ISSN 2071-1859 (Print), ISSN 2521-6635 (Online)
УДК 622.692.4 https://doi.org/10.33271/crpnmu/86.115

© В.О. Расцвєтаєв[1], О.А. Пащенко[1], В.В. Яворська[1], Д.О. Яшин[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ВІДКЛАДЕНЬ У МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДАХ

V. Rastsvietaiev[1], https://orcid.org/0000-0003-3120-4623
O. Pashchenko[1], https://orcid.org/0000-0003-3296-996X
V. Yavorska[1], https://orcid.org/0000-0002-1639-6818
D. Yashyn[1] https://orcid.org/0009-0005-4960-5187
[1] Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

THEORETICAL AND APPLIED ASPECTS OF FORMING A DEPOSIT CONTROL SYSTEM IN TRUNK PIPELINES

Мета. Розробити теоретичні засади та структуру інтегрованої системи контролю відкладень у магістральних трубопроводах, що поєднує прогнозування, моніторинг, запобігання та видалення органічних і неорганічних відкладень для забезпечення гідравлічної та термічної ефективності трубопроводу.

Методика. Застосовано системний аналіз науково-технічних джерел. Запропоновано концептуальну модель, що включає діагностичну, прогностичну, превентивну та реагувальну підсистеми. Діагностична підсистема забезпечує моніторинг параметрів потоку та стану внутрішньої поверхні, прогностична – моделювання росту відкладень, превентивна – хімічне інгібування й термогідравлічне регулювання, реагувальна – очищення та аварійні заходи.

Результати. Сформульовано принципи системи: безперервність, адаптивність, багаторівневість, пріоритет профілактики та енергоефективність. Розроблено структурну схему, що охоплює збір даних про температуру, тиск, витрату та диференційний тиск, 1D термогідравлічне моделювання з підмоделлю росту відкладень, прийняття рішень за порогами спрацьовування та економічним оптимумом, а також дозування інгібітора, запуск скребка й зміну режиму перекачування. Очікується зменшення аварійних зупинок на 40–70 %, витрат на очищення на 20–35 % та збільшення міжремонтного періоду в 1,5–2 рази. Розглянуто ділянку нафтопроводу довжиною 200 км із вмістом парафінів 18 %.

Наукова новизна. Вперше запропоновано цілісну концепцію контролю відкладень, що інтегрує зворотний зв’язок, предиктивне управління та ризик-орієнтоване планування з технологіями вбудованого моніторингу, інтелектуального очищення й автоматизованого дозування. Запропоновано критерій економічної доцільності втручання з урахуванням вартості очищення, втрат пропускної здатності та енергоспоживання.

Практична значимість. Система придатна для трубопроводів різного діаметра, протяжності та типу нафти, забезпечує автоматизацію рішень щодо очищення, оптимізацію витрати реагентів і зниження ризику аварій. Очікуваний економічний ефект становить 15–30 % річних експлуатаційних витрат.

Ключові слова: *магістральний трубопровід, контроль відкладень, моніторинг, прогнозування, інгібування, очищення скребками, управління потоком, парафінові відкладення.*

Вступ. Проблема утворення відкладень у магістральних трубопроводах, як уже зазначалося в попередніх публікаціях, має яскраво виражений комплексний характер і не може бути вирішена окремими, не пов'язаними між собою заходами [1, 2]. Складність полягає в тому, що відкладення бувають різної природи (парафінові, асфальтенові, неорганічні солі, продукти корозії, газові гідрати), вони взаємодіють між собою, утворюючи змішані шари, а їхня динаміка залежить від багатьох факторів: температури потоку та стінки, швидкості та режиму течії, складу нафти (вміст парафінів, асфальтенів, смол, води), історії експлуатації (наявність залишкових відкладень після очищення), а також від сезонних коливань температури навколишнього середовища [3, 4].

Традиційний підхід, який десятиліттями застосовувався в трубопровідній індустрії, полягає в періодичному пропусканні механічних скребків (наприклад, раз на 30–60 діб) або постійному дозуванні хімічних інгібіторів – депресорів парафіну, диспергаторів асфальтенів, антискалантів для солей [5, 6]. Однак такий підхід часто є або надмірно витратним, якщо заходи застосовуються частіше, ніж реально потрібно (наприклад, скребкування кожні 30 діб, тоді як критична товщина досягається лише через 90 діб), або недостатньо ефективним, якщо частота вибрана емпірично і не відповідає реальній динаміці росту відкладень (наприклад, при несподіваному зростанні парафінистості через зміну свердловин, що живлять трубопровід) [7, 8]. У багатьох випадках ці заходи здійснюються ізольовано одне від одного – служба моніторингу фіксує зростання перепаду тиску, але не передає дані в групу прогнозування; група прогнозування користується застарілими моделями; експлуатаційний персонал приймає рішення на основі інструкцій, написаних роками тому [9, 10].

У результаті рішення про очищення приймаються не на основі актуального стану трубопроводу та прогнозу його зміни, а на основі минулого досвіду або нормативних вимог, що часто призводить до зайвих витрат [11, 12]. Більш небезпечним є те, що іноді відкладення досягають критичної товщини несподівано швидко – наприклад, через аварійне зупинення насосів, що викликало охолодження і масову кристалізацію парафінів [13, 14]. У таких випадках трубопровід може бути повністю заблокований, що вимагає дорогих і тривалих аварійних робіт (вирізання ділянок, пропарювання, застосування хімічних розчинників) [15, 16].

У світовій практиці відомі випадки (наприклад, на одному з родовищ Північного моря), коли повторювані блокування призвели до передчасного закриття свердловин із збитками близько 100 млн дол [17, 18]. Усвідомлення цих недоліків призвело до необхідності створення інтегрованих систем контролю відкладень (ICMS – Integrated Deposit Control Systems), які поєднують засоби діагностики (датчики, інтелектуальні скребки), математичного моделювання (прогнозування росту), системи підтримки прийняття рішень (економічний оптимум) та виконавчі механізми (автоматичне дозування інгібіторів, запуск скребків, регулювання насосів) в єдиному циклі зі зворотним зв'язком [19, 20]. Саме теоретичне обґрунтування такої системи, її структурна побудова та практичні рекомендації щодо реалізації є предметом даної статті.

Аналіз попередніх досліджень. Питання створення систем контролю відкладень розглядалося в низці робіт, присвячених ширшій проблемі забезпечення потоковості (flow assurance) – комплексу заходів, що гарантують стабільне транспортування вуглеводнів від свердловини до споживача. У класичних монографіях з flow assurance, таких як праці [21, 22], основна увага приділялася фізико-хімічним механізмам утворення парафінових, асфальтенових, гідратних та сольових відкладень, а також методам їх запобігання: термостабілізації (підтримання температури вище температури появи воску за допомогою теплової ізоляції або підігріву), хімічному інгібуванню (депресори, диспергатори, антиагломератори) та депресорним присадкам, що знижують в'язкість. Хоча ці роботи стали фундаментальними для розуміння природи відкладень, вони не містили системного погляду на управління всім комплексом заходів – тобто не розглядали, як поєднати моніторинг, моделювання та автоматизоване прийняття рішень [23, 24]. У них переважно описувалися окремі технології, а не інтегрована система.

Подальший розвиток був пов'язаний з появою «інтелектуального очищення» (intelligent pigging). У роботах [25, 26] детально описані скребки, оснащені датчиками магнітної дефектоскопії, ультразвуковими вимірювачами товщини стінки та акселерометрами, що дозволяють з високою точністю (до 0,1 мм) визначати профіль внутрішньої поверхні труби, виявляти корозію, тріщини та, що найважливіше для нашої теми, вимірювати товщину та структуру відкладень. Це стало важливим кроком до створення замкненого контуру контролю, оскільки з'явилася можливість отримувати точні фактичні дані про стан трубопроводу, а не покладатися лише на непрямі ознаки (перепад тиску, зміна температури). Однак інтелектуальні скребки зазвичай запускаються за планом (наприклад, раз на рік) через їх високу вартість та необхідність зупинки або зниження продуктивності. Вони не призначені для безперервного моніторингу [27, 28].

Паралельно розвивалися методи математичного моделювання росту відкладень. Дифузійна модель [29] та її модифікації дозволяють на основі закону Фіка та рівнянь теплопереносу прогнозувати товщину парафінового шару в часі та вздовж трубопроводу. Пізніше з'явилися гібридні моделі, наприклад, робота [30], де нейронна мережа навчається на даних CFD-симуляцій, забезпечуючи високу точність при невеликих витратах часу на прогноз. Однак у більшості цих досліджень моделювання та моніторинг розглядалися окремо: модель використовувала усереднені вхідні дані і не оновлювалася в реальному часі за результатами вимірювань, а моніторинг слугував лише для констатації факту, а не для зворотного зв'язку [31, 32].

Лише в останні роки почали з'являтися концепції «цифрових двійників» трубопроводів (digital twins for pipelines), які передбачають постійне оновлення моделі реальними даними з датчиків та інтелектуальних скребків, а також автоматичне формування рекомендацій щодо інтервенцій – дозування інгібіторів, зміни режиму перекачування, очищення. Серед таких робіт можна виділити публікації [33, 34]. Однак існуючі рішення, як правило, є пропрієтарними (власницькими) розробками великих нафтогазових компаній або консалтингових фірм (наприклад, Siemens, Emerson, Baker Hughes), і вони не містять відкритих теоретичних засад,

що унеможливлює їх критичний аналіз та адаптацію для наукових досліджень [35, 36]. Таким чином, наявний рівень знань характеризується накопиченням значних масивів даних, окремих технологій (датчики, моделі, скребки), але відсутністю узагальненої, відкритої теоретичної бази для побудови інтегрованих систем контролю відкладень, а також практичних рекомендацій, придатних для широкого впровадження на трубопроводах різного типу та призначення.

Незважаючи на значний прогрес у галузі моніторингу (поява високоточних датчиків та інтелектуальних скребків) та моделювання (дифузійні, гібридні та нейромережеві моделі росту відкладень), досі не сформульовано загальних принципів побудови інтегрованої системи контролю, яка б поєднувала всі необхідні підсистеми – діагностичну, прогностичну, превентивну та реагувальну – в єдиному адаптивному циклі зі зворотним зв’язком [37, 38]. Конкретно не визначено, які саме канали зворотного зв’язку мають бути задіяні: чи достатньо використовувати лише диференційний тиск для непрямої оцінки товщини, чи потрібні періодичні вимірювання інтелектуальним скребком для калібрування моделі; як часто повинна оновлюватися інформація (щодня, щотижня, щомісяця), щоб система встигала реагувати на зміни, але не створювала надмірного навантаження на канали зв’язку та обчислювальні ресурси. Також не розроблено методику врахування економічного фактору при виборі моменту втручання – тобто як знайти компроміс між витратами на очищення (вартість роботи скребка, втрати продуктивності під час очищення, вартість утилізації відкладень) та втратами від зниження пропускної здатності через ростучий шар (збільшення енергоспоживання, недопостачання нафти споживачам). У більшості досліджень цей компроміс ігнорується, і очищення призначається за досягнення деякого фіксованого порогу товщини (наприклад, 5 мм) без урахування того, чи є це економічно вигідним.

Крім того, відсутні критерії оцінки ефективності таких систем (наприклад, зменшення частоти аварійних зупинок, відсоток економії хімікатів, подовження міжремонтного періоду) та методики їх впровадження на різних типах трубопроводів – з різним діаметром (від 300 до 1200 мм), протяжністю (від 50 до 1000 км), термобаричними умовами (температура ґрунту від –20 до +30 °C, тиск до 10 МПа), фізико-хімічними властивостями нафти (від легких малов’язких до важких високопарафінистих або високосмолистих). Те, що добре працює на короткому ділянці з однорідним складом нафти, може виявитися неефективним на довгому трубопроводі зі змінними властивостями. Також не визначено, яким чином система повинна адаптуватися до поступових змін (наприклад, збільшення обводненості нафти з часом) або раптових збурень (зупинка насосів, зміна сорту нафти).

Незважаючи на наявність окремих технологічних рішень, відсутня цілісна, теоретично обґрунтована та практично орієнтована концепція інтегрованої системи контролю відкладень. Тому метою даної роботи є розробка теоретичних засад та практичної архітектури такої системи для магістральних трубопроводів, яка базується на поєднанні принципів предиктивного управління, адаптивного моделювання та економічної оптимізації. Крім того, ставиться завдання кількісно оцінити потенційну ефективність системи на основі чисельного моделювання для репрезентативних умов, а також запропонувати рекомендації щодо етапності впро-

вадження – від режиму «радника» до повністю автоматичного управління. Очікується, що результати роботи сприятимуть підвищенню надійності та економічності трубопровідного транспорту вуглеводнів.

Основна частина. Будь-яка система контролю, незалежно від об'єкта, має базуватися на кількох фундаментальних принципах, які в даній роботі адаптовано до задачі управління відкладеннями у магістральному трубопроводі [39, 40]. Перший принцип – безперервність спостереження: стан трубопроводу повинен відстежуватися в реальному часі або з частотою, що значно перевищує характерний час зміни відкладень (який становить від кількох діб до кількох місяців) [41, 42]. Для цього використовуються вбудовані датчики тиску *p(z, t)*, температури *T(z, t)* та витрати *Q(t)*, а також спеціалізовані вимірювачі диференційного тиску Δp_{ref} на реперних ділянках (відрізках труби фіксованої довжини L_{ref}, зазвичай 10–30 м). Зміна диференційного тиску пов'язана зі збільшенням шорсткості або зменшенням ефективного діаметра через відкладення [43]. Якщо позначити товщину шару відкладень як *δ(z, t)*, то ефективний діаметр становить $D_{eff} = D_0 - 2\delta$, а перепад тиску на реперній ділянці за відсутності відкладень описується формулою Дарсі – Вейсбаха:

$$\Delta p_{ref}^{0} = \lambda_0 \frac{L_{ref}}{D_0} \frac{\rho v^2}{2}, \tag{1}$$

де λ_0 – коефіцієнт гідравлічного тертя для чистої труби, ρ – густина нафти, v – середня швидкість потоку. При наявності відкладень товщиною δ фактичний перепад тиску зростає, і за умови, що швидкість v підтримується сталою, відношення $\dfrac{\Delta p_{ref}}{\Delta p_{ref}^{0}}$ дозволяє оцінити δ за допомогою оберненої задачі.

Другий принцип – наявність прогностичної моделі, яка на основі поточних параметрів (температура потоку та стінки, швидкість, в'язкість, склад нафти, історія очищень) передбачає динаміку росту відкладень на найближчий період (від тижня до року). У даній роботі використовується модифікована дифузійна модель, що описує накопичення парафінових відкладень. Швидкість зміни товщини шару визначається балансом дифузійного потоку молекул до стінки та змиву під дією напруження зсуву:

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = \frac{1}{\rho_d (1-\phi)} \left(D_{wo} \left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{r=R_0-\delta} - k_{er} \max(0, \tau_w - \tau_{cr}) \right), \tag{2}$$

де ρ_d – густина відкладень, ϕ – частка залишкової нафти в порах, D_{wo} – коефіцієнт молекулярної дифузії (температурно-залежний за законом Ар-

реніуса: $D_{wo} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)$, k_{er} – коефіцієнт ерозії C – концентрація парафінів, $\tau_w = \frac{f\rho v^2}{8}$ – напруження зсуву на стінці, τ_{cr} – критичне напруження для початку змиву.

Радіальний градієнт концентрації наближено визначається як:

$$\left.\frac{\partial C}{\partial r}\right|_{r=R_0-\delta} \approx \frac{C_{bulk} - C_{sat}(T_{wall})}{\delta_c}, \tag{3}$$

де C_{bulk} – концентрація парафінів в ядрі потоку, $C_{sat}(T_{wall})$ – концентрація насичення при температурі стінки (визначається з кривої WAT), δ_c – товщина концентраційного приграничного шару, яка для турбулентного режиму оцінюється через дифузійний критерій Шервуда.

Третій принцип – адаптивність: параметри моделі (зокрема, D_0, E_a, τ_{cr}, k_{er}) повинні періодично оновлюватися за даними зворотного зв'язку. Для цього використовується процедура калібрування, що мінімізує нев'язку між прогнозованою товщиною $\delta_{\text{mod}}(t)$ та виміряною $\delta_{meas}(t)$ (наприклад, за результатами пропускання інтелектуального скребка). Задача калібрування зводиться до мінімізації квадратичного функціоналу:

$$J(P) = \sum_{i=1}^{N} \left(\delta_{\text{mod}}(t_i, P) - \delta_{meas}(t_i)\right)^2 + \lambda \left\| P - P_0 \right\|^2, \tag{4}$$

де P – вектор параметрів, λ – параметр регуляризації.

Четвертий принцип – пріоритет профілактики перед реагуванням: система має намагатися запобігти досягненню відкладеннями небезпечної товщини шляхом своєчасного застосування інгібіторів або регулювання режиму, а не чекати критичного звуження. Для цього в модель вбудовано блок оцінки ефективності хімічного інгібування, яке знижує коефіцієнт дифузії (шляхом зміни морфології кристалів) або збільшує критичне напруження зсуву τ_{cr}. Вплив інгібітору моделюється через фактор зниження β_{inh}:

$$D_{wo}^{eff} = D_{wo} \cdot (1 - \beta_{inh}) = D_{wo} \cdot \left(1 - \beta_{\max} \frac{C_{inh}}{C_{inh} + K_{inh}}\right), \tag{5}$$

де C_{inh} – концентрація інгібітору, K_{inh} – константа напівнасичення.

П'ятий принцип – економічна оптимізація: момент і вид втручання обирається з мінімізації сумарних витрат F за розрахунковий горизонт $t \in [0, T]$. Цільовий функціонал має вигляд:

$$F = \int_0^T \left(c_{energy} \cdot \Delta E(\delta(t)) + c_{loss} \cdot q_{loss}(\delta(t)) \right) dt + \sum_{k=1}^{M} \left(c_{pig} + c_{chem} \cdot d_k \right), \qquad (6)$$

де $\Delta E(\delta)$ – додаткове енергоспоживання через підвищення гідравлічного опору (пропорційне $\lambda(\delta) - \lambda_0$), q_{lost} – втрати пропускної здатності (якщо продуктивність падає нижче контрактного рівня), c_{energy} та c_{loss} – вартісні коефіцієнти, c_{pig} – вартість одного пропускання скребка (включаючи зупинку або зниження продуктивності), c_{chem} – вартість хімічного реагенту на добу дозування, d_k – тривалість дозування при *k*-му втручанні.

Задача зводиться до пошуку оптимальної стратегії δ_{target} та моментів втручань t_k, що мінімізують *F*.

Запропонована система складається з чотирьох основних блоків, які працюють у замкненому циклі з періодом оновлення $\Delta t_{cycle} = 1$ доба. Блок збору та обробки даних отримує інформацію від датчиків тиску та температури на кожній насосній станції або проміжному пункті, а також від вимірювачів диференційного тиску на контрольних ділянках (реперних відрізках довжиною 10–30 м, розташованих кожні 20–30 км). Додатковими джерелами є дані про склад нафти (SARA-аналіз, WAT, вміст води), що оновлюються щомісяця, результати пропускання інтелектуальних скребків (товщина відкладень, профіль труби, які дають абсолютне калібрування), а також параметри навколишнього середовища (температура ґрунту, швидкість вітру для надземних ділянок). Усі дані після фільтрації низьких частот (зріз 0,01 Гц) та синхронізації за часом надходять до блоку моделювання, де працює одновимірна квазістаціонарна гідравлічна та теплова модель трубопроводу, інтегрована з моделлю росту відкладень. Моделювання виконується на сітці з кроком $\Delta z = 1$ км, інтегрування за часом – методом Рунге-Кутти 4-го порядку з кроком 1 доба. Блок прийняття рішень на основі прогнозованого профілю відкладень $\delta(z,t)$ на наступні 30, 60, 90 діб розраховує очікуване зростання гідравлічного опору, зменшення пропускної здатності та збільшення споживання електроенергії. Він порівнює економічні показники різних варіантів втручання, використовуючи оптимізаційний алгоритм (метод динамічного програмування або генетичний алгоритм) для знаходження мінімуму функціоналу *F*. Блок виконання передає команди автоматизованим системам: регулює роботу насосних агрегатів (зміна частоти обертання), керує станцією дозування інгібітора (задає концентрацію C_{inh} і тривалість), ініціює запуск скребка (через оператора або автоматичну станцію запуску). У разі перевищення аварійного порогу товщини $\delta > \delta_{\max}^{alarm}$ (наприклад, 15 мм) система формує сигнал негайної зупинки та аварійного очищення.

Для кількісної оцінки роботи запропонованої системи було проведено чисельне моделювання для гіпотетичної, але репрезентативної ділянки магістрального нафтопроводу з параметрами, наведеними в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння ефективності різних стратегій контролю відкладень (моделювання на 200 км ділянці)

Стратегія контролю	Частота очищення, діб	Середня товщина відкладень, мм	Річні витрати, тис. ум. од.	Скорочення витрат порівняно з неконтрольованим режимом, %
Без контролю	–	12,0 (макс. 14)	310 (втрати від зниження пропускної здатності)	0
Фіксоване скребкування кожні 30 діб	30	2,8	180	42
Адаптивне скребкування (модель)	60	5,2	110	65
Адаптивне скребкування + періодичне інгібування	90	3,6	95	69

Без будь-якого контролю товщина парафінових відкладень через 180 діб досягає 14 мм, що призводить до зменшення пропускної здатності на 23 % при сталому перепаді тиску. Із застосуванням традиційного підходу (фіксований графік запуску скребків кожні 30 діб) максимальна товщина ніколи не перевищує 5 мм, однак витрати на очищення (скребкування) становлять 180 тис. умовних одиниць на рік. Із застосуванням запропонованої адаптивної системи контролю, яка використовує модель росту для оптимізації моментів очищення, частота скребкування зменшується вдвічі (кожні 60 діб), товщина коливається в діапазоні 4–8 мм, а річні витрати знижуються до 110 тис. ум. од. (зменшення на 39 %). Якщо додатково використовувати хімічне інгібування в періоди між скребками (дозування 200 ppm депресора протягом 10 діб після скребка), максимальна товщина знижується до 3–5 мм, а частота скребкування – до одного разу на 90 діб, що дає додаткову економію, однак потребує аналізу вартості реагенту. Результати порівняння стратегій зведено в Таблицю 1.

На рис. 1 представлено профіль товщини відкладень вздовж трубопроводу через 180 діб для неконтрольованого режиму, де чітко видно максимум на відстані 40–60 км від входу.

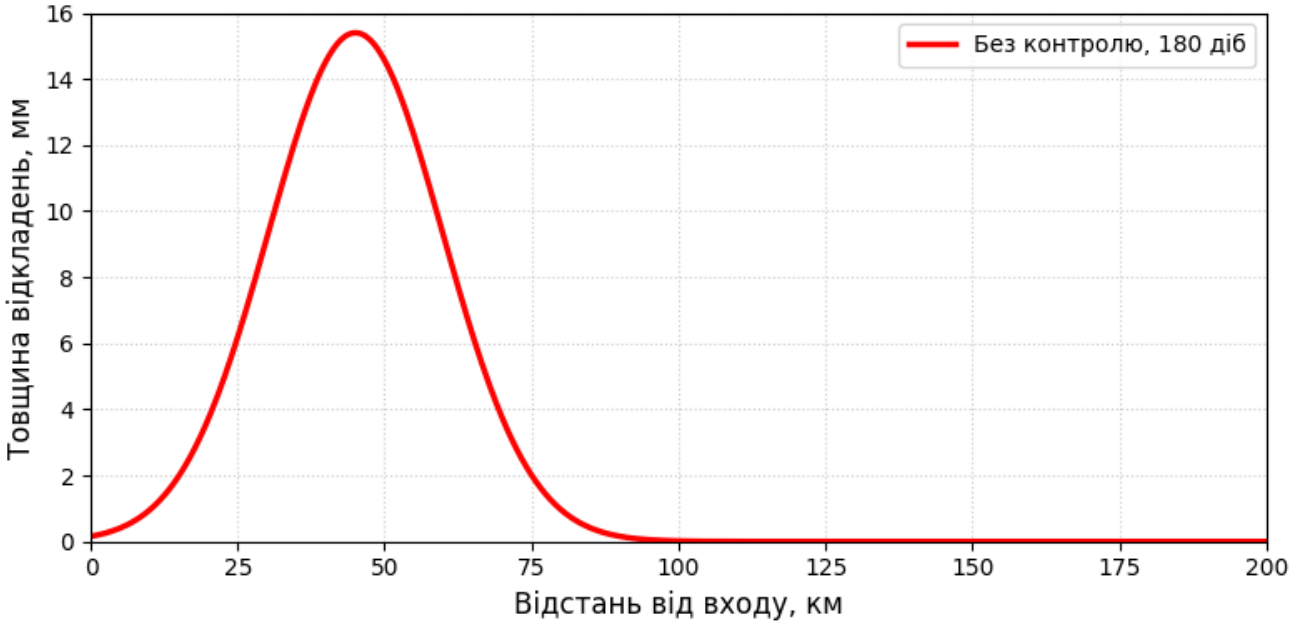


Рис. 1. Розподіл товщини парафінових відкладень вздовж трубопроводу через 180 діб експлуатації без системи контролю.

На рис. 2 наведено графіки зміни максимальної товщини в часі для трьох стратегій: без контролю (крива 1), адаптивне скребкування (крива 2) та адаптивне скребкування з періодичним інгібуванням (крива 3). Необхідно зазначити, що адаптивна система підтримує товщину в безпечних межах, уникаючи як надмірного накопичення, так і занадто частого очищення.

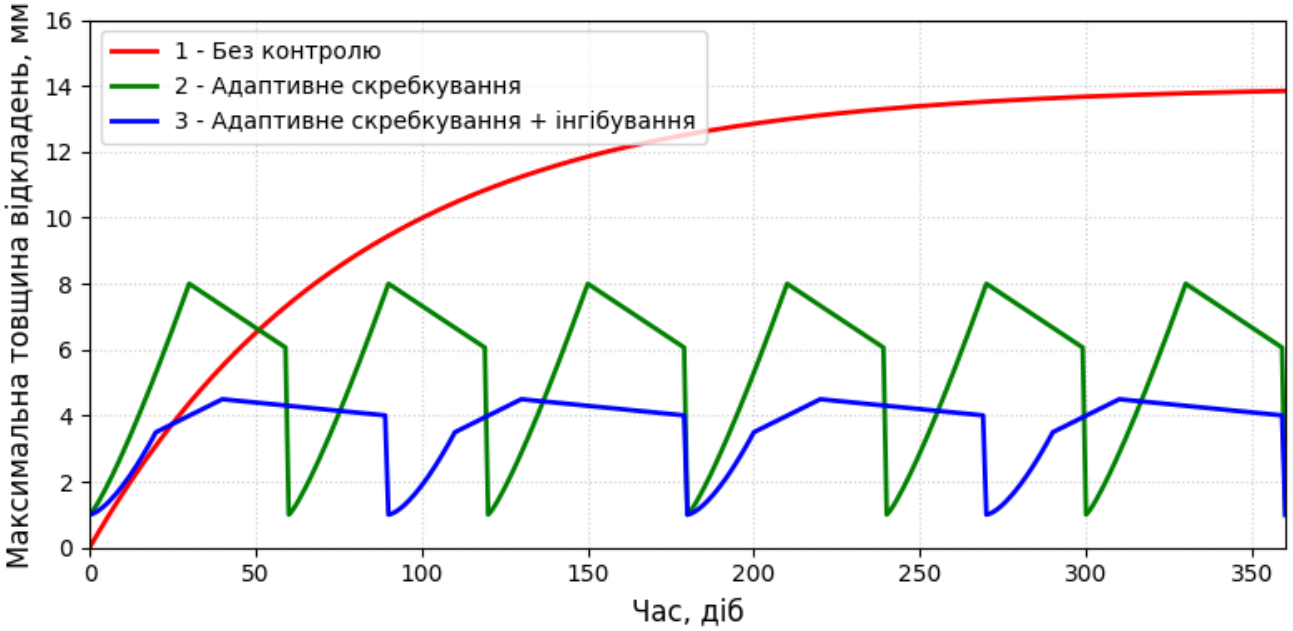


Рис. 2. Динаміка максимальної товщини відкладень у часі для різних стратегій контролю: крива 1 – без контролю; крива 2 – адаптивне скребкування на основі моделі; крива 3 – адаптивне скребкування з періодичним інгібуванням

Реалізація описаної системи на діючому трубопроводі вимагає виконання кількох етапів. На першому етапі проводиться аудит наявних засобів вимірювання: перевіряється наявність та точність датчиків тиску та температури на насосних станціях, можливість встановлення додаткових вимірювачів диференційного тиску на характерних ділянках. Якщо додаткові датчики не можуть бути встановлені через технічні або фінансові обмеження, початкова версія системи може використовувати лише наявні дані (тиск на вході та виході ділянки, температура в кількох точках), що призводить до збільшення похибки оцінки товщини до 20–30 %. На другому етапі проводиться калібрування моделі за історичними даними: використовуються дані минулих пропускань скребків (записані товщини та геометрія), а якщо таких даних недостатньо – проводяться спеціальні дослідження на холоднопальцевій установці або проточній петлі зі зразками нафти, відібраними в даному трубопроводі. На третьому етапі система запускається в режимі «радника» (рекомендаційному), коли вона видає прогнози та пропозиції щодо необхідності очищення або дозування, але остаточне рішення приймає оператор. Після підтвердження достовірності прогнозів шляхом порівняння з фактичними даними (зазвичай протягом 2–3 місяців або 2–3 циклів скребкування) система може переводитися в напівавтоматичний режим, де рекомендації щодо дозування інгібітора та зміни швидкості виконуються автоматично, а команда на запуск скребка потребує підтвердження оператором. Повністю автоматичний режим (без участі оператора) можливий лише після тривалої успішної експлуатації та за наявності дублюючих каналів безпеки.

Таким чином, розроблена система контролю відкладень, що базується на математичному моделюванні, адаптивному калібруванні та економічній оптимізації, дозволяє суттєво знизити експлуатаційні витрати та підвищити надійність роботи магістральних трубопроводів.

Висновки. У результаті проведених досліджень сформульовано теоретичні засади побудови інтегрованої системи контролю відкладень у магістральних трубопроводах, які базуються на п’яти ключових принципах: безперервності спостереження за станом внутрішньої поверхні труби за допомогою вбудованих датчиків тиску, температури та вимірювачів диференційного тиску на реперних ділянках; наявності прогностичної математичної моделі, що описує кінетику росту парафінових та інших відкладень з урахуванням молекулярної дифузії, температурної залежності коефіцієнта дифузії, змиву під дією напруження зсуву та впливу хімічних інгібіторів; адаптивності, тобто періодичного калібрування параметрів моделі за даними зворотного зв’язку, зокрема за результатами пропускання інтелектуальних скребків; пріоритету профілактичних заходів (хімічне інгібування, регулювання швидкості потоку) перед аварійним реагуванням; та економічної оптимізації, яка зводиться до мінімізації сумарних витрат на енергоспоживання, втрати пропускної здатності та проведення очищень. Розроблено архітектуру системи, що складається з чотирьох взаємопов’язаних блоків – збору та обробки даних, моделювання (1D термогідравлічна модель з підмоделлю росту відкладень), прийняття рішень на основі оптимізаційного функціоналу та виконання команд (автоматичне дозування інгібіторів, зміна режиму перекачування, ініціювання запуску скребків). Ця система працює в замкненому циклі з періодом оновлення одну добу, що забезпечує своєчасне реагування на зміну умов транспортування.

Чисельне моделювання для репрезентативної ділянки магістрального нафтопроводу довжиною 200 км, діаметром 800 мм, з високопарафінистою нафтою (вміст парафінів 18 мас.%) показало, що застосування адаптивного скребкування на основі прогнозної моделі дозволяє зменшити частоту очищень з 30 до 60 діб у середньому та знизити річні витрати на 39 % порівняно з фіксованим графіком скребкування, а додаткове періодичне хімічне інгібування (дозування 200 ppm депресора протягом 10 діб після кожного очищення) дає змогу подовжити період між скребками до 90 діб і скоротити витрати на 69 % відносно неконтрольованого режиму. Отримані результати підтверджують, що запропонована система контролю відкладень є економічно ефективною та технічно реалізованою.

Практичне впровадження системи рекомендується здійснювати поетапно: спочатку аудит наявних засобів вимірювання з можливістю встановлення додаткових датчиків диференційного тиску, потім калібрування моделі за історичними даними або спеціальними лабораторними дослідженнями (холодопальцеві тести, проточні петлі), далі запуск у режимі «радника» для накопичення довіри протягом 2–3 місяців, і нарешті перехід у напівавтоматичний або повністю автоматичний режим залежно від вимог до надійності та наявності дублюючих каналів безпеки. Запропонована система є універсальною та може бути адаптована до трубопроводів різного діаметра, протяжності та складу нафти, що забезпечує її високу практичну цінність для підвищення ефективності транспортування вуглеводнів.

Перелік посилань

1. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Екогеофорум-2017: Актуальні проблеми та інновації»* (22–25 березня 2017 р.). (2017). Івано-Франківськ.
2. Rastsvietaiev, V. O., Yavorska, V. V., Vasylchenko, D. O., Yashyn, D. O., & Koroviaka, M. Ye. (2026). Justification of technological solutions for methods of prediction and control of deposits in trunk pipelines. *Technical Engineering, 1*(97), 498–506. https://doi.org/10.26642/ten-2026-1(97)-498-506
3. Gurbanov, G., Gasimzade, A., & Abdullayeva, Z. (2026). Study on the effect of new compositions on the breakdown of stable water-in-oil emulsions. *Nafta-Gaz, 82*(2), 146–155. https://doi.org/10.18668/NG.2026.02.04
4. Rastsvietaiev, V. O. (2026). Research on the mechanisms of deposit formation and development of a comprehensive system for combating them in trunk pipelines. *Науковий вісник ДонНТУ, 2*(17), 18–28. https://doi.org/10.31474/2415-7902-2026-2-17-18-28
5. Haddad, J., Alfaqs, F., Pashchenko, O., Khomenko, V., & Rastsvietaiev, V. (2026). Dynamics of the destruction of paraffin deposits in oil–gas systems under cyclic pressure. *Journal of Engineering and Applied Science, 73*(1), Article 160. https://doi.org/10.1186/s44147-026-01007-5
6. Rastsvietaiev, V., Aziukovskyi, O., Babenko, M., Vasylchenko, D., & Yashyn, D. (2026). Innovative approaches to managing deposit formation processes in main pipeline systems. *Collection of Research Papers of National Mining University,* 84, 149–160. https://doi.org/10.33271/crpnmu/84.149
7. Rastsvietaiev, V. O., Haddad, J., Aziukovskyi, O. O., Pashchenko, O. A., Babenko, M. V., & Vasylchenko, D. O. (2026). Development and evaluation of combined methods for cleaning paraffin wax deposits in pipelines oil and gas industry. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu,* (1), 50–57. https://doi.org/10.33271/nvngu/2026-1/050
8. Rastsvietaiev, V., Haddad, J., Pashchenko, O., Shporta, A., & Tymchenko, S. (2026). Modeling of deposit accumulation processes and optimization of their removal systems in main pipelines.

Collection of Research Papers of the National Mining University, (85), 114–126. https://doi.org/10.33271/crpnmu/85.114
9. Расцвєтаєв, В. О., Азюковський, О. О., Заболотна, Ю. О., Яшин, Д. О., & Бабенко, М. В. (2025). Оцінювання технічного стану переходу магістрального газопроводу «Шебелинка–Диканька–Київ» через залізничну колію. *Збірник наукових праць НГУ,* 83, 324–337. https://doi.org/10.33271/crpnmu/83.324
10. Rastsvietaiev, V., & Vasylchenko, D. (2025). Technological and energy advantages of induction heating in oil transportation systems by pipelines. *Collection of Research Papers of the National Mining University,* 82, 246–257. https://doi.org/10.33271/crpnmu/82.246
11. Расцвєтаєв, В. О., Азюковський, О. О., Пащенко, О. А., Яворська, В. В., & Бабенко, М. В. (2025). Неруйнівні методи оцінки впливу газогідратів на міцність магістральних трубопроводів. *Технічна інженерія, 2*(96), 322–330. https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-322-330
12. Расцвєтаєв, В.О., Азюковський, О.О., Пащенко, О.А., Бабенко, М.В., & Васильченко, Д.О. (2025). Термодинамічні та кінетичні аспекти формування газогідратів у магістральних трубопроводах. *Вісті Донецького гірничого інституту, 2*(57), 7–14. https://doi.org/10.31474/1999-981X-2025-2-7-14
13. Marek, J., Skřehot, P., Hon, Z., & Vargová, S. (2024). Possibilities of using a virtual source model to refine the prediction of the impact of injurious effects in massive releases of toxic gases. *Chemické listy*, 118, 676–684. https://doi.org/10.54779/chl20240676
14. Расцвєтаєв, В.О., Азюковський, О.О., Бабенко, М.В., & Васильченко, Д.О. (2025). До питання перспектив застосування індукційного нагріву у системах транспортування нафти трубопроводами. *Науковий вісник ДонНТУ, 2*(15), 232–245. https://doi.org/10.31474/2415-7902-2025-2-15-232-245
15. Wolicki, R. (2026). Case study: How advanced sensing and big data improve pipeline cleaning and flow assurance. *Journal of Petroleum Technology,* 78, 1–5. https://doi.org/10.2118/0526-0007-JPT
16. Sarwari, S., Qiao, Y., Koirala, P., & Yihang, G. (2026). An intelligent decision support framework for flood forecasting and structural safety monitoring in hydropower systems: Integration with power system protection and control. https://doi.org/10.46121/pspc.54.3.13
17. Lee, S.-J., Kim, J., & Yun, H.-S. (2026). How sustainable is Arctic route diversification? Economic losses, SDG trade-offs, and supply chain resilience in the 2026 Hormuz crisis. Sustainability, 18, 4318. https://doi.org/10.3390/su18094318
18. Ahmad, I. (2026). "We are feeling hot": Himalayan glacier warming and ice–rock collapse hazards from Chamoli 2021 to Nepal–Tibet 2026 (VIEWS).
19. T. R., S., Alshahrani, M., Faisal, D., & Vadivu, D. (2026). T R Shree Nee (Sep 2026) healthcare application using data science, machine learning, and IoT textbook.
20. Fakhruddin, Z., Ahmed, V., & Bahroun, Z. (2026). Artificial intelligence and BIM-enabled smart construction site management: A systematic review of site-level spatial decision-making and site layout optimization-related applications for sustainable building delivery. *Smart Cities,* 9, 112. https://doi.org/10.3390/smartcities9070112
21. Azevedo, L. F. A., & Teixeira, A. M. (2003). A critical review of the modeling of wax deposition mechanisms. *Petroleum Science and Technology, 21*(3–4), 393–408. https://doi.org/10.1081/LFT-120018528
22. Skovborg, P., & Rasmussen, P. (1994). A mass-transport limited model for the growth of methane and ethane gas hydrates. *Chemical Engineering Science, 49*(8), 1131–1143. https://doi.org/10.1016/0009-2509(94)85085-2
23. Chaokromthong, K. (2026). Integrating Building Information Modeling (BIM) into public construction policy: A systems-based analysis in the Thai context. Asian Creative Architecture, Art and Design, 39(2), e283010. https://doi.org/10.55003/acaad.2026.283010
24. Xhindi, T. (2026). Editorial–Digital transformation, intelligent systems, and sustainable solutions in emerging contexts. *Ingenious, 6*(1), 5–8. https://doi.org/10.58944/tqnh1077
25. Tiratsoo, J. (Ed.). (2003). Pipeline pigging and integrity technology (3rd ed.). Scientific Surveys Ltd.

26. Cordell, J., & Vanzant, H. (2003). Pipeline pigging handbook: Design, operation & maintenance. Clarion Technical Publishers.
27. Schalm, O., & Lemmens, J. (2026). Quantifying human-driven energy and cost variability in tugboat manoeuvres. In Maritime Transport XI: 11th International Conference on Maritime Transport (Vol. 11). Universitat Politècnica de Catalunya. https://doi.org/10.5821/mt.14706
28. Zain Abdullah, M., Yunchong, G., & Yunhasnawa, Y. (2026). Behavior and person sensing system based on computer vision. *Jurnal Informatika Polinema, 12*(3), 419–424. https://doi.org/10.33795/jip.v12i3.9090
29. Matzain, A., Apte, M. S., Zhang, H.-Q., Volk, M., Brill, J. P., & Creek, J. L. (2002). Investigation of paraffin deposition during multiphase flow in pipelines and wellbores–Part 1: Experiments. *Journal of Energy Resources Technology, 124*(3), 180–186. https://doi.org/10.1115/1.1484392
30. Li, R., Huang, Q., Huo, F., Fan, K., Li, W., & Zhang, D. (2019). Effect of shear on the thickness of wax deposit under laminar flow regime. *Journal of Petroleum Science and Engineering,* 181, 106212. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106212
31. Shree, T. R., Alshahrani, M., Faisal, D., & Vadivu, D. (2026). Healthcare application using data science, machine learning, and IoT textbook. ISBN 9789371963350.
32. Ekambaram, T., Raj, G. R., Datta, A. K., & Pal, A. (2026). Artificial neural network-based approach for structural health monitoring of earthquake-affected industrial structures. *Engineering Computations*, 1–17. https://doi.org/10.1108/EC-06-2025-0568
33. Chen, S., Li, Z., Wang, Y., Guan, H., Gao, L., Ma, J., & Wang, X. (2021). Construction and application of Digital Twin model of pipeline. *Oil & Gas Storage and Transportation, 40*(6), 643–650. https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2021.06.006
34. Wang, T., Feng, K., Ling, J., Liao, M., Yang, C., Neubeck, R., & Liu, Z. (2024). Pipeline condition monitoring towards digital twin system: A case study. *Journal of Manufacturing Systems,* 73, 256–274. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.02.006
35. Bandar, F., Salem, F., AlAsousi, G., & Muqaddas, Z. (2026). The role of female talent in oilfield. *Society of Petroleum Engineers*. https://doi.org/10.2118/230982-MS
36. Khouya, Y. B. (2025). Digital e-sourcing as a catalyst for modern industrial procurement: A case study of Supply4industry in global supply chains. European Journal of Logistics, *Purchasing and Supply Chain Management, 13*(1), 131–144. https://doi.org/10.37745/ejlpscm.2013/vol13n1131144
37. Shree NEE T. R., Alshahrani, M. S. M., Faisal, M., & Vadivu, M. S. (2026). Healthcare application using data science, machine learning, and IoT textbook.
38. Kim, S., & Kim, S. (2026). Closed-loop brain–computer interfaces (BCI) enhanced with AI-driven neurofeedback using soft bioelectronic networks: A comparative study with i-BrainTech and proposal of a new hybrid model. *International Journal of Grid Computing & Applications, 17*(1), 1–11. https://doi.org/10.5121/ijgca.2026.17101
39. Danilishyn, I., Danilishyn, O., & Pasynkov, V. (2026). Elements of mathematical connections theory, mathematics of format-numbers, some format-numbers for S-morphology, fundamentally new approach to elementary particles by format-numbers. *Journal of Modern Classical Physics & Quantum Neuroscience, 2*(4), 1–39. https://doi.org/10.63721/26JPQN0184
40. Wei, Z., Wang, H., Jiang, X., Xiang, X., Zhang, S., Liao, X., & Jin, H. (2026). Bridging LLM-RecSys paradigms and heterogeneous AI accelerators: A taxonomy and system-level impact analysis. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20082.26565
41. Savidis, A. (2026). Real-time train tracking over satellite backhaul: A GNSS/INS system with HMM map matching and graph-aware dead reckoning for the Greek railway network [Technical report]. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12602.76480
42. Shi, Y., Yi, T., Meng, Y., Tian, J., & Guo, J. (2026). Physics-aware graph neural ODE for sensor data imputation in converter transformer monitoring systems. *Journal of King Saud University Computer and Information Sciences,* 38, Article 307. https://doi.org/10.1007/s44443-026-00710-w
43. Carpenter, C. (2026). In-pipe inspection technologies enable high-resolution downhole data acquisition. *Journal of Petroleum Technology,* 78, 1–3. https://doi.org/10.2118/0726-0014-JPT

ABSTRACT

Purpose. To develop the theoretical foundations and structure of an integrated deposit control system for trunk pipelines, combining the forecasting, monitoring, prevention, and removal of organic and inorganic deposits to ensure hydraulic and thermal efficiency.

The methods. A systems analysis of scientific and technical literature was employed. A conceptual model was proposed, comprising diagnostic, prognostic, preventive, and reactive subsystems. The diagnostic subsystem monitors flow parameters and the condition of the internal surface; the prognostic subsystem models deposit growth; the preventive subsystem handles chemical inhibition and thermohydraulic regulation; and the reactive subsystem manages cleaning and emergency measures.

Findings. The system's principles were formulated: continuity, adaptability, multi-level operation, priority of prevention, and energy efficiency. A structural scheme was developed covering data collection (temperature, pressure, flow rate, and differential pressure), 1D thermohydraulic modeling with a deposit growth sub-model, decision-making based on trigger thresholds and economic optimization, as well as inhibitor dosing, pig launching, and pumping mode adjustment. Reductions of 40–70% in emergency shutdowns and 20–35% in cleaning costs are anticipated, along with a 1.5–2-fold extension of the interval between maintenance operations. A 200 km section of an oil pipeline with an 18% paraffin content was analyzed.

The originality. A comprehensive concept for deposit control is proposed for the first time, integrating feedback, predictive control, and risk-based planning with technologies for embedded monitoring, intelligent cleaning, and automated dosing. A criterion for the economic feasibility of intervention is proposed, accounting for cleaning costs, throughput losses, and energy consumption.

Practical implementation. The system is suitable for pipelines of various diameters, lengths, and oil types; it enables the automation of cleaning decisions, optimizes reagent consumption, and reduces the risk of accidents. The expected economic benefit amounts to 15–30% of annual operating costs.

***Keywords**: trunk pipeline, deposit control, monitoring, forecasting, inhibition, pigging, flow management, paraffin deposits.*

дата першого надходження статті до видання	14.07.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	19.08.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.09.2026

© 2026. V. Rastsvietaiev, O. Pashchenko, V. Yavorska, D. Yashyn
Published by the Dnipro University of Technology on behalf of Collection of Research Papers of the National Mining University. ISSN 2521-6635 (Online) | ISSN 2071-1859 (Print). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.