подземна инспекция. За разлика от ултразвуковия мониторинг не се влияе от влажни повърхности. Магнитното поле и вихровите токове също се използват успешно за регистриране на стрес корозия и при магнитни материали.

Тъй като използването на датчици е скъпо, а в някои случаи трудноприложимо, за определяне на нивото на корозия се използват косвени методи. Те се основават на факта, че флуидът съдържа определена концентрация агресивни частици и се измерва количеството преминал флуид. Най-често се използва сензор за топлинен поток MEMS, който може да е вграден в жлеб в стената на тръбата. MEMS технологиите вече позволяват да се интегрират много сензори при единичен малък IC борд, като така отпада ограничението за следене само на една величина. Тази платформа осигурява лесна реализация, забележителен ефект и висока точност на откриване. Използването на подобно измерване не дава точни резултати за определяне на разрушенията от корозия, особено локална, но е вариант за избор на начините на обследване на вече поставени тръбопроводи [CN202403744, CN102620780].

С цел повишаване на точността и обхвата на действие на датчиците, учените разработват нови устройства. Тенденциите в иновативните технологии могат да се обобщят така:

- използване на радиални мембрани, които обхващат едновременно цялата вътрешна повърхност на структурата и позволяват регулиране на диаметъра на разположение на сензорите. Предимство на метода е възможността за радиално измерване в областта на завиване на тръбите и прилагане в роботизирана система. Недостатък е, че с времето се губи еластичността на мембраната, а точността зависи от скоростта на потока. При по-големи вдлъбнатини се раздалечават сензорите и точността на резултатите също намалява. Прилага се чрез резистивни, ултразвукови и капацитивни методи [AU2012203076, WO03083357, US4807484, CN2793713].

- радиално разположени електроди с цели обхващане на целия диаметър на обекта, откриване на локална корозия и повишаване на точността [CN102147384, Ru2139469, US3786684]. При тази система на свързване на сензорите също се намалява точността при наличие на големи вдлъбнатини, ето защо за постигане на многообхватност на работа при различни диаметри, чувствителните елементи са свързани с носещото тяло чрез пружини [US4457073].

- използване на многомодов диск, чийто диаметър може да се променя според диаметъра на тръбопровода, чрез прибавяне на нови модове [CN202502074]. Подходящи методи за прилагане са резистивни, ултразвукови, капацитивни. Недостатък в случая е невъзможността за преминаване на роботизираната система през наклонени участъци и завои.

- поставяне на монитор директно в обследвания обект, което позволява регистриране в реално време. За внедряването му има ограничение за диаметъра на тръбата, оскъпяване на технологията, необходимост от непрекъснато електро-захранване, неустойчивост на агресивни условия.

- използване на пиезоефект, който да дава енергия за придвижване на сензора, което позволява изследване на по-голяма дължина [CN201107299].

- придвижване от силата на компресирания въздух, като при висока скорост на флуида точността на измерването намалява [US4295092].

- използване на ултразвукови и вихровотокови методи, които дават възможност за оценка на корозионното състояние на изолирани с асфалт, парафин и други материали повърхности [US5892162].

- някои от методите позволяват едновременно мониторинг на корозия и картографиране на тръбопроводите [US2008041173, US2003010125].

- съвместяване на няколко датчика в едно устройство или използване на автоматична система с няколко функции – обследване, обработване на данните, дозиране на инхибитори или подаване на сигнал за ремонтни дейности в подземните структури, което понижава общите разходи за поддръжка [RU2304636, CN102644850, CN2574001, EP0605085, US7104147].

- почистване на главите на чувствителните елементи по време на работа за запазване на първоначалните характеристики [WO03083357].

- внедряване на сателитно предаване на информация [JP2003323688] или GPS технологии [US2006203411, GB2370583, US6992594].

- използване на материали със специфично действие за подобряване на точността. Например, при прилагане на магнитен метод анодът се изработва от нисколегирана или въглеродородна стомана. Катодът е от магнетик, който съответства по химическа природа с корозионната среда.

- използване на специфични метали за изработка на сензори при наличие на покритие във вътрешността на тръбопровода [RU2085906].

- изработване на системи за локално захранване, най-често чрез слънчеви панели [Gbenga Owojaiye, 2013].

- изработване на системи за самостоятелно излизане на датчика при изразходване на батерията [Ted Tsung-Te Lai].

## Критерии за избор на система за измерване на вътрешна корозия

От изброените тенденции може да се направи изводът, че основната работа на екипите е насочена към разработване на устройства за диагностициране по целия диаметър на обекта, определяне на размера на пукнатините и

развитие на мобилните роботизирани системи. Предимствата на роботизираните пред стационарни системи са следните: поставяне на няколко датчика, които измерват различни величини, възможност за периодична замяна или ремонт на елементи, получаване на резултати в реално време, използване на едно устройство за голяма дължина от тръбопровода и др. Предвид многообразието от системи за мониторинг е труден изборът на подходяща. За целта е необходимо да се изработят критерии, според които методите да могат да се сравняват в зависимост от целите на измерването. В основата на дефинирането им влизат показатели като вид на корозионните разрушения, форма и размери на инфраструктурата, ниво на придвижване и автоматизация на роботизираната система, вид на пренасяния флуид и начин на движението му. За правилен избор на система за диагностика трябва да се оценят следните критерии:

- точност на сензора
- обхват на уреда, което има особено значение при стационарни системи
- предназначение – обща, локална корозия или двете
- възможност да обследва в завоите и разклоненията на структурата
- съвместимост с движението на потока
- пасивна или активна система на предаване на данните до базата
- измерване наличието на твърди частици и примеси във флуида
- устойчивост в агресивна среда
- ниво на автоматизация на работа, придвижващ датчика
- възможност да диагностицира по диаметъра на тръбата
- нисък разход на енергия
- надеждност

Оценката на приложимостта на методите според цитираните критерии е трудна задача поради многообразието от сензори и техните характеристики. Известно е, че контактните методи (резистивните, индуктивен или капацитивен) са подходящи и точни за измерване в агресивни почвени условия [Петров, Велев, 2011], но при наличие на примеси във флуида точността им намалява. Безконтактните методи (ултразвуков, оптичен, инфрачервен, вихровотоков) също се влияят от примесите във флуида, но в по-малка степен, което ги прави подходящи за мониторинг на вътрешна корозия.

Затова при изграждане на тръбопровода с голям диаметър, където средата е агресивна и потокът – турбулентен, на първо място трябва да се избере подходящ метод за оценка. Както беше споменато, до най-голям риск от авария води образуването на пукнатини и стрес корозията. По този показател се препоръчват ултразвукови и вихрови методи за инспекция. Освен това те са устойчиви при работа в агресивни среди. Техни предимства са високата точност: до 0,2 mm за ултразвуковите и до 0,5 mm - за вихровотоковите. Стационарните и мобилните системи, конструирани по тези методи, обследват обектите по целия диаметър, в

завоите и разклоненията, дават възможност за он-лайн предаване на данни.

По показател разход на енергия, контактните сензори само предават сигнали, докато безконтактните имат предавател и приемник. Предимството на пиезо-резистивните и кондензаторни методи е установено от техния разход в порядък на 10 mW, когато се работи непрекъснато, докато ултразвуковите консумират 550 mW за една и съща операция. Магнито-резистивните имат малко по-висока консумация от порядъка на 20 mW [<http://www.clampon.com/products/topside/corrosion-erosion-monitor/specifications/>]. Тези констатации ограничават внедряването на ултразвуковите сензори само за периодични проверки и наблюдения, но роботизираните системи са предназначени точно за такива инспекции. Когато се използва неподвижна система за измерване е редно да се отбележи, че въпреки своята голяма консумация ултразвуковите и вихровотоковите прибори действат на определен обхват по тръбопровода и диагностицират по целия диаметър, докато пиезо-резистивните и кондензаторните имат по-малък обхват на действие. За пример в изградена стационарна система на 100км са разположени 112 ултразвукови трансдусера, докато за инспектиране на същия участък с резистивни датчици, ще са нужни много повече устройства. Ето защо за реално сравнение на сензорите по енергиен показател е редно да не се разглежда консумацията на едно от тях, а тя да се изчисли за определен за участък.

## Изводи

Устройствата за измерване на вътрешна корозия в подземните тръбопроводи се различават от тези, използвани за инспекция на повърхността. Основен фактор за тази разлика са спецификите на средата, на базата на които са обобщени основните тенденции в разработването на датчици за измерване на вътрешна корозия. За определяне приложимостта на методите за регистриране на нивото на корозия са разгледани основните корозионни фактори в тръбопроводите. Поради многообразието на методите и техните специфични свойства не е възможно те да се оценят, ето защо са препоръчани критерии, според които те да се сравняват. Предвид условията във вътрешността на подземните структури и необходимостта от измерване на големината и локализацията на пукнатини се препоръчва прилагането на ултразвуков или вихровотоков метод. Все пак, поради ниската си консумация на енергия и простота на действие като задача пред специалистите стои изработването на резистивен или кондензаторен датчик за измерване на локална корозия.

## Литература

- Петров, Велев, 2011, *Нов метод за определяне на степента на корозия на стоманени заземители чрез използване на индуктивни датчици*, Годишник МГУ, т.54, 151-154;
- Христова Т., 2008, *Наблюдение на корозионното състояние на подземни тръбопроводи с помощта на сензорни устройства*, МНС на МГУ, том 51;
- Христова Т., 2013, *Предимства и недостатъци на известните изолации. Критерии за избор на изолация според критериите и оценяване на риска за възникване на корозия*, Годишник МГУ, т. 56, 128-132
- Bickerstaff, R., Vaughn, M., Stoker, G., 2002, *Review of sensor technologies for in-line inspection of natural gas pipelines*, Sandia National Laboratories. Hassard, M. and Garrett M.; D.Isa, R.Rajkumar, *Ultrasonic Sensor Data Processing using Support Vector Machines*;
- Gbenga Owojaiye, Yichuang Sun, 2013, *Focal design issues affecting the deployment of wireless sensor networks for pipeline monitoring*, Ad Hoc Networks 11, 1237–1253;
- Juan Liang, Anqi Den, Rongjing Xie, Mylene Gomez, Jiangyong Hu, Jufang Zhang, Choon Nam Ong, Avner Adin, 2013, *Impact of flow rate on corrosion of cast iron and quality of re-mineralized seawater reverse osmosis (SWRO) membrane product water*, Desalination, Vol. 322, 76–83;
- Neil G. Thompson, 2003, *Gas and liquid transmission pipelines. Summary Analysis of Results, Corrosion Control and Prevention*, CC Technologies, Inc, Dublin, Ohio, [www.corrosioncost.com/pdf/gasliquid.pdf](http://www.corrosioncost.com/pdf/gasliquid.pdf);
- Pots Bert; Mateer Mark; Scott P K; Fagbayl Kola, 2005, *System and method for measuring electric current in a pipeline*, US2008276731;
- Shamsuddoha, Mainul Islam, Thiru Aravinthan, Allan Manalo, Kin-tak Lau, 2013, *Effectiveness of using fibre-reinforced polymer composites for underwater steel pipeline repairs*, Composite Structures, Vol. 100, 40–54;
- Ted Tsung-Te Lai, Wei-Ju Chen, Kuei-Han Li, Polly Huang, Hao-Hua Chu, TriopusNet: *Automating Wireless Sensor Network Deployment and Replacement in Pipeline Monitoring*, National Taiwan University, Taipei;
- Z. M. Hafizi, C.K. E. Nizwan, M.F.A .Reza& M.A.A.Johari, *High Frequency Acoustic Signal Analysis for Internal Surface Pipe Roughness Classification*, Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Malaysia Pahang, 26600 Pekan, Malaysia

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Електротехника“.