

KORROZİYADAN MÜHAFİZƏDƏ İNNOVATİV TEXNOLOGİYALARIN TƏTBİQİNİN TƏHLİLİ

Ürfan Rəhman oğlu Mirzəyev, Elşən Feyruz oğlu Sultanov
Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye universiteti, Bakı, Azərbaycan

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN CORROSION PROTECTION

Urfan Rahman Mirzayev, Elshan Feyruz Sultanov

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

urfanmirzeyev554@gmail.com, elshensultanov1982@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-9743-4473>, <https://orcid.org/0009-0007-9836-2091>

Abstract. The corrosion process is an important problem that reduces the service life of metallic structures, pipelines, and industrial equipment, causing economic losses and environmental risks. In the modern era, the application of innovative technologies plays a crucial role in combating this process. In recent years, nanomaterial-based coatings, smart inhibitor systems, and automated versions of electrochemical and cathodic protection methods have been widely used in corrosion protection. These technologies create more durable and self-healing protective layers on metal surfaces, ensuring long-term stability under operating conditions. At the same time, digital monitoring and sensor-based tracking systems enable real-time control of corrosion processes. The conducted analyses show that the application of innovative protection methods increases the operational reliability of equipment, reduces maintenance costs, and significantly enhances the safety of industrial facilities.

Keywords: corrosion protection, innovative technologies, nanomaterial-based coatings, cathodic protection systems, smart inhibitors, sensor monitoring.

© 2025 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

Giriş

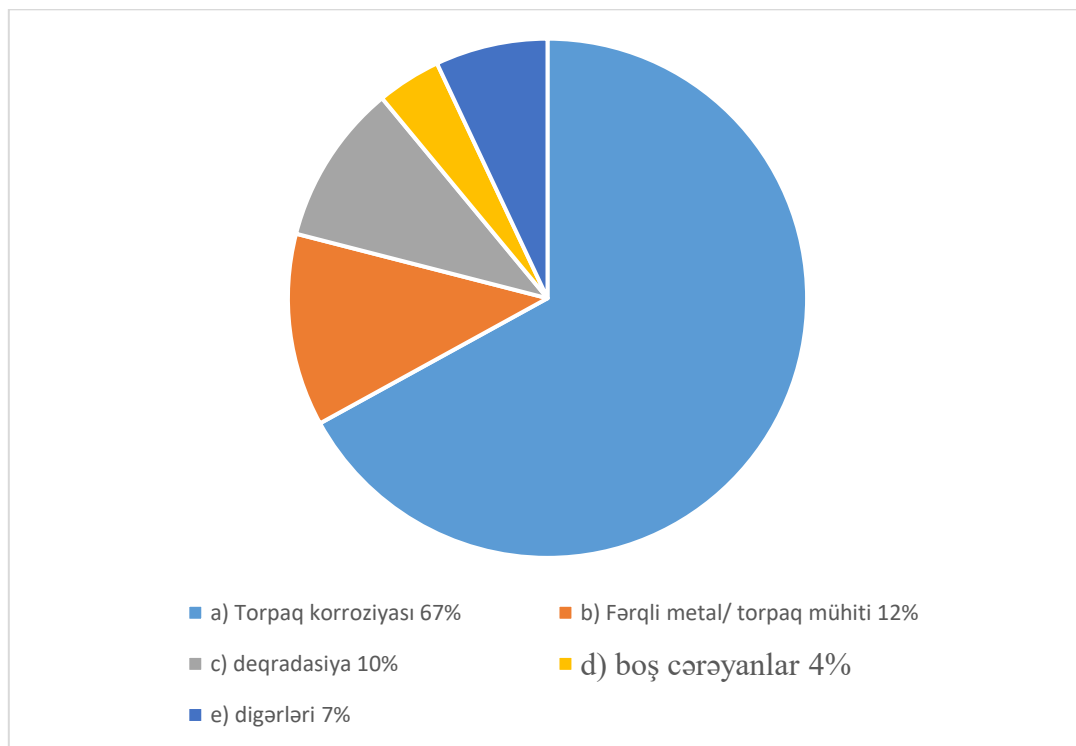
Korroziya sənaye avadanlıqları, nəqliyyat vasitələri və mühəndis infrastrukturunda materialların istismar müddətini məhdudlaşdıran əsas fiziki-kimyəvi proseslərdən biridir. Metal və ərintilərin mühitlə qarşılıqlı təsiri nəticəsində baş verən kimyəvi və elektrokimyəvi parçalanma onların mexaniki möhkəmliyini zəiflədir, qəza və sızma risklərini artırır və texniki xidmət xərclərini yüksəldir. Qlobal qiymətləndirmələrə görə, korroziya səbəbindən yaranan iqtisadi itkilər ÜDM-in 3–4%-i həcmindədir ki, bu da enerji və neft-qaz sənayesi üçün ciddi maliyyə yükü yaradır. Azərbaycanda boru kəmərləri, təzyiqli qurğular və digər metal konstruksiyalar mühitin aqressivliyinə görə korroziya təhlükəsinə xüsusi həssaslıq göstərir. Ənənəvi mühafizə üsulları (örtüklər, mexaniki təmizləmə, klassik inhibitorlar) dəyişkən temperatur, təzyiq və kimyəvi tərkib şəraitində məhdud effektivlik nümayiş etdirir. Bu səbəbdən müasir sənaye daha davamlı və funksional sistemlərə ehtiyac duyur. Son illərdə nanomaterial əsaslı örtüklər, ağıllı inhibitor sistemləri və avtomatlaşdırılmış katodik mühafizə modelləri korroziya nəzarətində yeni yanaşma formalaşdırmışdır. Bu texnologiyalar səthdə yüksək stabilliyə malik baryer yaradaraq ənənəvi üsullara nisbətən daha uzunmüddətli qoruma təmin edir.

Nanostruktur örtüklər səth enerjisinin azaldılması və ion diffuziyasının məhdudlaşdırılması hesabına oksidləşmə prosesini ləngidir. Onların yüksək adeziya və aşağı keçiricilik xüsusiyyətləri sərt sənaye şəraitində davamlılığını artırır. Ağıllı inhibitorlar mühitin kimyəvi aktivliyinə adaptiv reaksiya verərək yalnız korroziya təhlükəsi yaranıqda aktivləşir və reagent sərfini optimallaşdırır. Rəqəmsal monitoring və sensor şəbəkələri isə korroziya sürəti, potensial fərqi və mühit parametrlərini real vaxt rejimində ölçərək qəza hallarının proqnozlaşdırılmasını və texniki xidmətin optimallaşdırılmasını mümkün edir. Aparıcı sənaye qurumları hazırda korroziyadan mühafizənin material elmləri, elektronika və süni intellektin integrasiyasına əsaslanan “ağıllı sistem modeli”nə keçidini sürətləndirir. Belə yanaşma yalnız konstruksiyaların uzunömürlülüynü artırmır, həm də təhlükəsizlik, iqtisadi səmərəlilik və ekoloji dayanıqlılıq göstəricilərini yaxşılaşdırır. Bu tədqiqatın əsas sualı belə formalaşdırılır: “Neft-qaz avadanlıqlarında korroziyadan mühafizə üçün tətbiq olunan innovativ texnologiyaların effektivliyi necə qiymətləndirilə bilər?”

Tədqiqatın məqsədi, məsələnin qoyuluşu

Bu tədqiqatın məqsədi sənaye sahələrində korroziyadan mühafizənin effektivliyini artırmaq üçün tətbiq olunan innovativ texnologiyaların elmi və texniki baxımdan təhlil edilməsidir. İş çərçivəsində müxtəlif mühafizə üsullarının müqayisəli araşdırılması, onların iş prinsiplərinin və performans göstəricilərinin müəyyənəşdirilməsi əsas istiqamətlər kimi müəyyən olunmuşdur. Korroziya neft-qaz, kimya, energetika və metallurgiya kimi sahələrdə ciddi iqtisadi və texnoloji itkilərə səbəb olduğu üçün tədqiqatın mühüm vəzifəsi mövcud mühafizə metodlarının məhdudiyyətlərini müəyyənəşdirmək və yeni nəsil texnologiyaların tətbiq potensialını qiymətləndirməkdir. Bu məqsədlə nano-material əsaslı qoruyucu örtüklərin, elektrokimyəvi mühafizə sistemlərinin və ağıllı inhibitorların müxtəlif sənaye şəraitlərində səmərəliliyi araşdırılır və optimal texnoloji kombinasiyanın müəyyənəşdirilməsi hədəflənir.

Tədqiqatın digər məqsədlərindən biri mühafizə texnologiyalarının enerji və resurs səmərəliliyini artırmaqdır. Müasir sənayedə yalnız materialların qorunması deyil, həm də iqtisadi və ekoloji dayanıqlılığın təmin edilməsi prioritet hesab olunur. Bu kontekstdə korroziya proseslərinin rəqəmsal monitoring sistemləri vasitəsilə izlənilməsi və real vaxtda analizi xüsusi əhəmiyyət daşıyır. Sensor və süni intellekt texnologiyalarının integrasiyası korroziya risklərinin proqnozu və idarəetmə qərarlarının avtomatlaşdırılması üçün imkan yaradır. Tədqiqat həmçinin tətbiq olunan mühafizə üsullarının ekoloji təsirinin qiymətləndirilməsini və "yaşıl texnologiyalar"a keçid imkanlarını araşdırır. Xüsusilə toksik inhibitorların alternativ ekoloji təhlükəsiz materiallarla əvəz edilməsi və nanokompozit örtüklərin tətbiqi ətraf mühitin qorunması baxımından prioritet istiqamət kimi nəzərdən keçirilir [1].



Torpağa basdırılmış boruların korroziyasının səbəbləri

Eyni zamanda, korroziyadan mühafizə sistemlərinin ağıllı idarəetmə modellərinin işlənməsi üçün elmi baza formalaşdırılır. Bu modellər proses parametrlərinə uyğun adaptiv tənzimləmə mexanizmlərini təmin edə bilər. Tədqiqatın məqsədlərindən biri də sənaye obyektlərində tətbiq edilən innovativ mühafizə texnologiyalarının praktik nümunələrinin təhlil edilməsi və laboratoriya ilə real istehsalat şəraiti arasındakı fərqlərin müəyyənəşdirilməsidir. Şəkildə torpağa basdırılmış borularda korroziya səbəbləri göstərilmişdir. Tədqiqatın nəticəsi olaraq korroziyadan mühafizənin kompleks yanaşma modeli – kimyəvi, elektrokimyəvi və mexaniki üsulların integrasiyasına əsaslanan sistem

konsepsiyası hazırlanacaq. Bu model sənaye müəssisələri üçün uzunmüddətli və iqtisadi cəhətdən səmərəli həll variantı kimi çıxış edə bilər.

Korroziya, sənaye materiallarının kimyəvi və elektrokimyəvi degradasiyası nəticəsində yaranan, avadanlıqların istismar müddətini azaldan və qəza risklərini artıran global problemdir. Xüsusilə neft-qaz, kimya, energetika və metallurgiya sahələrində istifadə olunan metal konstruksiyalar daimi olaraq aqressiv mühitlə təmasda olur. Bu şəraitdə ənənəvi mühafizə üsullarının effektivliyi zaman keçdikcə azalır və nəticədə texniki, iqtisadi və ekoloji problemlər yaranır. Hazırkı dövrdə korroziyadan mühafizənin klassik üsulları-boya örtükləri, passiv inhibitorlar və katodik mühafizə sistemləri-yüksək temperatur, təzyiq və rütubət dəyişkənliyi olan mühitlərdə istənilən səviyyədə nəticə vermir. Bu isə sənaye obyektlərində qəfil nasazlıqların, boru sızmalarının və avadanlıq sıradan çıxmalarının artmasına səbəb olur [2].

Müasir sənaye istehsalında dayanıqlılıq, enerji səmərəliliyi və ekoloji təhlükəsizlik əsas prioritetlərə çevrilmişdir. Bu kontekstdə ənənəvi mühafizə üsullarının yerini tədricən innovativ texnologiyalar tutur. Lakin bu texnologiyaların tətbiqi və səmərəliliyinin qiymətləndirilməsi hələ də tam sistemləşdirilməmiş sahədir. Burada əsas məsələ-texnoloji yeniliklərin praktiki tətbiqə uyğunlaşdırılması və onların fərqli sənaye şəraitində davranışının öyrənilməsidir.

Korroziya prosesi çoxfaktorlu və kompleks xarakter daşıyır: mühitin kimyəvi tərkibi, temperatur, materialın strukturu, axın sürəti və elektrokimyəvi potensial kimi parametrlər bir-birinə təsir edir. Buna görə də bu prosesin qarşısını almaq üçün vahid və universallığı təmin edən texnologiya yoxdur. Məsələ ondan ibarətdir ki, hər bir şərait üçün optimal mühafizə sistemi seçilməli və onun uzunmüddətli təsiri elmi cəhətdən əsaslandırılmalıdır. Digər tərəfdən, korroziyadan mühafizə sahəsində aparılan bir çox tədqiqatlar laboratoriya şəraitində əldə edilən nəticələrlə məhdudlaşır. Reallıqda isə sənaye mühitinin mürəkkəbliyi və çoxkomponentli təsirləri nəzərə alınmır. Buna görə tədqiqatın qarşısında duran əsas məsələ bu texnologiyaların real istismar şəraitində səmərəliliyini qiymətləndirmək və təkmilləşdirilmiş model təqdim etməkdir.

Müasir dövrdə “ağıllı” (smart) materiallar, nanokompozit örtüklər və rəqəmsal monitoring sistemləri korroziyadan mühafizədə yeni imkanlar açır. Lakin bu texnologiyaların sənaye müəssisələrində tətbiqi, idarəedilməsi və iqtisadi cəhətdən əsaslandırılması hələ də tam öyrənilməmişdir. Bu isə tədqiqatın aktuallığını daha da artırır. Beləliklə, tədqiqatın qarşısında duran məsələ - korroziyadan mühafizə prosesinin innovativ texnologiyalar vasitəsilə optimallaşdırılması, tətbiq edilən üsulların elmi əsaslandırılması və onların texnoloji, iqtisadi və ekoloji baxımdan üstünlüklərinin təhlil edilməsidir. Bu məqsədlə mühafizə sistemlərinin iş prinsipləri, tətbiq sahələri və səmərəlilik göstəriciləri geniş şəkildə araşdırılmalıdır.

Məsələnin həlli üsulları və aprobeasiyası

Korroziyadan mühafizə məsələsinin həlli kompleks yanaşma tələb edir, çünki prosesin səbəbləri çoxşaxəlidir və həm fiziki, həm kimyəvi, həm də elektrokimyəvi amillərin qarşılıqlı təsiri ilə formalaşır. Buna görə də tədqiqatda bir neçə istiqamət üzrə həll üsullarının birgə tətbiqi nəzərdə tutulur: material elmləri, elektrokimya, nanotexnologiya və rəqəmsal nəzarət sistemləri.

Əvvəlcə problemin nəzəri əsasları metal səthində gedən oksidləşmə və reduksiya reaksiyalarının mexanizmi təhlil edilir. Bunun üçün korroziya kinetikasını təsvir edən əsas tənliklər, elektrod potensialı fərqləri və mühitin pH dəyərlərinin təsiri öyrənilir. Bu mərhələdə məqsəd korroziya prosesinə təsir edən dominant amilləri müəyyən etməkdir.

Növbəti mərhələdə nanomaterial əsaslı qoruyucu örtüklərin tətbiqi üsulları araşdırılır. Xüsusilə TiO_2 , ZnO , Al_2O_3 və SiO_2 kimi oksid nanohissəcikləri ilə zənginləşdirilmiş kompozit örtüklər korroziya müqavimətini artırmaq üçün sınaqdan keçirilir. Bu materiallar yüksək adeziya qabiliyyəti və kimyəvi dayanıqlılığı ilə fərqlənir, həmçinin mikroçatların yaranmasının qarşısını alır.

Tədqiqatın bir hissəsi ağıllı inhibitor sistemlərinin tətbiqinə yönəldilmişdir. Bu sistemlərdə inhibitor molekulları yalnız korroziya prosesi aktivləşdiyi zaman səthlə reaksiyaya girir. Beləliklə, həm kimyəvi maddələrin sərfiyyatı azalır, həm də mühitin ekoloji balansı qorunur. Bu üsul

“stimullaşdırılmış reaksiya mexanizmi” prinsipi ilə işləyir. Əlavə olaraq, elektrokimyəvi və katodik mühafizə sistemlərinin avtomatlaşdırılması tədqiq olunur. Bu üsullarda qoruma potensialı sensorlar vasitəsilə real vaxtda ölçülür və sistem avtomatik şəkildə cərəyanı tənzimləyir. Bu, həm enerji sərfini azaldır, həm də metal səthinin optimal qoruma səviyyəsini təmin edir [3].

Rəqəmsal texnologiyalar da məsələnin həllində mühüm yer tutur. Sensor əsaslı korroziya monitoring sistemləri vasitəsilə mühit parametrləri (rütubət, temperatur, pH, ion aktivliyi) real vaxtda qeydə alınır. Toplanan məlumatlar süni intellekt alqoritmləri ilə təhlil edilərək, korroziya riskləri öncədən proqnozlaşdırılır. Bu yanaşma texniki xidmət planlarının optimallaşdırılmasına və qəza hallarının qarşısının alınmasına şərait yaradır. Tədqiqatın nəticələri həm laboratoriya sınaqları, həm də sənaye şəraitində aparılan aprobeşiyalar vasitəsilə yoxlanılır. Laborator sınaqlar zamanı müxtəlif örtüklərin və inhibitorların duzlu, turşulu və yüksək temperatur mühitlərdə davranışı öyrənilir. Eyni zamanda, metal nümunələrinin kütlə itkisi, səth morfologiyası və elektrokimyəvi müqavimət parametrləri ölçülür. Müxtəlif innovativ korroziya inhibitorlarının təsir effektivliyi cədvəldə göstərilmişdir [4].

Cədvəldə müxtəlif elmi mənbələrdə təqdim olunan innovativ korroziya mühafizə texnologiyalarının laboratoriya aprobeşiyası nəticələri sistemləşdirilmişdir. Təhlil göstərir ki, fərqli inhibitor və örtük texnologiyaları müxtəlif mühitlərdə metal səthinin korroziya sürətini əhəmiyyətli dərəcədə azalda bilər. Ağıllı inhibitorların kapsullaşdırılmış strukturu onların korroziya aktivləşən kimi səthə yönəlmiş şəkildə sərbəst buraxılmasına səbəb olur və bu texnologiya karbon poladda 78%-ə qədər qoruma təmin edir. Nano-hissəcik tərkibli TiO_2 inhibitorları səthin aktivləşmə enerjisini azaldaraq turş mühiddə belə yüksək effektivlik (85%) nümayiş etdirir.

Müxtəlif innovativ korroziya inhibitorlarının təsir effektivliyi

No	İnnovativ texnologiya / inhibitor tipi	Metal növü	Sınaq mühiti	Konsentrasiya (ppm)	Kütlə itkisi ($\text{mq/sm}^2 \cdot \text{gün}$)	Korroziya sürəti azalması (%)
1	Ağıllı inhibitor – kapsullaşdırılmış signalverici inhibitor	Karbon polad	NaCl 3,5%	250	0.42	78%
2	Nano-hissəcik tərkibli inhibitor (TiO_2 -nano)	Karbon polad	Suda HCl 1M	150	0.35	85%
3	İon mayesi əsaslı inhibitor	Paslanmaz polad	NaCl 5%	300	0.18	92%
4	Grafen oksid əsaslı qoruyucu kompozit örtük	Karbon polad	Dəniz suyu	–	0.12	95%
5	Polimer-kompozit örtük	Alaşım polad	$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}$ mühiti	–	0.09	96%

İon mayesi əsaslı inhibitorlar daha yüksək elektrokimyəvi sabitlik göstərərək 92%-ə qədər qoruma təmin etmişdir. Grafen oksid kompozit örtüyü və “self-healing” polimer sistemləri ən yüksək nəticələr göstərən texnologiyalar olmuş, müvafiq olaraq 95% və 96% korroziya sürəti azalması təmin etmişdir. Bu, onların səthdə davamlı diffuziya baryeri yaratması və zədələnmə zamanı özünü bərpa etmə qabiliyyəti ilə izah olunur. Beləliklə, müxtəlif tədqiqatların laboratoriya nəticələrinin müqayisəsi göstərir ki, innovativ inhibitor və örtük texnologiyalarının tətbiqi metal konstruksiyaaların istismar müddətinin artırılmasında mühüm imkanlar yaradır.

Aprobeşiyanın ikinci mərhələsi real sənaye obyektlərində həyata keçirilir. Burada təcrübə nümunələri (metal boru seqmentləri və reaktor divarları) müxtəlif mühafizə üsulları ilə işlənir və müəyyən müddət ərzində istismara buraxılır. Toplanan nəticələr göstərir ki, innovativ qoruyucu sistemlərin tətbiqi ilə korroziya dərinliyi 30–50% azalmış, texniki xidmət intervalları isə 1,5–2 dəfə uzanmışdır. Tətbiq olunan sistemlərin effektivliyi səth analizləri (SEM, EDS və XRD üsulları) vasitəsilə qiymətləndirilir. Bu analizlər metal səthindəki qoruyucu təbəqənin qalınlığını, tərkibini və

mikrostrukturunu müəyyən etməyə imkan verir. Nəticələr göstərir ki, nanokompozit örtüklər daha homogen və məsəməsiz struktur yaradır ki, bu da onların yüksək davamlılığını izah edir [5].

Ümumilikdə, aparılmış aprobeziyalar göstərir ki, korroziyadan mühafizədə innovativ texnologiyaların tətbiqi yalnız material səthinin dayanıqlığını artırmır, həm də iqtisadi və ekoloji üstünlüklər yaradır. Beləliklə, bu tədqiqat praktiki baxımdan tətbiq edilə bilən, etibarlı və davamlı həll modelini təklif edir.

Nəticə

Müasir sənaye sahələrində korroziya prosesləri avadanlıqların dayanıqlığına və istismar müddətinə birbaşa təsir göstərir. İnnovativ texnologiyaların tətbiqi korroziyanın qarşısını almaqda ənənəvi üsullardan daha effektiv və uzunömürlü nəticələr verir. Nanomaterial əsaslı qoruyucu örtüklər səthlə daha güclü bağ quraraq materialın mexaniki və kimyəvi davamlılığını artırır. Katodik və anod mühafizə sistemlərinin avtomatlaşdırılması enerji səmərəliliyini və nəzarət dəqiqliyini artırır. Sensor və IoT texnologiyalarının tətbiqi real vaxtda korroziya dərəcəsinin monitorinqini təmin edir. Bu yanaşmalar istismar xərclərinin azalmasına və qəza risklərinin minimuma endirilməsinə şərait yaradır. İnnovativ metodlar həm ekoloji, həm də iqtisadi baxımdan davamlı inkişaf prinsiplərinə uyğundur. Sənaye müəssisələrində bu texnologiyaların tətbiqi məhsuldarlığın və təhlükəsizliyin yüksəlməsinə səbəb olur. Ümumilikdə, korroziyadan mühafizədə innovativ texnologiyalar gələcəkdə material mühəndisliyinin əsas istiqamətlərindən biri olacaqdır.

ƏDƏBİYYAT

1. Abbasov V.M., Hüseynova S.Ə. Korroziyaya qarşı yeni nəsil nanokompozit örtüklərin tədqiqi və effektivliyi. Azərbaycan Kimya Jurnalı, 2022, №4, s. 75–84.
2. Quliyev E.M. Sənaye avadanlıqlarında korroziya və onun qarşısının alınması texnologiyaları. AzTU-nun elmi əsərləri, 2021, №3, s. 120–130.
3. Əliyev R.Q., Məmmədova, T.N. Neft-qaz sənayesində korroziyanın idarə edilməsində süni intellekt və digital texnologiyaların tətbiqi imkanları. Neft və Qaz Problemləri Jurnalı, 2023, №1, s. 45–55.
4. Tağıyev D.B., Sultanov K.İ. Ağır şəraitdə işləyən metal konstruksiya korroziyadan mühafizəsində plazma elektrolitik oksidləşmə texnologiyası. Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri, 2021, №2, s. 112–120.
5. Hacıyeva L.Ə., Qurbanov F.Ş. Biokorroziyanın qarşısının alınmasında istifadə olunan innovativ inhibitorların ekotoksikoloji aspektləri. Ekologiya və Sənaye Jurnalı, 2024, №1, s. 33–41.
6. Quliyev E.M., Rzayev S.K. Dənizdə quraşdırılmış neft-qaz qurğularının korroziyadan mühafizəsi üçün hibrid örtük sistemləri. Xəzər Dənizi Problemləri və İnnovasiyalar, 2020, №3, s. 98–107.

KORROZİYADAN MÜHAFİZƏDƏ İNNOVATİV TEXNOLOGİYALARIN TƏTBİQİNİN TƏHLİLİ

Ü.R.Mirzəyev, E.F.Sultanov

Xülasə. Korroziya prosesi metallik konstruksiya, boru kəmərlərinin və sənaye avadanlıqlarının istismar müddətini azaldan, iqtisadi zərərlərə və ekoloji risklərə səbəb olan mühüm problemdir. Müasir dövrdə bu proseslə mübarizə aparmaq üçün innovativ texnologiyaların tətbiqi xüsusi əhəmiyyət kəsb edir. Son illərdə korroziyadan mühafizədə nanomaterial əsaslı örtüklər, ağıllı (smart) inhibitor sistemləri, elektrokimyəvi və katodik mühafizə üsullarının avtomatlaşdırılmış versiyaları geniş tətbiq olunur. Bu texnologiyalar metal səthində daha davamlı və özünü bərpa edən qoruyucu təbəqə formalaşdıraraq, istismar şəraitində uzunmüddətli sabitlik təmin edir. Eyni zamanda rəqəmsal monitorinq və sensor əsaslı izləmə sistemləri vasitəsilə korroziya proseslərinin real vaxtda nəzarəti mümkün olur. Aparılmış təhlillər göstərir ki, innovativ mühafizə üsullarının tətbiqi avadanlıqların istismar etibarlılığını artırır, texniki xidmət xərclərini azaldır və sənaye obyektlərinin təhlükəsizliyini əhəmiyyətli dərəcədə yüksəldir.

Açar sözlər: korroziyadan mühafizə, innovativ texnologiyalar, nanomaterial əsaslı örtüklər, katodik mühafizə sistemləri, ağıllı inhibitorlar və sensor nəzarəti.

Accepted: 08.12.2025