

УДК 621.643

**Л. Побережний, докт. техн. наук; А. Станецький;
Р. Мартинюк, канд. техн. наук; М. Полутренко, докт. техн. наук**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ МАТЕРІАЛУ НАФТОГАЗОПРОВОДІВ НА ПІЗНІЙ СТАДІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Резюме. Процеси постачання природного газу супроводжуються значними його втратами (у 2001 р. – 1,93 млрд. м³). У зв'язку з цим комплексна проблема мінімізації втрат і підвищення ефективності використання енергоносіїв є вельми актуальною і її розв'язання дасть змогу зекономити значні кошти, які можна буде спрямувати на забезпечення безперебійності й надійності постачання газу споживачу, підтримку належного функціонування газотранспортної системи в цілому. Особливо важливого значення набувають експериментальні роботи в цьому напрямку, виконані за новими ефективними методиками, а саме, комплексні дослідження деформівної системи «труба – ґрунтовий масив» та вивчення кінетики протікання корозійних процесів. З цією метою проведено дослідження синергічної дії корозійного і механічного чинників на зразках-моделях, вирізаних зі стінки труби. Об'єктом досліджень вибрано трубопровідну сталь 17Г1СУ, яка є на даний час однією з найпоширеніших у нафтогазовому комплексі. Для дослідження впливу експлуатаційної деградації було виготовлено партію зразків з матеріалу труби, яка пробула в експлуатації 41 рік. Встановлено закономірності зміни несучої здатності матеріалу нафтогазопроводів на пізній стадії експлуатації у підкислених хлоридних модельних середовищах. Показано, що в кислих ґрунтових електролітах деградована трубопровідна сталь має схильність до раптових деформаційних скачків, які можуть спричинити спонтанну розгерметизацію трубопроводу. Зафіксована деформаційна поведінка сталі трубопроводу потребує подальшого системного вивчення з метою підвищення рівня безпеки та забезпечення надійної експлуатації наявних нафто- та газопровідних мереж. У подальшому необхідно вивчити вплив терміну експлуатації на електрохімічні показники сталей нафтогазового сортаменту з метою оптимізації параметрів активного та пасивного протикорозійного захисту.

Ключові слова: нафтогазопроводи, пізня стадія експлуатації, несуча здатність, експлуатаційна деградація.

L. Poberezhny, G. Pryslypska, A. Stanecky, R. Martynuk, M. Polutrenko

REGULARITIES OF OIL AND GAS PIPELINE MATERIAL BEARING CAPACITY CHANGE OF THE LATE SERVICE STAGE

Summary. The process of natural gas supply is evidently accompanied with its losses. For instance, there were lost around 1.93 billion m³ in the year of 2001. Due to this fact, the complex problem of minimizing losses and improving energy efficiency is urgent and its solution will help to save a lot of money that could be spent on ensuring continuity and reliability of supply to consumers, as well as to support the proper operation of the gas transportation system. Relevant experimental works are of great importance, especially those, performed while employing new effective methods, the comprehensive studies of «pipe – soil array» deformable system and corrosion processes kinetics in particular. To do this, the corrosion and mechanical synergistic factors action has been studied on the specimens, cut from the pipe wall. The study of steel deformation behavior under loading and in the conditions, that are similar to operational, makes possible to estimate the pipeline lifetime, to predict correctly the operational risks and to estimate the level of potential environmental threats, caused by technical objects operation. It is important to study the deformation kinetics in corrosive environments, because the damage level is a result of mechanical and corrosive factors synergistic action, that increases nonlinearly and is connected with the associated operational risks. The object of study is 17G1S pipeline steel, that is currently one of the most commonly used in oil and gas industry. To study the impact of operational degradation a set of samples was machined from the pipeline, that was 41 years under operation. The laws of oil and gas bearing capacity material changes at the late stage of exploitation in acidified chloride modeling environments were obtained. It was shown that in acid electrolytes soil the degraded pipe steel has a tendency to sudden deformation jumps, that can cause spontaneous depressurization of the pipeline. The observed steel pipeline system deformation behavior needs further study to ensure existing oil and gas pipeline networks safety and reliable operation. Further, it is necessary to study the effect of lifetime on the steel oil and gas electrochemical properties in order to optimize the parameters of active and passive corrosion protection.

Key words: main pipelines, late stage of exploitation, bearing capacity, exploitation degradation.

Вступ. Паливно-енергетичний комплекс є одним з найважливіших секторів економіки країни. Найважливішу роль у ньому відіграє трубопровідний транспорт нафти та газу, без яких неможливе нормальне функціонування промисловості. Стійке функціонування та збалансований динамічний розвиток трубопровідної системи України – необхідні умови стабілізації та зростання економіки, покращення добробуту громадян. Враховуючи винятково важливу роль нашої держави як найбільшого транзитера енергоресурсів до Євросоюзу можна сказати, що стабільність і безаварійність роботи ПЕК України – це гарантія нашої енергетичної безпеки зокрема, та ЄС загалом.

За умов експлуатації трубопровідного транспорту в агресивних середовищах, внаслідок хімічних та електрохімічних взаємодій мають місце корозійні процеси, які є причиною зменшення терміну безпечної експлуатації нафто- та газопроводів. Проблема підвищення їхньої надійності та довговічності є складним комплексним завданням, що містить у собі рішення технічних, технологічних, економічних й організаційних аспектів. Незважаючи на те, що цій проблемі присвячені численні дослідження, у цей час вона ще повністю не вирішена й багато питань залишаються відкритими. Тому експериментальні дослідження, які базуються на нових ефективних методиках та дають змогу вивчати паралельний перебіг корозійних та деформаційних процесів системи „труба-грунтовий масив“ на зразках вирізаних зі стінки труби є особливо актуальними на етапі коли значна частина трубопровідного транспорту знаходиться на середній або пізній стадії експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вважається, що поведінка сталі трубопроводу в ґрунтах у багатьох відношеннях аналогічна її поведінці при повному зануренні у розчини з відповідним рН. При цьому переважає електрохімічний механізм корозії з утворенням мікрогальванічних елементів [1]. Аналіз літературних джерел показав, що більшість дослідників корозійно-механічної деградації трубопровідних сталей вивчали вплив корозійно-активного середовища на прикладі 3% розчину NaCl [2].

Дослідження деформаційної поведінки цієї сталі в умовах навантажень та впливів, які імітують експлуатаційні, дасть змогу краще оцінити залишковий ресурс безпечної експлуатації діючих та ресурс роботи нових трубопроводів, коректніше прогнозувати експлуатаційні ризики та оцінити рівень потенційних загроз доквіллю, спричинених експлуатацією даних технічних об'єктів. Важливо вивчити кінетику деформації у корозійних середовищах, оскільки рівень пошкоджень у результаті синергічної дії механічного та корозійного чинників зростає нелінійно, відповідно так само збільшуються ймовірності розгерметизації чи руйнування трубопроводу, а, отже, й пов'язані з цим експлуатаційні ризики.

Об'єктом досліджень вибрано трубопровідну сталь 17Г1СУ, яка є на даний час однією з найпоширеніших у нафтогазовому комплексі. З неї виготовляють труби широкого сортаменту як прямошовні, так і зі спіральним швом діаметром до 1420 мм, які використовувалися при прокладанні значної частини магістральних газопроводів (наприклад, Уренгой – Помари – Ужгород) та нафтопроводів (Одеса-Броди) й продовжують широко використовуватися під час ремонту і модернізації діючих та будівництва нових магістральних трубопроводів. Для дослідження впливу експлуатаційної деградації було виготовлено партію зразків з матеріалу труби, яка пробула в експлуатації 41 рік. У якості експлуатаційного середовища використовували хлоридні електроліти різної концентрації з рівнем рН від 3 до 5 (табл. 1).

Метою роботи, яка стала продовженням раніше виконаних досліджень, є вивчення впливу рН середовища та експлуатаційної деградації на деформаційну поведінку матеріалу трубопроводу в підкислених хлоридних середовищах. Актуальність роботи зумовлена тим, що в Західній Україні, де проходять основні транзитні магістральні нафтогазопроводи, поширені кислі ґрунти з хлоридними та хлоридно-сульфатними електролітами [3]. З літератури [4] відомо про особливу чутливість тривалоексплуатованих трубопровідних сталей до водневого окрихчення,

ризик виникнення якого в кислих середовищах найбільший. Тому необхідно докладно вивчити деформаційну поведінку матеріалу нафтогазопроводів на пізній стадії експлуатації в основних типах ґрунтових електролітів з метою оптимізації робочих режимів та вчасного запобігання можливим позаштатним чи навіть аварійним ситуаціям.

Методика досліджень. Механічні випробовування проводили при навантаженні чистим згином, використовуючи ступінчастий метод навантаження-розвантаження з витримкою на кожному ступені 20 с з метою поглибленого вивчення деформаційної поведінки сталі трубопроводу та відстеження процесів механічної релаксації.

Для вивчення кінетики низькотемпературної корозійної повзучості, користуючись побудованою за результатами механічних випробовувань зразків-моделей, вирізаних зі стінки труби, діаграмою згину вибрано три рівні номінальних напружень відповідно до величини границь текучості та міцності матеріалу трубопроводу $\sigma_{0,2}^*$ і $\sigma_{мц}^*$: $1,05 \sigma_{0,2}^*$, $1,35 \sigma_{0,2}^*$ та $1,65 \sigma_{0,2}^* = 0,95 \sigma_{мц}^*$, які відповідають штатним, підвищеним штатним та позаштатним режимам роботи трубопроводу відповідно та становлять 330, 420 та 510 МПа.

Для коректного виявлення впливу корозійного середовища на деформаційну поведінку сталі трубопроводу повзучість вивчали спочатку на повітрі (імітуючи роботу трубопроводу з непошкодженим ізоляційним покриттям) (рис. 1), а потім – у 3 модельних середовищах (табл. 1) (рис. 2 – рис. 4). Час експозиції складав 300000 хв. У процесі експерименту вивчали кінетику деформації на повітрі та в модельних середовищах.

Таблиця 1

Склад модельних середовищ

№ МС	Концентрація, моль/л	
	NaCl	HCl
1	0,01	0,00001
2	0,05	0,0001
3	0,1	0,001

Результати та їх аналіз. На повітрі спостерігаємо зростаючу кінетику (рис. 1) зі зниканням на останній стадії та виходом на плато як для матеріалу в стані поставки, так і для експлуатованого. Зміна деформації повзучості знаходиться в межах 15...20%. Такі тенденції не становлять небезпеки, з чого можна зробити висновок, що несуча здатність трубопроводу, який у процесі 40 років експлуатації не піддавався дії корозивного середовища, зміниться незначно. Однак на практиці, беручи до уваги недосконалість протикорозійних покриттів, які використовувалися при будівництві магістральних трубопроводів наприкінці 60-х та в 70-х роках минулого століття, така ситуація є скоріше гіпотетичною. Випробування на повітрі мало на меті стати головним чином відправною точкою для виокремлення впливу корозивного середовища на несучу здатність сталі трубопроводу на пізній стадії експлуатації.

Зі збільшенням величини номінальних напружень інтенсивність процесу зростає. При найвищому, близькому до границі міцності навантаженні, спостерігаємо на кривій повзучості уступи. Причому характерно, що для деградованого матеріалу вони різкіші й починають з'являтися при нижчих рівнях напружень (помітні уже при 420 МПа). Очевидно, така деформаційна поведінка може бути спричинена поширенням мікротріщин, що й зумовлює стрибкоподібне зростання деформації. Оскільки в деградованій сталі значно більша кількість накопичених пошкоджень, у тому числі й мікротріщин у зародковому стані, то для їх зрушення потрібен нижчий рівень номінальних напружень. Така деформаційна поведінка підтверджується раніше проведеними в ІФНТУНГ дослідженнями.

При переході до середнього рівня напружень спостерігаємо практично монотонну зростаючу кінетику, а з наближенням до границі плинності – майже лінійну. Порівнюючи характер еволюції процесу, можемо відзначити, що найшвидше вона досягає завершальної стадії при 510 МПа, найдовше – при 330 МПа. Найрівномірнішою кінетикою характеризується повзучість при $1,35\sigma_{0,2}^*$ (420 МПа). Водночас тут спостерігаємо найдовшу активну еволюцію несучої здатності – 75% часу фіксуємо досить активне зростання деформації.

За кутом нахилу завершальної ділянки кривої повзучості можемо вивчити швидкість затухання процесу. Даний параметр може бути використаний у якості додаткового критерію оцінювання та прогнозування розвитку повзучості й корозійної повзучості, з його збільшенням ризик втрати несучої здатності в результаті негативної синергічної дії механічних напружень та корозійного середовища зростає, і навпаки, з його зменшенням – спадає. Для всіх модельних середовищ спостерігається збільшення кута нахилу завершальної ділянки кривої корозійної повзучості, що свідчить про більшу небезпеку втрати несучої здатності попередньо експлуатованою трубною сталлю [5].

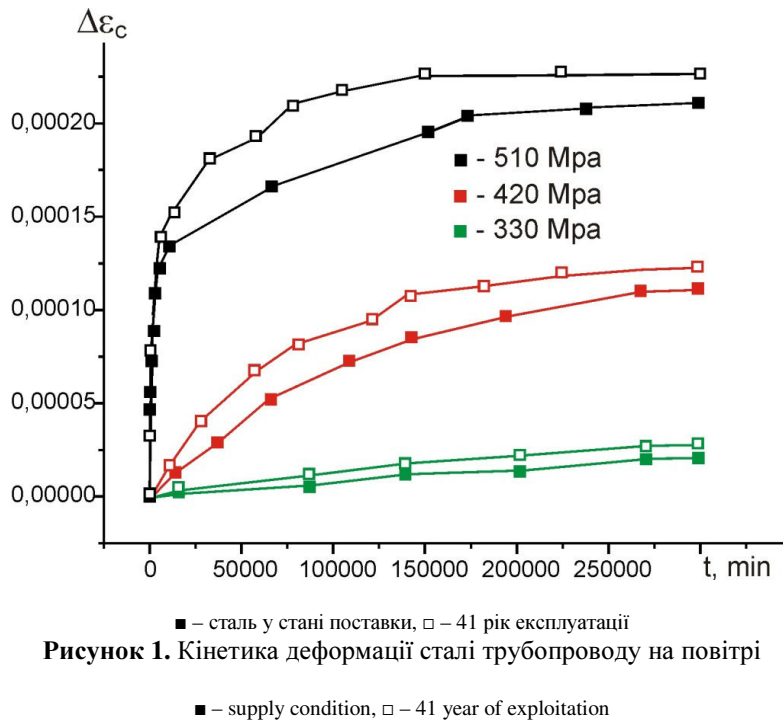


Рисунок 1. Кінетика деформації сталі трубопроводу на повітрі

Figure 1. Kinetics of deformation of steel pipe in the air

У підкислених хлоридних середовищах (рис. 2 – рис. 4) спостерігаємо кінетику повзучості, подібну до такої у нейтральних аналогах [5]. Зокрема, зі збільшенням концентрації кислоти при високому рівні номінальних напружень з'являються стрибкоподібні прирости деформації, пов'язані, очевидно зі зміною механізму перебігу корозійних процесів. Такий перехід зумовлює збільшення частки водневої деполаризації та супроводжується виділенням атомарного водню у місцях утворення гальванічних пар. Останній спричиняє перебіг процесу наводнення та розвиток водневої крихкості, що, в свою чергу викликає корозійне розтріскування, яке й ілюструють скачки деформації на кінетичній кривій.

В МС1, значення рН в якому дорівнює 5, спостерігаємо приріст деформації, який відповідає втраті несучої здатності від 5 до 15 відсотків (рис. 2), залежно від рівня номінальних напружень. Фіксуємо також збільшення кута нахилу завершальної ділянки кривої, що вказує на небезпеку подальшої втрати матеріалом опору тривалим деформаціям. Помітних деформаційних скачків не фіксується, ризик аварійної

розгерметизації незначний, що пов'язано із превалюючим механізмом кисневої деполіаризації і незначним водневим окрихченням.

При подальшому зменшенні рН до 4 (МС2) фіксуємо істотні деформаційні флуктуації (рис. 3). Особливо помітні вони в області високих напружень, що пояснюється впливом механічного чинника на фоні водневого окрихчення. Виразно спостерігаються цикли прискорення-сповільнення деформації, які відповідають циклам росту тріщини. Найінтенсивніші вони на першому етапі експозиції, далі швидкість приросту деформації спадає. Це пов'язано з притупленням вершин корозійних тріщин унаслідок збільшення швидкості розчинення матеріалу трубопроводу та відповідним зменшенням рівня концентрації напружень у їх вершинах. Зменшення несучої здатності становить 7–18%, проте є ризик раптової розгерметизації внаслідок розтріскування, зумовленого водневим окрихченням.

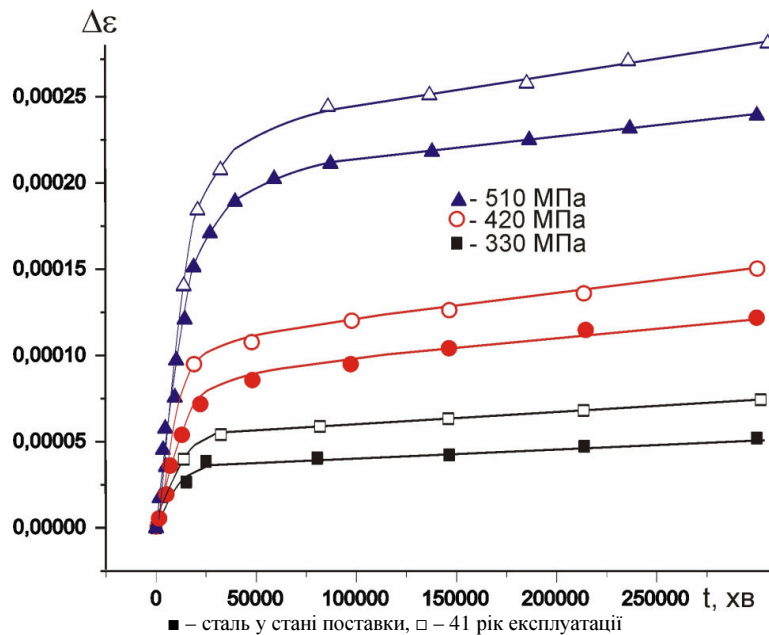


Рисунок 2. Кінетика деформації сталі трубопроводу в МС1

■ – supply condition, □ – 41 year of exploitation

Figure 2. Kinetics of deformation of steel pipe in the model environment 1

Деформаційна поведінка деградованої сталі у МС3 при рН 3 є більш прогнозованою. Деформаційні стрибки фіксуються, проте вони значно плавніші, ніж в МС2. Це зумовлено значною хімічною активністю середовища, яка призводить до швидкого притуплення вершини тріщини. Проте тут фіксуємо найбільший абсолютний приріст деформації, який складає 9–24%.

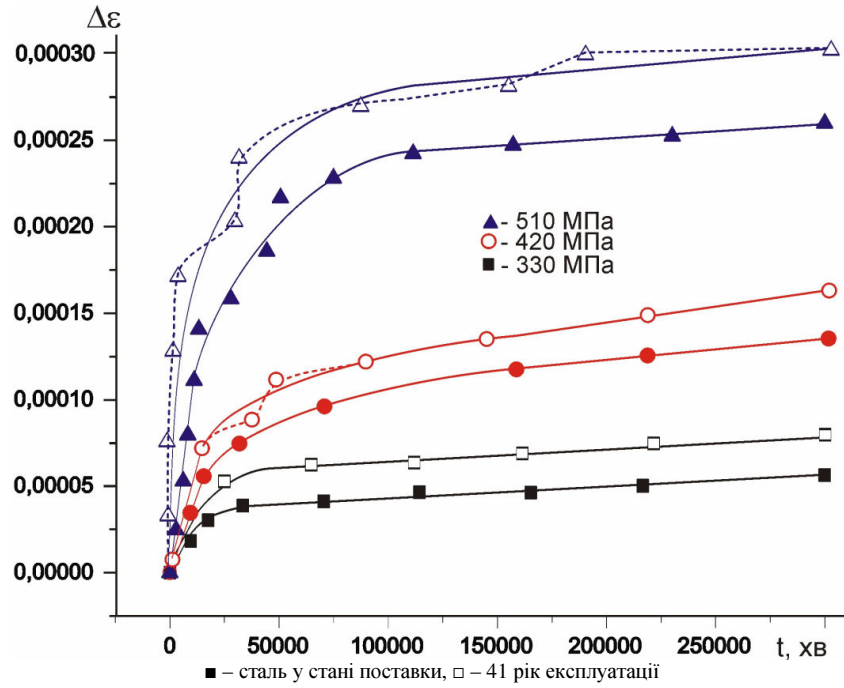


Рисунок 3. Кінетика деформації сталі трубопроводу в МС2

■ – сталь у стані поставки, □ – 41 рік експлуатації

Figure 3. Kinetics of deformation of steel pipe in the model environment 2

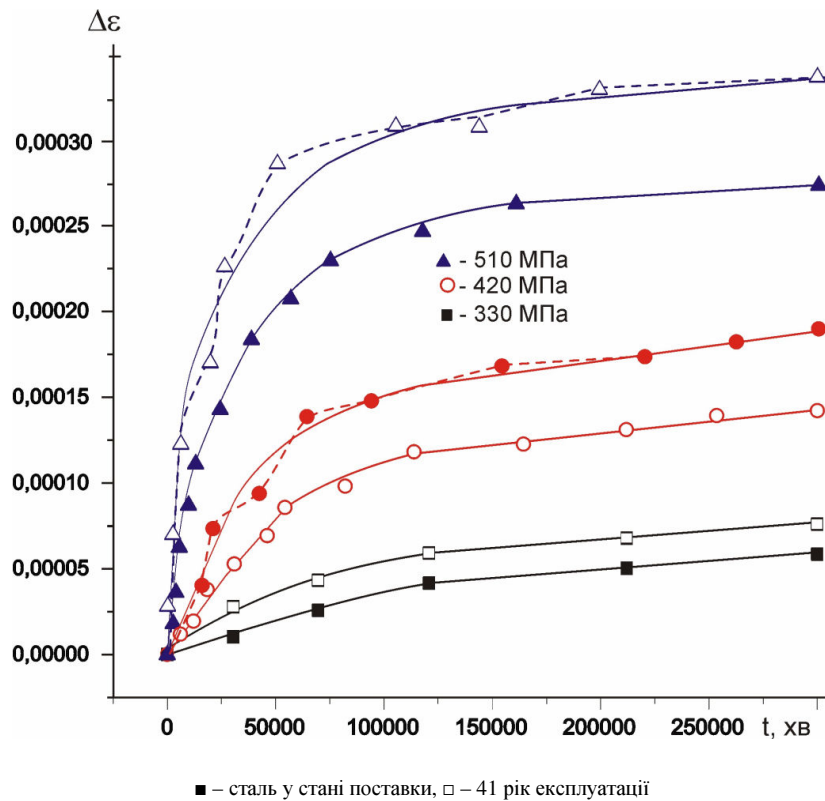


Рисунок 4. Кінетика деформації сталі трубопроводу в МС3

■ – сталь у стані поставки, □ – 41 рік експлуатації

Figure 4. Kinetics of deformation of steel pipe in the model environment 3

Такі результати вказують на значні ризики розгерметизації внаслідок швидкого розчинення металу в зонах пошкодження ізоляційного покриття. Якщо при цьому ураховувати можливість виникнення макрогальванічних елементів вздовж траси

трубопроводу та вплив змінного й наведеного струмів, то ситуація стає загрозливою. Необхідні збільшення кількості моніторингових заходів і оптимізація режимів експлуатації, що дасть змогу ефективно використовувати наявні трубопроводи та підвищити надійність їх експлуатації.

В подальшому необхідно розширити діапазон досліджуваних ґрунтових електролітів, зокрема вивчити поведінку деградованих трубопровідних сталей у хлоридно-сульфатних середовищах та вивчити рівень їх чутливості до біокорозії. Також провести дослідження з метою оптимізації параметрів активного протикорозійного захисту нафтогазопроводів на пізній стадії експлуатації з метою підвищення надійності їх експлуатації, продовження ресурсу роботи та запобігання позаштатним ситуаціям.

Висновки. Встановлено закономірності зміни несучої здатності матеріалу нафтогазопроводів на пізній стадії експлуатації у підкислених хлоридних модельних середовищах. Показано, що в кислих ґрунтових електролітах деградована трубопровідна сталь має схильність до раптових деформаційних скачків, які можуть спричинити спонтанну розгерметизацію трубопроводу. Зафіксована деформаційна поведінка сталі трубопроводу потребує подальшого системного вивчення з метою підвищення рівня безпеки та забезпечення надійної експлуатації наявних нафто- та газопровідних мереж. Необхідно вивчити вплив терміну експлуатації на електрохімічні показники сталей нафтогазового сортаменту з метою оптимізації параметрів активного та пасивного протикорозійного захисту.

Conclusions. The regularities of changes in oil and gas bearing capacity of the material at a late stage of operation in acidified chloride modeling environments were determined. It is testified that in the acid electrolytes degraded soil pipe steel has a tendency to sudden deformation jumps, that can cause spontaneous depressurization of the pipeline. Observed deformation behavior of steel pipeline system needs further study to enhance safety and reliable operation of existing oil and gas pipeline networks. It is necessary to examine the impact of use on the electrochemical performance steel grades of oil and gas in order to optimize the parameters of active and passive corrosion protection.

Список використаної літератури

- 1.Петров, Л.М. Фізико-хімічні аспекти механіки корозійного руйнування [Текст] / Л.М. Петров // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2001. – № 3. – С. 127 – 129.
- 2.Nykyforchyn, H.M. Assessment of hightemperature hydrogen degradation of power equipment steels / H. M.Nykyforchyn, O. Z.Student // 16th European Conference of Fracture “ECF16”, Alexandroupolis,Greece, 2006. – Paper No. 749
- 3.Крижанівський, Є.І. Особливості стрес-корозії сталі магістральних трубопроводів в кислих електролітах [Текст] / Є.І. Крижанівський, Л.Я. Побережний // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004. – № 4 (13). – С. 69 – 72.
- 4.Експлуатаційне окрихнення сталі магістрального нафтопроводу [Текст] / О.Т. Цирульник, Г.М. Никифорчин, О.І. Звірко, Д.Ю. Петрина // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – №4. – С. 5 – 16. – 2004. – № 2. – С. 125 – 126.
- 5.Побережний, Л.Я. Вплив експлуатаційної деградації на несучу здатність матеріалу магістральних трубопроводів [Текст] / Л.Я. Побережний, П.О. Марущак, А.І. Станецький // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – Т. 2, №9. – С. 642 – 646.

Отримано 30.08.2013