

NEFT-GAZ SANOATIDA DIFFUZIYA VA KORROZIYA JARAYONLARINI SONLI MODELLASHTIRISH

Bozorov Rustam Tilovberdiyevich

Qarshi davlat texnika universiteti

“Sanoat muhandisligi va menejmenti” kafedrasida assistenti

Email: bozorov1987r@gmail.com

Tel: +998938032741

Raxmatov Erkin Abdixafizovich

Iqtisodiyot va pedagogika universiteti professori

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.21132070>

Annotatsiya: Ushbu tadqiqotda neft-gaz sanoati sharoitida ishlovchi konstruksion materiallarda diffuziya va korroziya jarayonlarini sonli modellashtirish masalasi o'rganildi. Vodorod diffuziyasi, mexanik kuchlanish va elektrokimyoviy korroziya jarayonlarining o'zaro bog'liqligi ko'p maydonli modellashtirish asosida tahlil qilindi. Vodorod konsentratsiyasi taqsimoti, stress-assisted diffusion va korroziya tezligining o'zgarishini baholashda Fik qonunlari hamda Butler–Volmer modeli qo'llanildi. Chekli elementlar usuli (FEM) asosida quvur devoridagi kuchlanish maydoni, vodorod diffuziyasi va korroziya intensivligi taqsimoti aniqlandi. Olingan natijalar yuqori kuchlanishli hududlarda vodorod migratsiyasi va elektrokimyoviy yemirilish jarayonlari tezlashishini ko'rsatdi. Tadqiqot natijalari integratsiyalashgan sonli modellashtirish yondashuvi material degradatsiyasi, vodorod mo'rtligi xavfi va konstruktsiyalarning uzoq muddatli ekspluatatsion ishonchliligini prognoz qilishda samarali vosita ekanligini tasdiqladi.

Kalit so'zlar: diffuziya, korroziya, vodorod mo'rtligi, sonli modellashtirish, Butler–Volmer tenglamasi, chekli elementlar usuli.

NUMERICAL MODELING OF DIFFUSION AND CORROSION PROCESSES IN THE OIL AND GAS INDUSTRY

Abstract: This study investigates the numerical modeling of diffusion and corrosion processes in structural materials operating under oil and gas industry conditions. The interactions between hydrogen diffusion, mechanical stress, and electrochemical corrosion were analyzed using multiphysics modeling approaches. Fick's diffusion equations and the Butler–Volmer electrochemical model were applied to evaluate hydrogen concentration distribution, stress-assisted diffusion, and corrosion rate evolution in pipeline walls. Finite element method (FEM)-based simulations were used to determine stress fields, hydrogen diffusion zones, and corrosion intensity distribution. The obtained results demonstrated that high-stress regions significantly accelerate hydrogen migration and electrochemical degradation processes. The study confirms that integrated numerical modeling can effectively predict material degradation, hydrogen embrittlement risk, and long-term operational reliability of oil and gas structures.

Keywords: diffusion, corrosion, hydrogen embrittlement, numerical modeling, Butler–Volmer equation, finite element method.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИФФУЗИИ И КОРРОЗИИ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Аннотация: В данной работе исследовано численное моделирование процессов диффузии и коррозии в конструкционных материалах, работающих в условиях нефтегазовой промышленности. На основе мультифизического подхода проанализировано взаимодействие водородной диффузии, механических напряжений и электрохимической коррозии. Для оценки распределения концентрации водорода, *stress-assisted diffusion* и скорости коррозии использовались законы Фика и электрохимическая модель Батлера–Фольмера. С использованием метода конечных элементов (FEM) определены поля механических напряжений, зоны водородной диффузии и распределение интенсивности коррозии в стенке трубопровода. Полученные результаты показали, что области с высокими напряжениями значительно ускоряют процессы миграции водорода и электрохимического разрушения материала. Результаты исследования подтверждают, что интегрированное численное моделирование является эффективным инструментом прогнозирования деградации материалов, риска водородного охрупчивания и долговременной эксплуатационной надёжности нефтегазовых конструкций.

Ключевые слова: диффузия, коррозия, водородное охрупчивание, численное моделирование, уравнение Батлера–Фольмера, метод конечных элементов.

Kirish: Neft-gaz sanoatida ishlovchi metall konstruktsiyalarning xizmat muddati va ekspluatatsion ishonchliligi ko‘plab degradatsiya jarayonlariga bog‘liq bo‘lib, ulardan eng muhimlari diffuziya va korroziya jarayonlari hisoblanadi. Yuqori bosim, yuqori harorat hamda agressiv kimyoviy muhit ta’sirida materiallarning mikrostrukturasi asta-sekin o‘zgaradi va bu holat konstruktsiyalarning mexanik xossalari salbiy ta’sir ko‘rsatadi. Ayniqsa CO₂ va H₂S mavjud muhitlarda quvur tizimlari, reaktor qurilmalari va issiqlik almashinish apparatlarida elektrokimyoviy yemirilish jarayonlari intensiv rivojlanadi. Shu sababli material degradatsiyasini oldindan baholash va prognoz qilish zamonaviy materialshunoslikning dolzarb ilmiy yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi [1].

Materiallarning degradatsiyasi ko‘pincha mexanik sinishdan oldin diffuziya jarayonlari bilan boshlanadi. Vodorod atomlarining metall panjarasiga kirib borishi natijasida vodorod mo‘rtligi, ichki kuchlanishlarning ortishi va mikrodefektlarning shakllanishi kuzatiladi. Qattiq jismlarda atomlarning konsentratsiya gradienti bo‘ylab harakatlanishi Fik qonunlari bilan tavsiflanadi va ushbu qonunlar diffuziya jarayonlarini matematik modellashtirishning asosini tashkil etadi. Ayniqsa yuqori temperaturali va bosimli sharoitlarda vodorod diffuziyasining kuchayishi metallarning ekspluatatsion xavfsizligini sezilarli darajada pasaytiradi [2].

Mexanik kuchlanish va diffuziya jarayonlari o‘zaro bog‘liq bo‘lib, kuchlanish gradientlari vodorod atomlarining material ichidagi migratsiyasini tezlashtiradi. Stress-

assisted diffusion deb ataluvchi ushbu hodisa stress corrosion cracking (SCC) jarayonlarining asosiy fizik mexanizmlaridan biri hisoblanadi. Yuqori kuchlanish mavjud hududlarda vodorod konsentratsiyasining ortishi mikrostrukturaviy zaiflashishga olib keladi va natijada yorilish xavfi keskin oshadi. Shu sababli diffuziya va mexanik kuchlanishning oʻzaro taʼsirini kompleks modellashtirish sanoat xavfsizligini taʼminlashda muhim ahamiyat kasb etadi [3].

Elektrokimyoviy korroziya metallarning degradatsiyalanishida asosiy omillardan biri boʻlib, anod va katod reaksiyalari kinetikasi bilan belgilanadi. Metall yuzasida sodir boʻladigan oksidlanish va qaytarilish reaksiyalari natijasida materialning asta-sekin yemirilishi kuzatiladi. Korroziya jarayonlarini tahlil qilishda Butler–Volmer tenglamasi va polarizatsiya egri chiziqlari keng qoʻllaniladi. Ushbu yondashuv yordamida korroziya toki zichligi, korroziya tezligi hamda agressiv muhitning materialga taʼsiri aniqlanadi. Ayniqsa korroziyaga qarshi himoya usullarini ishlab chiqish, ingibitorlar samaradorligini baholash va katod himoyasi tizimlarini loyihalashda elektrokimyoviy modellashtirish katta amaliy ahamiyatga ega [4].

Yuqori haroratli ish rejimlarida esa oksidlanish jarayonlari material degradatsiyasining asosiy sabablaridan biri hisoblanadi. Metall yuzasida oksid qatlamining hosil boʻlishi va uning vaqt davomida oʻsishi materialning issiqlik va mexanik xossalriga taʼsir koʻrsatadi. Parabolik kinetika modeli yordamida yuqori haroratli oksidlanish jarayonlari tavsiflanadi hamda kraking pechlari va reforming reaktorlarida materiallarning xizmat muddatini prognoz qilish imkoniyati yaratiladi [5].

Hozirgi kunda diffuziya, mexanik kuchlanish va elektrokimyoviy korroziya jarayonlarini alohida emas, balki yagona koʻp maydonli (multiphysics) tizim sifatida oʻrganishga katta eʼtibor qaratilmoqda. COMSOL, ANSYS va boshqa sonli modellashtirish platformalari yordamida ushbu jarayonlarning oʻzaro bogʻliqligini hisoblash imkoniyati paydo boʻldi. Integratsiyalashgan modellar orqali quvur devoridagi kuchlanish maydoni, vodorod konsentratsiyasi va korroziya tezligining vaqt boʻyicha oʻzgarishi prognoz qilinadi. Bu esa neft-gaz sanoatidagi konstruktsiyalarning xizmat muddatini aniqroq baholash hamda avariya xavfini oldindan aniqlash imkonini beradi.

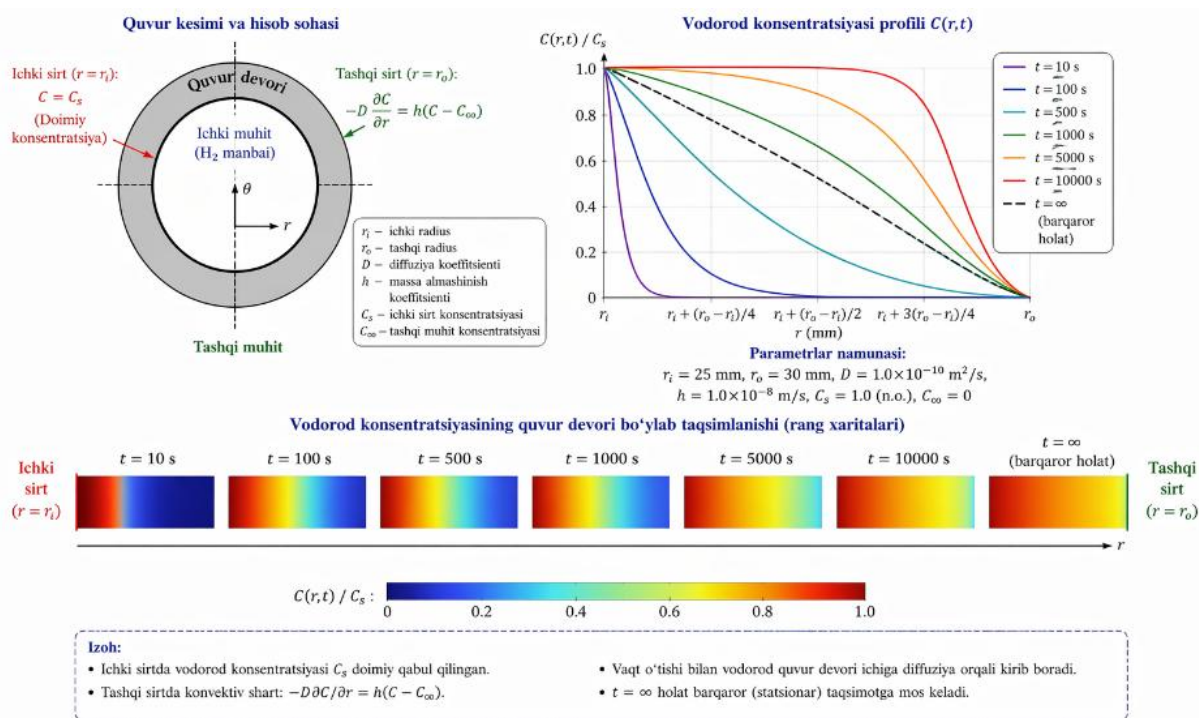
Asosiy qism: Neft-gaz sanoatida materiallarning degradatsiyasi koʻpincha vodorod diffuziyasi, mexanik kuchlanish va elektrokimyoviy korroziya jarayonlarining oʻzaro bogʻliq taʼsiri natijasida yuzaga keladi. Shu sababli zamonaviy hisoblash

materialshunosligida ushbu jarayonlarni yagona ko‘p maydonli (multiphysics) tizim sifatida sonli modellash tirish muhim ilmiy yo‘nalishlardan biri hisoblanadi. Ayniqsa yuqori bosim va temperatura sharoitida ishlovchi quvur tizimlarida vodorodning metall ichiga kirib borishi materialning mo‘rtlashishiga va ekspluatatsion ishonchlilikning pasayishiga olib keladi.

Qattiq jismlarda atomlarning konsentratsiya gradienti bo‘yicha harakati Fikning birinchi va ikkinchi qonunlari asosida tavsiflanadi. Statsionar bo‘lmagan diffuziya jarayoni quyidagi tenglama bilan ifodalanadi:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

bu yerda C - vodorod konsentratsiyasi, D - diffuziya koeffitsienti hisoblanadi. Ushbu model vodorodning quvur devori bo‘ylab vaqt davomida tarqalishini baholash imkonini beradi. 1-rasmda vodorod konsentratsiyasining quvur devori bo‘ylab vaqtga bog‘liq taqsimlanishi ko‘rsatilgan bo‘lib, diffuziya jarayonining bosqichma-bosqich rivojlanishi tasvirlangan. Rasmda vaqt ortishi bilan vodorodning material ichki qatlamlariga chuqurroq kirib borishi kuzatiladi. Ayniqsa ichki yuzaga yaqin hududlarda konsentratsiyaning yuqori qiymatlari materialning vodorod mo‘rtligiga moyilligini oshiradi.



1-rasm. Vodorod konsentratsiyasining vaqt davomida quvur devori bo‘ylab taqsimlanishi (sonli yechim natijasi).

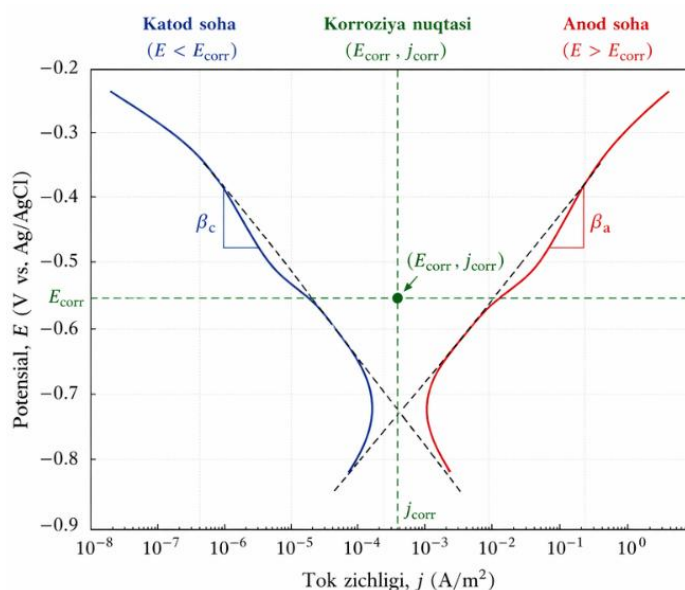
Yuqori bosimli quvurlarda mexanik kuchlanish diffuziya jarayoniga sezilarli ta’sir ko’rsatadi. Kuchlanish gradientlari mavjud bo’lganda vodorod atomlarining migratsiyasi tezlashadi va bu stress-assisted diffusion deb ataluvchi hodisani yuzaga keltiradi. Natijada yuqori kuchlanishli hududlarda vodorod to’planishi kuzatiladi va stress corrosion cracking (SCC) xavfi ortadi. Shu sababli diffuziya va kuchlanish maydonlarini o’zaro bog’langan holda modellashtirish materialning ekspluatatsion xavfsizligini baholashda muhim ahamiyatga ega.

Metallarning elektrokimyoviy yemirilish jarayonlari Butler–Volmer tenglamasi asosida tavsiflanadi:

$$i = i_0 \left[\exp \left(\frac{\alpha_a n F \eta}{RT} \right) - \exp \left(- \frac{\alpha_c n F \eta}{RT} \right) \right]$$

bu yerda i - tok zichligi, i_0 - almashinish toki, η - ortiqcha potensial.

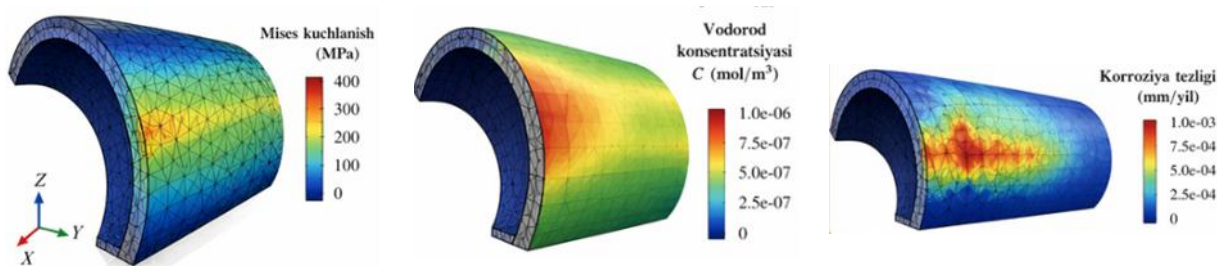
Ushbu model anod va katod reaksiyalarining kinetikasini aniqlash imkonini beradi. 2-rasmda potensial–tok zichligi orasidagi bog’lanishni ifodalovchi polarizatsiya egri chizig’i keltirilgan. Grafikda anod va katod reaksiyalarining kesishish nuqtasi korroziya nuqtasini ifodalaydi va aynan shu nuqtada korroziya toki zichligi aniqlanadi. Tok zichligining ortishi material yemirilish tezligining oshishini bildiradi. Polarizatsiya egri chiziqlari korroziyaga qarshi himoya tizimlarini loyihalash va ingibitor samaradorligini baholashda keng qo’llaniladi



2-rasm. Potensial–tok zichligi (polarizatsiya) egri chizig‘i va korroziya nuqtasi aniqlanishi.

Diffuziya, mexanik kuchlanish va korroziya jarayonlarini yagona tizim sifatida tahlil qilish uchun chekli elementlar usuli (FEM) asosida integratsiyalashgan sonli modellar qo‘llaniladi. Ushbu yondashuvda dastlab quvur devoridagi mexanik kuchlanish maydoni aniqlanadi. 3a-rasmda Mises ekvivalent kuchlanishining fazoviy taqsimlanishi ko‘rsatilgan bo‘lib, qizil va sariq zonalar yuqori kuchlanish hududlarini ifodalaydi. Aynan ushbu hududlarda diffuziya va korroziya jarayonlari intensivroq rivojlanadi.

Keyingi bosqichda vodorod diffuziyasi modeli qo‘llanilib, quvur devori bo‘ylab konsentratsiya taqsimoti aniqlanadi. 3b-rasmda vodorodning material ichidagi fazoviy taqsimoti keltirilgan bo‘lib, yuqori konsentratsiya zonalarini issiq ranglar bilan ifodalangan. Model natijalari mexanik kuchlanish ortishi vodorod migratsiyasini kuchaytirishini ko‘rsatadi. Bu esa materialning mo‘rtlashish xavfini oshiradi.



3-rasm. Chekli elementlar usuli asosida quvur devorida mexanik kuchlanish, vodorod diffuziyasi va elektrokimyoviy korroziya jarayonlarining fazoviy taqsimoti: a) Mises kuchlanish maydoni; b) vodorod konsentratsiyasi taqsimoti; c) korroziya tezligi taqsimoti.

Elektrokimyoviy korroziya modeli esa quvur devori bo‘ylab korroziya tezligining taqsimlanishini aniqlash imkonini beradi. 4.9c-rasmda korroziya tezligining fazoviy taqsimoti ko‘rsatilgan bo‘lib, yuqori kuchlanish va vodorod konsentratsiyasi mavjud hududlarda yemirilish intensivligi ortishi kuzatiladi. Shu tariqa mexanik kuchlanish, diffuziya va korroziya jarayonlari o‘zaro bog‘langan yopiq sikl hosil qiladi va material degradatsiyasining kompleks xarakterini namoyon etadi.

Olingan natijalar diffuziya va korroziya jarayonlarini sonli modellashtirish yuqori bosimli hamda temperaturali sharoitlarda ishlovchi konstruksiyalarning xizmat muddatini prognoz qilishda muhim ilmiy-amaliy vosita ekanligini ko‘rsatadi.

Integratsiyalashgan multiphysics modellar yordamida vodorod mo’rtligi, SCC va korroziy yemirilish xavfini oldindan aniqlash imkoniyati yaratiladi.

Xulosa: Mazkur tadqiqotda neft-gaz sanoatida ishlovchi konstruktsion materiallarda diffuziya va korroziya jarayonlarini sonli modellashtirishning nazariy asoslari tahlil qilindi. Tadqiqot natijalariga ko’ra, vodorod diffuziyasi, mexanik kuchlanish va elektrokimyoviy korroziya jarayonlari o’zaro uzviy bog’langan holda material degradatsiyasiga olib kelishi aniqlandi. Fik qonunlari asosida vodorodning quvur devori bo’ylab tarqalishi, Butler–Volmer modeli yordamida esa korroziya kinetikasi baholandi. Chekli elementlar usuli asosida olingan natijalar yuqori kuchlanishli hududlarda vodorod konsentratsiyasi va korroziya tezligi ortishini ko’rsatdi. Ayniqsa stress-assisted diffusion jarayoni materialning vodorod mo’rtligiga moyilligini oshirishi aniqlandi. Integratsiyalashgan multiphysics modellar yordamida quvur devoridagi mexanik kuchlanish maydoni, diffuziya va korroziya jarayonlarini kompleks baholash imkoniyati yaratildi. Tadqiqot natijalari sonli modellashtirish usullari yuqori bosimli va temperaturali sharoitlarda ishlovchi konstruktsiyalarning xizmat muddatini prognoz qilish, korroziy yemirilish xavfini oldindan aniqlash hamda sanoat xavfsizligini oshirishda muhim ilmiy-amaliy vosita ekanligini ko’rsatdi.

References

- [1] Ashby M F 2000 Multi-objective optimization in material design and selection Acta Materialia 48 359–69
- [2] Ashby M F and Ashby M F 2011 Materials Selection in Mechanical Design (Elsevier Science)
- [3] Kalidindi S R, Buzzy M, Boyce B L and Dingreville R 2022 Digital Twins for Materials Front. Mater. 9 818535
- [5] Roters F, Eisenlohr P, Hantcherli L, Tjahjanto D D, Bieler T R and Raabe D 2010 Overview of constitutive laws, kinematics, homogenization and multiscale methods in crystal plasticity finite-element modeling: Theory, experiments, applications Acta Materialia 58 1152–211