

Відгук

на дисертаційну роботу Гладкої Олени Миколаївни „*Моделювання нелінійних фільтраційних процесів у техногенно-деформованих пластах методами комплексного аналізу та сумарних зображень*”, подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Актуальність теми дисертації. Більшість нафтогазових родовищ в Україні виснажені і перебувають на завершальній стадії розробки, що характеризується падінням дебіту свердловин та погіршенням умов видобутку вуглеводнів. При цьому через зональну та шарувату неоднорідність колекторів, підвищену в'язкість нафти і прояви інших чинників, що виникають в процесі експлуатації родовищ, значна кількість початкових запасів нафти залишається невилученою. За цих умов важливим завданням є пошук методів інтенсифікації нафтогазовидобутку з діючих родовищ, що потребує розробки підходів до оцінки та техніко-економічного обґрунтування ефективності цих методів і більш ґрунтовного вивчення особливостей протікання складних процесів витіснення вуглеводнів із неоднорідних пластів, які зазнали деформацій при експлуатації покладів. А це, в свою чергу, вимагає адекватного математичного опису таких процесів з метою їх подальшого дослідження за допомогою комп'ютерного моделювання.

У зв'язку з недостатністю інформації про поклади нафти і газу у продуктивних пластах з неоднорідною будовою при створенні відповідних математичних моделей, як правило, родовище ділять на ділянки (зони), в межах яких продуктивний пласт можна вважати однорідним. Проте ці зони є криволінійними, із складною геометрією, що не повністю визначена. Моделювання їх шаруватими структурами не завжди виправдано, оскільки може призводити до значних відхилень розрахованих результатів від реальних даних. Враховуючи сучасні дослідження з підземної гідродинаміки, зокрема, механізми руху флюїдів та процеси техногенно-зумовлених навколосвердловинних деформацій породи, для моделювання таких зонально-неоднорідних пластів у роботі запропоновано використовувати LEF-пласти, що визначають нелінійно-шаруваті структури, в яких параметр, котрий характеризує основні фільтраційні властивості середовища – коефіцієнт проникності пласта – кусково-стала функція, залежна від квазіпотенціалу (тиску) і функції течії, а невідома геометрія зон визначається відповідними екіпотенціальними лініями і лініями течії, що розраховуються в процесі розв'язання задачі.

В основу дисертаційного дослідження покладено ідею синтезу числових методів квазіконформних відображень, сумарних зображень та декомпозиції області, що дозволило розробити нову ефективну методику розв'язання

спеціального класу крайових задач, які виникають при моделюванні фільтраційних процесів у техногенно-деформованих водонафтогазових пластах.

Тому тема і завдання дисертаційного дослідження відносяться до актуальних проблем математичного моделювання і подальшого розвитку числових методів.

Дисертаційна робота Гладкої О.М. виконана в рамках таких науково-дослідних робіт: “Системне математичне моделювання нелінійних збурень процесів типу «фільтрація-конвекція-дифузія» з післядією при неповних даних” (№ ДР 0109U001065), “Просторові аналоги крайових задач на квазіконформні відображення і проблеми моделювання нелінійних процесів у пористих середовищах” (№ ДР 0112U001014), що підтверджено відповідним актом, наданим у додатках до дисертації.

Тема дисертаційної роботи відповідає такому напрямку з Переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2015 року: Технології моделювання та прогнозування стану навколишнього середовища.

Структура та зміст дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 197 назв та 3 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 206 сторінок, з них 155 сторінок основного тексту.

У **вступі** до дисертації зосереджено увагу на обґрунтуванні актуальності теми роботи, завданнях та методах досліджень. Аргументовано практичне значення вирішення завдання математичного моделювання фільтраційних процесів у техногенно-деформованих пластах, наведені дані про особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів, дані про їх апробацію та кількість публікацій.

У **першому розділі** проведено аналіз об’єкту досліджень, сучасних підходів до вивчення цих об’єктів, розглянуто основи числових методів конформних і квазіконформних відображень та числово-аналітичних методів сумарних зображень. У розділі також розроблено методіку застосування методів сумарних зображень і декомпозиції області до розв’язання крайових задач фільтрації в елементах нафтових пластів, що використовується у наступних розділах роботи для розв’язання більш складних задач.

У **другому розділі** дисертаційної роботи розвинуто методіку розв’язування нелінійних крайових задач для криволінійних одно- та багатозв’язних LEF-областей, а також для LEF-областей з вільними межами на основі синтезу числових методів квазіконформних відображень та сумарних зображень. На цій основі розроблено алгоритми для розрахунку гідродинамічної сітки руху рідини у системі “пласт-свердловина” як для простих областей, так і областей складної конфігурації з особливостями, зі зміщеними центра-

ми контурів, значною різницею між розмірами обмежуючих кривих тощо. Узагальнено методику для розрахунку фільтраційного режиму у криволінійних LEF-областях з вільною межею – невідомою ділянкою границі (крива депресії), яку застосовано до математичного опису процесів стаціонарної фільтрації у ґрунтовій загаті без проміжка височування та безнапірного руху нафти в елементі нафтоносного пласта. При цьому в процесі розв’язання задачі вузли динамічної сітки розраховувалися за методом сумарних зображень, що дало можливість на кожному кроці ітераційного процесу врахувати вплив усіх граничних та оточуючих внутрішніх вузлів, які на наступному кроці уточнюються задоволенням умов ортогональності. Обґрунтовано знаходження невідомої частини границі та координат точки перетину з відомою ділянкою межі, визначення напору у цій точці та обчислення повної фільтраційної витрати.

Досліджено стаціонарний процес витіснення, породжений взаємодією нагнітальною та експлуатаційною свердловинами у продуктивному нафтогазовому пласті. Запропоновано новий підхід до класифікації ситуаційних станів формування течії для випадків тризв’язної криволінійної LEF-області, обмеженої трьома еквіпотенціальними лініями, і чотиризв’язної криволінійної LEF-області, обмеженої трьома еквіпотенціалами та непроникним контуром, на основі розвиненої методики синтезу методів конформних відображень та сумарних зображень. Нелінійна крайова задача, яка описує роботу двох чи трьох свердловин у пласті, зводиться до обернення квазікомформного відображення даної області з умовними розрізами вздовж певних ліній течії на відповідну область комплексного квазіпотенціалу, яка подається об’єднанням чотирьох суміжних прямокутників. Це дало можливість звести всі випадки формування течії, які залежать від співвідношень між граничними потенціалами, до трьох різних ситуаційних станів, два з яких відповідають відсутності перетоку між різними контурами, а один – наявності перетоків між усіма контурами. Такий підхід до класифікації способів формування течії та встановлення області комплексного потенціалу дозволяє уніфікувати постановки крайових задач стаціонарної фільтрації у чотиризв’язній області, їх різницеві аналоги та алгоритми розв’язування задач.

У **третьому розділі** проведено математичне моделювання нелінійних процесів витіснення (одно- та двофазної фільтрації) у неоднорідних малопроникних нафтогазових (чи ущільнених, сланцевих) деформівних пластах (LEF-пластах, геометрія зон неоднорідності яких наперед невідома) з урахуванням зворотнього впливу потенціалу поля швидкості та функції течії на провідність середовища. Побудовано методику розв’язування відповідних крайових задач для нелінійно-шаруватих, нелінійно-двошаруватих, нелінійно-неоднорідних та анізотропних одно-, дво- та тризв’язних криволінійних областей, обмежених еквіпотенціальними лініями і лініями течії, на

основі синтезу числових методів квазіконформних відображень, сумарних зображень для диференціальних рівнянь з розривними коефіцієнтами чи числово-аналітичних узагальнень методів сумарних зображень у поєднанні з декомпозицією області за методом Шварца. Застосування на першому етапі побудови розв'язків задач для криволінійних областей квазіконформного відображення дозволило коректне використання методу сумарних зображень для диференціальних рівнянь з розривними коефіцієнтами завдяки переходу від розв'язання задач на знаходження комплексного потенціалу поля до обернених на відшукання характеристичної функції течії, оскільки відповідні області комплексного потенціалів є об'єднанням прямокутників. Декомпозиція області на підобласті з двома прошарками сталості коефіцієнта проникності, що накладаються одна на одну, за альтернуючим методом Шварца дозволяє ефективно склеювати розв'язок для великого числа ліній розриву коефіцієнта. При цьому характерні розміри області фільтрації можуть бути як співвимірними, так суттєво відрізнятись.

За запропонованою методикою досліджено процеси стаціонарної фільтрації в ущільнених скелясто-осадових породах, в яких внаслідок гідравлічного розриву пласта мікротріщини та свердловини об'єднані в одну структуру. Причому формули сумарних зображень для багат шарових областей з горизонтальними лініями розрізу суттєво відрізняються. Для точнішої оцінки основних фільтраційних характеристик у випадках, коли напрям тріщин не співпадає з лінією течії, використано метод мажорантних областей Положого. Побудовано скінченно-різницевої системи рівнянь для випадків наявності в пласті однієї тріщини та кількох тріщин гідророзриву. Встановлено, що наявність навіть однієї тріщини суттєво впливає на дебіт свердловини, важливим є розташування тріщин, тобто напрям гідророзриву, а утворення додаткових тріщин не завжди доцільно. Крім цього розвинений підхід застосовано до моделювання процесів витіснення у нафтогазовому пласті з двома свердловинами (нагнітальною та експлуатаційною) за геологічно складних умов у випадках, коли речовини, що витісняють і добуваються, є однаковими; поршневого витіснення нафти водою; а також моделювання двофазної фільтрації «вода-нафта» за сумісного руху обох рідин.

У **четвертому розділі** розроблено методика розв'язування нелінійних крайових задач теорії комплексного квазіпотенціалу для нелінійно-шаруватих та двояко-шаруватих криволінійних LEF-областей за умов взаємовпливу характеристик процесу і середовища та визначення параметрів (значень коефіцієнта провідності, критичних значень квазіпотенціалу та локальних витрат) за вимірювальними даними на границі пласта. Розв'язана обернена задача на знаходження кусково-сталого коефіцієнта провідності в підобластях, обмежених екіпотенціальними лініями, за відомих витратою та критичних значень потенціалу на границях розділу за допомогою побудови ітера-

ційного процесу для визначення даного коефіцієнта з одночасним розрахунком вузлів динамічної сітки за методом сумарних зображень. Умовою завершення ітераційного процесу є стабілізація координат граничних вузлів, тобто якщо зміщення вузлів на границі на певній ітерації є меншим деякого наперед заданого числа, і задоволення умови щодо ступеня конформності відображення області комплексного потенціалу на фізичну область. Також розв'язані задачі знаходження критичних значень потенціалу на шуканих еквіпотенціальних лініях розділу областей, в яких коефіцієнт провідності є сталим, за відомими повною витратою і кусково-сталими значеннями коефіцієнта провідності; встановлення критичних значень потенціалу і коефіцієнта провідності за відомими витратою, граничним значенням потенціалу і значень потенціалу на еквіпотенціальних лініях розділу областей за певних обмежень

На основі представлення нелінійних процесів витіснення у нафтогазових пластах стаціонарним квазіідеальним полем з «фіктивним» коефіцієнтом провідності, який одночасно характеризує проникність пористого середовища і фільтраційні властивості рухомої речовини та їхній взаємовплив, запропоновано та обґрунтовано узагальнення розробленої методики розв'язування обернених задач знаходження коефіцієнта провідності в підобластях його постійності з урахуванням зворотного впливу на конфігурацію цих областей функції течії, а також значень локальних витрат (потоків) через ділянки границі областей, які обмежені шуканими лініями течії.

У **додатках** подано акти про використання результатів дисертаційного дослідження.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій. Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, визначається їх відповідністю сучасним теоретичним уявленням про процеси фільтрації та витіснення у нафтогазових пластах, механізмами руху флюїдів у пористих середовищах, а також результатам експериментальних досліджень. Зокрема, при побудові математичної моделі автор використала відомий закон фільтрації Дарсі, у якому коефіцієнт провідності залежить від шуканих квазіпотенціалу і функції течії, що дозволило математично описати нелінійно-шаруваті структури (LEF-пласти), лінії розділу шарів неоднорідності яких наперед невідомі і визначаються шуканими лініями динамічної сітки. Такі структури моделюють техногенно-зумовлені деформації породи, що виникають внаслідок експлуатації родовищ.

Для побудови розв'язків поставлених нелінійних крайових задач, що описують складні фільтраційні процеси з урахуванням зворотнього впливу параметрів процесу на вихідні характеристики середовища, автор спирається на обґрунтовані числові методи, зокрема, методи сумарних зображень та їх модифікації, методи декомпозиції області і задачі та розпаралелювання

обчислень, методи конформних і квазіконформних відображень, методи побудови різницевих схем і поетапної фіксації окремих параметрів задачі.

Результати дисертаційного дослідження апробовані на 22 міжнародних та вітчизняних наукових конференціях і 5 семінарах.

Достовірність і новизна наукових положень, висновків і рекомендацій. Достовірність отриманих автором результатів, висновків і рекомендацій забезпечується застосуванням сучасних методів математичного моделювання, фізичною і математичною коректністю постановок крайових задач та строгим обґрунтуванням побудови розв'язків, несуперечністю одержаних результатів відомим теоретичним результатам, а також їх відповідністю даним фізичних експериментів, що підтверджує адекватність запропонованих математичних моделей досліджуваним фізичним процесам та строгим використанням як компонентів розробленої методики розв'язування відповідних нелінійних крайових задач повністю теоретично обґрунтованих методів сумарних зображень, відомого альтернуючого методу Шварца декомпозиції області та апробованих іншими дослідниками числових методів комплексного аналізу.

Новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі розв'язано нову наукову задачу математичного моделювання нелінійних квазіідеальних фільтраційних процесів у зонально-неоднорідних LEF-пластах і розроблення на основі синтезу числових методів комплексного аналізу, сумарних зображень та декомпозиції задачі методики розв'язання відповідних крайових задач за умов взаємовпливу характеристик процесу і середовища та визначення параметрів моделі.

Для математичного опису процесів витіснення з урахуванням техногенно-зумовлених деформацій у наволоосвердловинних зонах нафтогазових чи водоносних пластів у роботі побудовано нову нелінійну математичну модель, в якій коефіцієнт провідності середовища залежить від квазіпотенціалу (напору, тиску) та функції течії і модифіковано існуючу математичну модель для ущільнених (сланцевих) пластів з тріщинами ГРП.

На основі розроблених математичних моделей сформульовано нові нелінійні крайові задачі для систем еліптичних диференціальних рівнянь у одно- та багатозв'язних криволінійних LEF-областях. Вперше розроблено методику розв'язання крайових задач на основі синтезу числових методів квазіконформних відображень, сумарних зображень та декомпозиції області за альтернуючим методом Шварца. У випадках крайових задач для диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами побудовано числово-аналітичні представлення розв'язків, що узагальнюють методи сумарних зображень. Вперше отримано розв'язки задач на числове визначення параметрів квазіідеальних процесів (значень коефіцієнта провідності, критичних значень потен-

ціалу і значень локальних фільтраційних витрат) у нелінійно-шаруватих LEF-пластах.

Зміст дисертації належним чином відображає мету роботи та основні поставлені завдання для досягнення даної мети.

Важливість для науки одержаних автором дисертації результатів полягає у тому, що побудовані нові нелінійні математичні моделі квазіідеальних фільтраційних процесів дозволяють розширити клас розв'язуваних задач та є ефективним математичним описом досліджувальних об'єктів. Запропонований у роботі синтез числових методів комплексного аналізу, сумарних зображень та декомпозиції задачі є важливим внеском у розвиток сучасних числових методів.

Практичне значення отриманих результатів підтверджено впровадженням методики розрахунку та моделювання квазіідеальних фільтраційних процесів за умов зворотнього впливу параметрів процесу на характеристики середовища при розробці та проектуванні родовищ нафти і газу Дочірнім підприємством «Науково-дослідний інститут нафтогазової промисловості» Національної акціонерної компанії «Нафтогаз України» (ДП «Науканафтогаз»).

Результати проведених у дисертаційній роботі досліджень використані при підготовці студентів за напрямами 6.040301, 7.04030101, 8.04030101 (бакалавр, спеціаліст, магістр) «Прикладна математика» для викладання дисциплін “Чисельні методи конформних і квазіконформних відображень”, “Методи комплексного аналізу”, “Проблеми оптимізації і керування процесами і системами”, “Сучасні проблеми прикладної математики”.

Результати впровадження та застосування розроблених математичних моделей і числових методів підтверджено актами про впровадження, які подані у додатках до дисертації.

Рекомендації щодо використання результатів дисертації.

Побудовані математичні моделі і методи розв'язання задач можуть бути використані для виконання прогностичних розрахунків при проектуванні розробок родовищ нафти і газу, застосовуватися для експертної оцінки результатів різноманітних технічних заходів, що проводяться з метою інтенсифікації нафтогазовилучення, виявлення і ліквідації застійних зон тощо.

Розроблена методика розв'язання нелінійних крайових задач дозволяє автоматично розраховувати координати вузлів динамічної сітки, знаходити лінії розділу шарів (ділянок) сталості коефіцієнта провідності середовища, обчислювати фільтраційні витрати, величину швидкості та інші параметри досліджуваних процесів, а також визначати (ідентифікувати) значення коефіцієнта провідності, критичні значення потенціалу і значення локальних фільтраційних витрат за додатковими даними.

Повнота викладу наукових положень, висновків, рекомендацій в опублікованих працях. Результати дисертаційної роботи відображені у 42 наукових працях, серед яких 20 статей, у тому числі 8 публікацій у фахових виданнях з технічних наук, 2 – у закордонних виданнях до входить до наукометричних баз, а також 3 статті у наукових фахових виданнях з фізико-математичних наук, 22 – матеріали конференцій, 5 – одноосібних.

Відповідність автореферату змісту дисертації. Викладені в авторефераті актуальність теми, мета і завдання дослідження, наукова новизна одержаних результатів та їхнє практичне значення, особистий внесок дисертанта, короткий зміст розділів повністю відповідають змісту дисертації. Автореферат оформлений згідно з вимогами МОН України.

Відповідність дисертації встановленим вимогам. Дисертаційна робота Гладкої О.М. відповідає діючим вимогам МОН України і паспорту спеціальності “Математичне моделювання та обчислювальні методи” (технічні науки), а саме напрямом “Розроблення або розвиток теорії математичного моделювання реальних явищ, процесів, об’єктів та систем на основі формалізації дії фізичних законів, виведення рівнянь та логічних співвідношень, що адекватно описують динаміку процесів з урахуванням топологічної складності досліджуваних об’єктів.”, “Розвиток та ефективне використання методів обчислювальної математики стосовно вирішення проблем дослідження ...”, “В тому числі модифікація та спеціалізація існуючих обчислювальних методів з метою підвищення їх ефективності ...”.

Оформлення дисертації відповідає вимогам, що пред’являються до дисертаційних робіт. Дисертація написана хорошою літературною мовою, викладення лаконічні, чіткі і достатні для повного розуміння. Однак є деякі помилки і неузгодженості, кількість яких незначна, і вони не впливають на правильне розуміння тексту дисертації.

По суті дисертаційної роботи можна зробити такі **зауваження**.

1. У роботі не достатньо чітко окреслено межі застосовності побудованих моделей та розвинених методів.
2. У четвертому розділі розглядаються обернені коефіцієнтні задачі, а саме на визначення різних параметрів задачі, зокрема, коефіцієнта провідності пористого пласта. На мою думку, зважаючи на некоректність обернених задач, не достатньо досліджено питання стійкості розв’язків.
3. Стосовно оформлення роботи: декілька параграфів, зокрема, п. 2.1, 2.4, 3.5, 4.1.1 закінчуються рисунками або формулами.

Дані зауваження не мають істотного впливу на загальне позитивне оцінювання роботи.

Висновок про відповідність дисертації вимогам МОН України

Подана до захисту дисертація є завершеним науковим дослідженням, в якому побудовані нові та модифіковано існуючі нелінійні математичні моделі фільтраційних процесів у техногенно-деформованих водонафтогазових пластах з урахуванням взаємовпливу характеристик процесу і середовища, а також створено нову ефективну методику розв'язування відповідних крайових задач на основі синтезу і адаптації обчислювальних методів.

Результати роботи є новими, вони доповідались на міжнародних і вітчизняних конференціях. Результати досліджень достатньо повно опубліковані у працях дисертанта. Автореферат адекватно відображає зміст роботи.

За актуальністю, рівнем та обсягом досліджень, науковою новизною та практичним значенням отриманих результатів дисертаційна робота „Моделювання нелінійних фільтраційних процесів у техногенно-деформованих пластах методами комплексного аналізу та сумарних зображень” відповідає вимогам “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”, затвердженого постановою КМ України № 567 від 4 липня 2013 р., які висуваються до кандидатських дисертацій, а її автор Гладка Олена Миколаївна заслуговує присвоєння їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент,

завідувач відділом математичного
моделювання нерівноважних процесів
Центру математичного моделювання
Інституту прикладних проблем механіки
і математики ім. Я. С. Підстригача
НАН України, м. Львів,
доктор технічних наук, професор

О. Ю. Чернуха

Підпис проф. Чернухи О.Ю. засвідчую: