ВІДГУК

офіційного опонента Грудза В.Я.на дисертаційну роботу Фика Михайла Ілліча **«Теоретичні основи процесів тепломасообміну раціонального вилучення геотермальних флюїдів вуглеводневих свердловин»,** подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.08 — процеси та обладнання хімічної технології

1. Актуальність проблеми

Сучасний стан нафтогазовидобувної галузі України характеризується обсягом і темпами вилучення із родовищ нафти, газу та конденсату. Значна частина родовищ України знаходиться на завершальній стадії розробки з нерентабельними дебітами свердловин, із закриттям їх та ліквідацією. Однак при виході із експлуатації свердловин на нафту і газ вони можуть продовжувати використовуватись для вилучення геотермальної енергії.

Дисертаційна робота М. І. Фика орієнтована на підвищення енергоефективності розробки нафтових та газових родовищ, що є однією з пріоритетних задач галузі в цілому. Використання геотермальної енергії є одним з шляхів розвитку раціональної технології надрокористування щодо зменшення екологічного навантаження на навколишнє середовище. В світі щорічно збільшуються інвестиції в гідротермальну енергетику, причому їх обсяги зростають за експоненціальним трендом.

Обґрунтовуючи актуальність теми дисертації, автор справедливо стверджує, що енергетичний перехід до сучасних рішень екологічного, регіонального та техніко-економічного характеру стимулює диверсифікацію енергетичних, в тому числі нафтогазових компаній, що сприяє розширенню перспективного геотермального індустріального сегмента, створенню нових свердловинних геотермальних систем з потужними станціями генерації тепла. За встановленою потужністю в секторі розбудови геотермальних систем домінують США (4 ГВт), за якими слідують Індонезія, Філіппіни, Туреччина та Італія. На частку 10 провідних країн-виробників геотермальної енергії припадає 90% всього ринку. При цьому багато нових країн, особливо в Європі, планують незабаром вийти на цей ринок.

В умовах дефіциту в Україні енергоносіїв, зокрема, нафти і газу, використання геотермальної енергії нафтогазових родовищ, в тому числі дуальної (флюїд та тепло), може стати додатковим джерелом нетрадиційної енергетики, тим більше, що кожен рік із експлуатації вибувають десятки нерентабельних свердловин. Тобто, актуальність даної роботи, яка пов'язана із видобуванням геотермальних ресурсів зі свердловин нафтогазових родовищ, є безсумнівна і відповідає вимогам МОН України.

2. Загальна оцінка змісту дисертаційної роботи та її довершеність

Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами – українською та англійською, вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 405 сторінок, серед них 61 рисунок за текстом, 23 таблиці за текстом, списку із 410 використаних джерел на 48 сторінках.

В цілому, структура дисертації логічно побудована та відповідає сформульованій меті і завданням досліджень. Автором не використані результати досліджень, які отримані ним у кандидатській дисертації.

У першому розділі виконаний огляд і аналіз наукових робіт з питань розвитку теоретичних основ ефективного видобування геотермальних ресурсів свердловин нафтогазових родовищ у світі та окремих країнах. Критично проаналізовані теоретичні підходи до математичного опису як сукупності, так і окремих фізичних процесів у суміщених системах видобування «флюїд-геотепло».

Вивчення та узагальнення досвіду, кращих практик побудови та експлуатації, схемотехніки, налагодження режимів та стабільної роботи свердловинних геоенергетичних систем (СГС) доводять позитивні тенденції збільшення продуктивності кожної окремої свердловини, яку переведено в геотермальний фонд або дуальний спосіб одночасного видобування залишкових вуглеводнів та теплової енергії надр.

Важливим результатом аналізу в розділі роботи є висновок достатності однієї нафтогазової свердловини трансформованої в дуально-суміщений фонд геотермально-вуглеводневого типу для видобування теплової енергії теплопродуктивністю до 3 – 5 МВт та *COP* на рівні 4 – 5 одиниць. Не менш важливим став висновок, що наявні масиви термобаричних параметрів теплообмінних елементів нафтогазових об'єктів, таких як колони нафтогазових свердловини та трубопровідні мережі, обумовлюють перспективу розвитку наукової тематики дисертації.

Аналіз літературних джерел засвідчив, що, не дивлячись на значну кількість робіт, присвячених математичному моделюванню термогазодинамічних процесів у розкритих свердловинами продуктивних пластах, відсутній системний підхід до математичного опису процесів у системі видобування «флюїд-геотепло».

Виходячи із сучасного стану дослідження проблеми, автором сформульовано мету і задачі дисертаційної роботи.

У другому розділі викладено методи і особливості досліджень тепломасообмінних процесів в просторових елементах системи вилучення «флюїд-геотепло». Зокрема, деталізуються методи дослідження процесів суміщеного свердловинного видобування геотепла та вуглеводнів при сайклінг-процесі в режимі підтримування пластового тиску. Цей розділ завершено формуванням робочих трендів розбудови теоретичних основ тематичного характеру та конкретизацією методологічних інструментів уможливлення отримання адекватних та достовірних результатів. Розглядаючи суміщений технологічний процес видобування «флюїд-

геотепло» як цілісну множину субпроцесів у сукупності відношень і зв'язків між ними, обґрунтовано унікальність структури та по-процесної схеми-моделі.

В третьому розділі розроблена перспективна технологічна схема геотермальної системи, що враховує двостадійне паралельне помпування тепла від приколонного простору та пласта відкритої геотермальної односвердловинної системи, що має бокові стволи розгалуження вибою. При цьому враховано можливість встановлення теплообмінників вибійного теплового насосу на мережевій системі вибою за рахунок довжин бокових стволів з індивідуальними привибійними зонами.

Розроблена феноменологічна модель містить три основні підвиди субпроцесів – тепломасоперенесення, теплоперенесення, тепло-механічна трансформація.

В цьому розділі розроблені наступні залежності і формули, що їх виражають.

Формула залежності узагальненого коефіцієнта теплопередачі «навколишнє середовище (пласт) – трубопровідна ділянка вибійної системи свердловини» K_t від коефіцієнта внутрішньотрубної акомодації енергії k_o, чисел Рейнольдса Re та Прандля Pr, теплопровідності флюїду-теплоносія.

Унікальність формули полягає в урахуванні залежності узагальненого коефіцієнта теплопередачі K_t на вибійній лінії від споживчого навантаження на гирлі W_T, що обумовлює баланс типу «теплопродуктивність по геотермальній енергії – споживче навантаження СГС».

Розроблена формула для оцінки *COP* закритої односвердловинної СГС з перспективною геометричною топологією вибою типу «біляче колесо» описує один з розроблених підходів до збільшення питомої ефективної теплопродуктивності на одиницю витраченої енергопотужності (*COP*) вибійної системи трубопроводів розгалудженої структури.

Розроблена модифікована формула Адамова для неізотермічного ліфтингу-притоку-виснаження з гомогенним двофазним флюїдом та нахиленою до вертикалі колоною.

Запропонована автором модифікована формула вигідно відрізняється від відомих аналогів можливістю розрахунку не тільки видобування, але й зберігання вуглеводнево-геотермального флюїду, враховує падіння пластового тиску при суміщеному вилученні геотермального флюїду та теплової енергії. При цьому для розрахунку висхідної або низхідної трубопровідної лінії свердловини в формулі змінюються лише три знаки в лівих дужках на протилежні.

Запропонована формула розрахунку гідравлічного опору з врахуванням за допомогою булевої алгебри 7-ми діапазонів зміни чисел Рейнольдса Re та тертя ковзання λ_s при транспортуванні газорідинної суміші (флюїду) по трубопроводу з діаметром D та шорсткістю стінок k_e.

Новизна такого підходу розрахунку гідравлічного опору λ_полягає у використанні аналітико-алгоритмічної формули, яка є перевіреною

галузевою практикою по всіх окремих компонентах-членах формули для рідин та газів.

В результаті розробки та використання нових зазначених формул та залежностей розроблено нову методику введення температурної поправки одночасно за ефектом Джоуля-Томсона, тепломеханічним ефектом і коефіцієнтом акомодації в розрахунках гідравлічного опору, масової витрати та теплопродуктивності трубопроводу/свердловини вертикального, горизонтального та нахиленого типу як системи з розподіленими параметрами, що працює від гідродинамічно ізольованого підземного резервуару.

В рамках розділу 3 дисертації із використанням положень класичної газової динаміки і напрацювань зарубіжних та вітчизняних вчених запропонована система рівнянь неізотермічного руху реального флюїду на ділянці розгалуженого нахиленого вибійного та шлейфового трубопроводу, яка складається із рівнянь руху, нерозривності та енергії газового потоку, включає рівняння теплообміну з зовнішнім середовищем та теплоперенесення геотермальної енергії з масою.

Сформовані початкові та граничні умови, що враховують специфіку експлуатації розгалужених продуктопроводів. Розроблений обчислювальний алгоритм і програмне забезпечення для реалізації математичної моделі. Для перевірки адекватності математичної моделі за розробленою програмою виконані теплогідравлічні розрахунки модельного продуктопроводу при стаціонарному режимі перекачування мережі. Одержані результати порівнюються з результатами розрахунку стаціонарного руху за традиційними методиками. Порівняння засвідчило, що різниця результатів розрахунків за двома методиками не перевищує 1 %, що є одним із свідчень адекватності запропонованих математичних моделей. Із використанням даних експлуатації промислових продуктопроводів та шлейфів свердловин і трубопровідних мереж ПАТ «Укргазвидобування» та ПАТ «Укртрансгаз», проведено дослідження закономірностей режимів роботи модельного газопроводу, колон та шлейфів свердловин. Результати досліджень квазіусталених режимів роботи модельного газопроводу оформлені у вигляді діаграм і графіків, приклади яких наведені в графічній частині роботи.

У четвертому розділі викладено результати прогнозування ефективності системи суміщеного видобування «флюїд-геотепло» для виснажених родовищ, показані системні дослідження і формування феноменологічної моделі суміщеного процесу видобування «флюїд-геотепло», проведено моделювання в системі видобування «флюїд-геотепло» продуктивного пласта і вибійної системи свердловини, мережевого типу та з різновидами геометричної топології.

Саме такий спосіб використання родовищ є найбільш перспективним для України, де є понад 300 виснажених газоконденсатних родовищ, в пластових флюїдах нафтогазових і нафтогазоконденсатних родовищ пізньої стадії розробки завжди присутній природний газ.

На першому етапі розроблено математичну модель та алгоритмічні конструкції в системі Matcad неізотермічного радіального притоку та ліфтингу (евакуації по внутрішній порожнині НКТ) видобувної газоподібної суміші (геотермального флюїду) свердловини, що враховує динамічний коефіцієнт теплопровідності та теплової дифузії, які детермінуються геотермальним градієнтом по глибині та/або за радіусом продуктивного пласта, різницею температур порода-флюїд в робочих умовах; враховує коефіцієнт дроселювання флюїду при неадіабатичному процесі, вплив середньоінтегральної температури середовища на ефективність теплопередачі, зміну молярної маси видобувного флюїду протягом терміну експлуатації свердловини, а також процес охолодження продуктивного пласта на первинному етапі (місяці – роки) експлуатації свердловини.

На другому етапі виконано порівняльний аналіз результатів моделювання ліфтингу теплоносія в геотермальній свердловині газоконденсатного родовища за функціями відгуку: температура флюїду на гирлі; масова витрата флюїду через свердловину; дебіт свердловини при таких варіативних параметрах: пластовий тиск та температура; свердловини; коефіцієнт теплопередачі «гірські породи – флюїд»; молярна маса транспортованого флюїду.

На третьому етапі виконано польові дослідження вимірювання пластових та гирлових температур і порівняти їх з розрахунковими (2006 – 2015 рр.). Окрім традиційних рівнянь моделі таких систем було розроблено рівняння теплообміну в інтегральній формі.

Після цього, застосовано авторську математичну модель для моделювання тонких продуктивних пластів, в яких флюїд рухається через проникний диск-«шайбу» в зустрічно-теплообмінному режимі.

Це дало можливість оцінювати ефект теплового прориву через відносно-тонкий пласт при підтримуванні пластового тиску та одночасному видобуванні дуально-суміщеним способом як тепла надр так і вуглеводнів.

В основу математичної моделі розподілу потоків у кільканитковому продуктопроводі, окрім математичних моделей, наведених вище, покладені рівняння балансу обсягів флюїду та енергії для кожної характерної точки складної трубопровідної системи.

Розроблена також математична модель розподілу потоків у розгалужених продуктопроводах СГС з урахуванням сезонних змін умов перекачування та споживання енергоресурсів. Об'єктом моделювання є односвердловинна розгалужена СГС з довільною кількістю ділянок - вибоїв, теплові насоси якої оснащені різними типами приводу. На будь-якій ділянці продуктопроводу може передбачатися довільна кількість відгалужень і відводів. Особливість розгалуженого продуктопроводу полягає у тому, що його можливості щодо обсягів подачі теплоносія-сировини по кожному відводу повинні бути не менші від потреб споживачів. Останні змінюються за певними законами протягом доби по годинах, протягом місяця по днях і протягом року по місяцях.

Моделювання в останніх двох системних алгоритмах окремої мережі продуктопроводів та мережевих теплообмінників з точки зору тепломасообміну виконувалось з використанням субмоделі пасивної субмережі із системою математичних рівнянь у векторно-матричній формі на базі двошарового бонд-графу.

В роботі також проаналізовано та розроблено технологічні схеми утилізації геотермальної енергії надр, дуально-суміщеного видобування та дуального видобування-зберігання.

Показано, що малодебітні свердловини по нафті або газу можуть отримати «друге дихання» при інтенсивному використанні геотермальних ресурсів з особливостями продуктивних і виснажених горизонтів. Ключовий крок до форсованої геоенергетики на нафтогазопромислових об'єктах – використання суміщених технологій і вдосконаленого інжинірингу в виробничих процесах нафтогазовидобутку та ПСГ на заключних стадіях розробки та експлуатації резервуар-об'єктів родовищ.

У п'ятому розділі виконано моделювання контурів циркуляції монарних та бінарних геотермальних систем в дуальному режимі видобування «флюїд-геотепло», викладено результати практичної реалізації розроблених математичних моделей.

З метою апробації розробок виконані багатоваріантні розрахунки теплопродуктивнсості, пропускної здатності та енерговитратності СГС, оцінено *COP*. За фактичними даними промислової геофізики з вимірюванням температур на різних глибинах ДДЗ 30 нафтогазових родовищ та більше як 300 свердловин з вибірки 3000 свердловин статистично опрацьовано та побудовано залежність прогнозованої потужності СГС для масового дебіту 25 кг/с.

Показано, що раціональність режиму роботи СГС головним чином визначається чотирма такими складовими: *COP* – ефективність теплопродуктивності відносно енерговитрат; $CW_{l/market}$ – фактично-використана теплопродуктивність W_l відносно замовленого рівня споживання W_{market} $W_l/W_{market}=CW_{l/market}$; $CW_{\frac{n}{max}}$ – відсоток використання W_{max} як максимальної (досяжного рівня W_n) теплопродуктивності свердловини $W_n/W_{max} = CW_{\frac{n}{max}}$; $CW_{\frac{dw}{market}}$, – зменшення упущеного видобутку теплового георесурсу W_{max}-W_n відносно витребуваного замовленням ринкового навантаження $(W_{max}-W_n)/W_{market} =$ $CW_{\frac{dw}{market}}$

В координатах багатовекторної оцінки ефективності СГС розроблені математичні співвідношення та замкнені системи рівнянь для вищезазначених основних критеріїв.

У шостому розділі розроблено математичні моделі суміщеного процесу видобування «флюїд-геотепло» для свердловини Єфремівського та Ланівського газоконденсатних родовищ Дніпровсько-Донецької западини,

викладено результати розробки комплексу методів і технічних пристроїв, скерованих на підвищення раціональної та ефективної роботи СГС. Для цього розроблено та оцінено різні топологічні варіанти вибійних теплообмінників, зокрема один типу «біляче колесо» показано в роботі. Визначено найважливіші геометричні та фізичні параметри, які обумовлюють збільшення питомої теплопродуктивності теплообмінного обладнання на вибої. Для топології «біляче колесо» *COP* обчислюється за розробленим рівнянням. Теоретичним завданням є підвищення *COP* з можливим зменшенням розбуреного і включеного об'єму флюїдонасичених порід пласта-колектора з конвективним теплообміном.

Теоретичні та експериментальні дослідження, виконані автором у розділах 2 – 4, довели, що складна конфігурація продуктопроводів та вибоїв призводить до того, що у певних елементах СГС виникають надлишки енергії у вигляді тиску або температур флюїду, який неможливо використати безпосередньо на лише видобування флюїду. Такі надлишки рекомендовано долучати для збільшення обсягів зберігання вуглеводнів або інших синтезованих газів в ПСГ. Для підвищення ефективності роботи СГС доцільно використати цей запас енергії, перетворивши її на той чи інший вид енергії. Енерговитратність також суттєво залежить від стану труб, що характеризується величиною шорсткості, а також від наявності гідратних та інших скупчень. Вплив зазначених чинників на пропускну здатність та гідравлічну енерговитратність характеризує коефіцієнт гідравлічної ефективності. Підтримання цього коефіцієнта на рівні, близькому до одиниці – одне із важливих завдань при експлуатації СГС.

Запропонована геометрична топологія геотермального теплообмінника типу "меридіанний еліпсоїд" (геометричне скруглення «білячого колеса») на вибої свердловини з оребренням трубних каналів теплопровідними матеріалами (Показано топології III - IV типів): а – ребристий «меридіанний еліпсоїд» з ігольчатою поверхньою напівзанурений в пласт; б – “меридіанний еліпсоїд” з розвиненою ребрами теплообмінну площу.

Аналізуючи схему енергетичного балансу СГС, можна відзначити незамкненість енергетичної системи в цілому. З метою оптимізації енергетичного балансу СГС пропонується метод, суть його полягає у частковому закільцюванні енергосистеми для об’єктів ПСГ, нагнітальні лінії, ДКС, підтримування пластових тисків, сайклінг-процесів.

Технічна реалізація даного методу можлива з використанням існуючої мережі промислових об’єктів, електропостачання та наявних конструкцій свердловин та теплообмінників. Для балансування та раціоналізації енергологістики виконано статистичну обробку даних про видобування, зберігання та споживання природного газу 6 областей Східної України. Слід відзначити, що запропонований автором метод оптимізації енергобалансу УКПНГ – СГС – ПСГ не тільки дає значну економію енергоресурсів, але і має помітний екологічний ефект за рахунок зменшення обсягів викидів продуктів згорання вуглеводнів в атмосферу. Одним із перспективних

напрямків утилізації надлишків енергії флюїдів як гідравлічного так і теплового характеру рекомендовано використання когенераційних пристроїв.

У сьомому розділі викладено результати впровадження у виробництво наукових результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи у вигляді методик розрахунків та програмних алгоритмів передані для використання в УкрНДІгаз, ТОВ «Карпатигаз», УМГ «Харківтрансгаз» та Інститут транспорту газу. Висновки дисертаційного дослідження у вигляді рекомендацій щодо створення суміщених систем вилучення енергоресурсів свердловинами, що підтверджено «Актами..» про фактичний та очікуваний економічний ефект від впровадження результатів науково-дослідних робіт у співавторстві Фика М. І. за 2010 – 2020 рр., містять практичні напрацю-вання автора згідно з науковими положеннями дисертаційної роботи, у відповідності до яких економічний ефект склав 613,8 тис. грн./рік.

3. Ступінь обґрунтування наукових положень, висновків і рекомендацій

Основні висновки згідно сформульованих задач, основних підсумків в розділах дисертації, наукової новизни та практичної цінності досліджень є наступними:

1) Розроблена феноменологічна модель геотермальної односвердловинної системи суміщеного «флюїд-геотепло» видобування та загальної логістики геотермальних ресурсів свердловин дозволила сформувати комплексну математичну модель СГТС з функціями визначення теплопродуктивності та *COP*. Застосування запропонованого теоретико-методологічного підходу до моделювання СГТС включає послідовну розробку: принципової технологічної схеми геотермальної системи; схеми трансформації та руху енергії та теплоносія; феноменологічної моделі геотермальної системи; аналіз і моделювання субпроцесів і отримання їх математичних моделей і на цій основі математичної моделі геотермальної моделі в цілому;

2) Розроблено математичні моделі окремих субпроцесів суміщеного «флюїд-геотепло» процесу видобування та загальної логістики геотермальних ресурсів свердловин:

– модель геотермального резервуару газоконденсатної свердловини, яка враховує зміни теплопровідності гірських порід від бортів до вибою свердловини. Модель включає уточнені рівняння теплового балансу енергії при радіальній фільтрації продукції свердловини, що містять конвективну та кондуктивну складову теплообміну та тепло припливу, що дозволяє у порівнянні з відомими методичними підходами уточнити на 12-14% прогноз відбору тепла з геотермального резервуару на вибої газоконденсатної свердловини;

– модель вибою відкритої геотермальної системи «теплообмінник-гірський масив» за коефіцієнтом перетворення теплоти *COP* геотермального теплообмінника в привибійній зоні теплоприймання;

– модель внутрішньосвердловинних теплообмінників для боротьби з гідратоутворенням в нагнітальних свердловинах, які включають схему внутрішньосвердловинного теплообмінника з геотермальним теплоносієм, що подається через теплообмінну поверхню нагнітальної свердловини в продуктивний пласт нафтового родовища і математичний апарат для опису процесу утилізації тепла та теплообміну в нагнітальній свердловині;

– модель неізотермічного нестаціонарного руху газорідинної суміші вуглеводнів у трубопроводі від вибою свердловини до сепараційної установки промислу, яка відрізняється від відомих одночасним врахуванням ефекту Джоуля-Томсона і акомодації енергії. Встановлено, що оцінка гідравлічного опору і падіння тиску за розробленими залежностями на 95 % збігається зі стандартизованими. Запропонована система рівнянь вигідно відрізняється від відомих урахуванням внутрішнього конвективного теплообміну, оціненого по інтегральному ефекту Джоуля-Томсона;

– модель процесу транспортування газу в багатонитковому промисловому трубопроводі мережевого типу, яка дозволяє визначити інтегральний коефіцієнт трансформації (*COP*) для мережевої трубопровідної системи, що включає теплові насоси.

3) Виділено новий різновид теплового насосу як пристрою з розподіленими параметрами, який являє собою багатонитковий розгалужений продуктопровід, що переносить низькопотенційну теплову енергію з оточуючого середовища у трубопровідний контур. Розроблена теоретико-емпірична формула визначення коефіцієнту Джоуля-Томсона, яка дозволяє оцінити вплив ефекту цього теплового насосу на енергетичні та термобаричні параметри газотранспортних процесів.

4) Показано, що в районі Дніпровсько-Донецької западини свердловини з кам'яновугільних відкладів (глибиною до 3 – 4 км) володіють потенціалом 0,4 – 4,5 МВт теплової енергії.

5) Проаналізовано чотири геометричні топології геотермальних теплообмінників нафтових свердловин з закритими бічними стовбурами-розгалудженнями. Встановлено, що ключовими параметрами, що впливають на *COP* геотермального теплообмінника, є: геометричний радіус рухливої пластової рідини, радіус трубопроводів з циркулюючим теплоносієм, діаметр кластерного теплообмінника, площа теплообміну з урахуванням штучного оребрення або інш., параметри теплового опору гірських порід у привибійній зоні теплоприймання.

6) Показано, що запропонована схема внутрішнього вибійного теплообмінника з геотермальним теплоносієм забезпечує використання термобаричної енергії геотермального джерела свердловини для усунення гідратів біля вибою колони нагнітання. Встановлено, що теплопродуктивність однієї геотермальної свердловини, задіяної на нафтових глибинах ДДЗ, достатня для усунення накопичування гідратів у 1 – 3 нагнітальних свердловинах, що визначає доцільність їх спільної роботи.

7) Показано, що у мережі трубних систем свердловин виникає ефект теплового насосу, який обумовлює перенесення низькопотенційної теплової

енергії з оточуючого середовища у трубопровідний контур. Зокрема, зміна температур ґрунтового масиву ±10°С на ділянках транспортування газу багатониткової системи загальною довжиною 20 км спричиняє зміну тиску газу в межах 5–15 %. Ступінь впливу температур ґрунтового масиву на тиск транспортованого газу прямо пропорційно залежить від транзитного і внутрішнього завантаження трубопровідної системи.

8) Для трубного теплообмінника «навколишнє середовище-теплоносій» в частині оцінки гідравлічних втрат збіжність результатів розрахунків коефіцієнта гідравлічного опору окремої трубної ділянки по формулі Лейбензона і запропонованої отримано на рівні 95% для охолоджуваного потоку газорідинних сумішей при швидкостях в діапазоні 5 – 50 м/с.

9) Розроблена математична модель неізотермічного радіального притоку та ліфтингу видобувної газоподібної суміші свердловини, що врахувала фактичні зміни теплопровідності гірських порід по глибині в залежності від їх температури (усталенні значення в динаміці), а також зміни температури видобувного флюїду від дроселювання в привибійній зоні та стовбурі свердловини, дозволила уточнити прогнозування масового дебіту свердловини на 10 – 15%, обсягів видобутого тепла – до 20 – 30%.

10) Розроблена математична модель неізотермічного процесу транспортування геотермального двофазного флюїду-теплоносія з теплообміном по мережі вибійної частини закритої свердловинної геотермальної системи на базі двошарового бонд-графу з врахуванням динаміки зміни коефіцієнта теплообміну при різних та усталених температурах пластового середовища зовні окремих нижніх та верхніх ділянок 3D-мережі, що надало можливість уточнити режими роботи в такій мережі та уточнену сумарну теплопродуктивність теплообмінника типу скруглене «біляче колесо».

4. Наукова новизна отриманих результатів.

У дисертаційній роботі у результаті виконання експериментальних та теоретичних досліджень вперше:

– розроблена комплексна по-процесна (феноменологічна) модель геотермальної свердловинної системи суміщеного «флюїд-геотепло» вилучення геотермальних флюїдів свердловин, яка включає п′ять субпроцесів: вилучення геотермальної енергії з пласта-колектора та приколонного простору; передачу її через перехідну зону «пласт-вибій свердловини», по свердловині та поверхневими системами до споживача, що дозволило встановити послідовність та взаємозв'язок всіх елементарних процесів трансформації та руху енергії і теплоносія в геотермальній свердловинній системі; розроблені математичні моделі вказаних субпроцесів, які складають комплексну математичну модель геотермальної свердловинної системи;

– розроблена модель геотермального резервуару газоконденсатної свердловини, яка враховує зміни теплопровідності гірських порід від бортів до вибою свердловини. Модель включає уточнені рівняння теплового

балансу енергії при радіальній фільтрації продукції свердловини, що містять конвективну та кондуктивну складову теплообміну та теплоприпливу. Це дозволяє у порівнянні з відомими методичними підходами уточнити на 12 – 14% прогноз відбору тепла з геотермального резервуару на вибої газоконденсатної свердловини;

– розроблено математичну модель геотермальної системи «теплообмінник-гірський масив» за коефіцієнтом перетворення теплоти геотермального теплообмінника в привибійній зоні теплоприймання. Встановлено, що ключовими параметрами впливу на коефіцієнт перетворення теплоти геотермального теплообмінника є: радіус дренування флюїдів при теплообмінному процесі, радіус трубопроводів з циркулюючим теплоносієм, діаметр кластерного теплообмінника, параметри теплового опору порід у привибійній зоні теплоприймання. Дана кількісна оцінка впливу цих параметрів на коефіцієнт перетворення теплоти геотермального теплообмінника;

– удосконалені теоретико-методологічні основи розрахунків внутрішньосвердловинних теплообмінників для боротьби з гідратоутворенням в нагнітальних свердловинах, які включають схему внутрішньосвердловинного теплообмінника і відрізняються тим, що як теплоносій в суміщеному процесі вилучення «флюїд-геотепло» використано суміш вуглеводнів, яка подається через теплообмінну поверхню нагнітальної свердловини в продуктивний пласт нафтового родовища і математичний апарат для опису процесу утилізації тепла та теплообміну в нагнітальній свердловині;

– розроблена математична модель неізотермічного руху газорідинної суміші вуглеводнів у трубопроводі від вибою свердловини до сепараційної установки промислу, яка відрізняється від відомих одночасним урахуванням внутрішнього конвективного теплообміну, інтегрального ефекту Джоуля-Томсона і акомодації енергії. Встановлено, що оцінка гідравлічного опору і падіння тиску за розробленими залежностями на 95 % збігається зі стандартизованими, що дозволило підвищити точність розрахунку втрат напору по трубопроводу з теплообміном на 4.7% в діапазоні об'ємних витрат 0,5-1 $м^3/с$;

– на основі використання методу електрогідравлічної аналогії розроблена математична модель процесу транспортування газу в багатонитковому промисловому трубопроводі, яка відрізняється від відомих врахуванням впливу теплових насосів і дозволяє визначити інтегральний коефіцієнт теплової трансформації для мережевої трубопровідної системи;

– виділено різновид теплового насосу як пристрою з розподіленими параметрами, який являє собою багатонитковий розгалужений продуктопровід, що переносить низькопотенційну теплову енергію з оточуючого середовища у трубопровідний контур. Розроблена теоретико-емпірична формула визначення коефіцієнту Джоуля-Томсона, яка дозволяє оцінити вплив ефекту цього теплового насосу на енергетичні та термобаричні параметри газотранспортних процесів. Показано, що міжнитковий дросель

викликає ефект теплового насосу в приймаючій нитці трубопровідного контуру, спричиняє до локального нагріву транспортованого продукту-флюїду в одній зоні і охолодження в іншій і не містить спеціальних вторинних контурів теплопередачі, роль яких виконують окремі ділянки багатониткового трубопроводу, що дозволило збільшити точність визначення коефіцієнта перетворення теплоти на 5-7% в діапазоні сезонних перепадів температур.

5. Практична цінність отриманих результатів

Цінність отриманих результатів для практики полягає в тому що:

– вдосконалена методика розрахунку неізотермічного транспортування газоконденсатної суміші шляхом введення температурної поправки і коефіцієнта акомодації в розрахунках гідравлічного опору трубопроводу як системи з розподіленими параметрами. На основі аналізу розрахункових кривих за відомими методиками (формули Колбрука, Лейбензона і ВНІІГАЗу) для ізотермічних і неізотермічних процесів і пропонованої методики показані раціональні області їх застосування. Порівняння теоретичного і промислового експериментів показало достатню для інженерної практики точність розрахунку падіння тиску на ділянках нафтогазових шлейфів і дозволяє рекомендувати розроблені аналітичні залежності для впровадження в промисловий інженерії при швидкостях газорідинного потоку в діапазоні 0–50 м/с, шорсткості труб 0.01–0.05 мм і їх діаметрі 100–300 мм. Всі обчислення зроблені для реальних промислових трубопроводів Новотроїцького нафтогазоконденсатного родовища;

– виконано розрахунок сумарної геотермальної енергії необхідної для реалізації безгідратної роботи нагнітальної свердловини нафтового родовища за запропонованою схемою внутрішньосвердловинного теплообмінника. Встановлено, що потужність однієї геотермальної свердловини розкритої на нафтоносних глибинах Дніпровсько-Донецької западини достатня для ліквідації гідратоутворення в 1 – 3 нагнітальних свердловинах, що обумовлює доцільність їх сумісної роботи;

– використання розробленої математичної моделі геотермального резервуару газоконденсатної свердловини, яка враховує зміни теплопровідності гірських порід від бортів до вибою свердловини дозволяє уточнювати до 27% дебіт тепла свердловиною в умовах здійснення термобаричних методів інтенсифікації видобування газоконденсатною свердловиною;

– проаналізовано чотири геометричні топології геотермальних теплообмінників: I-II – прямолінійні вертикальний гладкий і оребрений трубопровід; III – IV – кластер у вигляді безлічі гладких і оребрених однотрубних елементів, що являє собою фігуру типу «біляче колесо» або «меридіанна сфера». Встановлено, що найбільш ефективним технічним рішенням що забезпечує збільшення COP свердловинних геотермальних систем є ребра теплообмінних труб. Для теплообмінників III типу

розрахункове збільшення COP в порівнянні з гладкими трубами складає 40%, а для III-IV типу – 95%;

– виконаний техніко-економічний аналіз геофізичних досліджень понад 300 промислових нафтогазових свердловин ДДЗ показав, що на базі нафтогазових свердловин ДДЗ можливе створення геотермальних станцій з глибинами буріння або розкриття свердловин до 3 – 4,5 км. При таких глибинах тепловий потенціал 90% геотермальних вод в продуктивних нафтогазових горизонтах кам'яновугільних відкладів не перевищує 108 ° С і тому його доцільно використовувати переважно для цілей геотермального теплопостачання. У цьому випадку заміна органічного палива та електрики теплом геотермальних вод та гірських порід виявляється набагато більш вигідною для забезпечення теплопостачання та опалення (в 3 – 5 разів). Дві свердловини з глибин кам'яновугільних відкладів здатні надати 0,4 – 4,5 МВт теплової енергії;

– сформульовано принципи побудови топології безгідратного багатониткового газопроводу із перемичками та відгалуженнями, що полягають у активації та регулюванні енерготрансформуючих та теплообмінних процесів на окремих ділянках газопроводу введенням додаткових дроселів перед перемичками та відгалуженнями трубопровідної системи, у зонах загрожених за корко- та гідратоутвореннями. Виконано розрахунок інтегрального коефіцієнта трансформації COP для пілотної мережевої системи трубопроводів з розподіленими параметрами.

6. Достовірність і обґрунтованість отриманих результатів підтверджується коректною математичною постановкою задач; відповідністю отриманих наукових результатів фундаментальним принципам теорії графів, тепло- та масообміну, системології та теорії подібності; обґрунтованим та фаховим використанням базових методів аналітичного та імітаційного моделювання; адекватністю розроблених моделей реальним технологічним процесам; задовільною збіжністю результатів теоретичних і експериментальних досліджень; застосуванням сучасних програмних пакетів для наукових обчислень, моделювання і дослідження систем видобування, транспортування та зберігання вуглеводнів та геотермальних ресурсів; широкою апробацією наукових висновків.

7. Зауваження по роботі.

7.1 В розділі 1 на рис.1.2 наведено класифікацію свердловинних геоенергетичних систем та стверджується, що дисертація охоплює розгляд бінарних технологій на базі вуглеводневих свердловин. В такому випадку не зрозуміло, чому в змісті розділів 2-7 не має окремих підрозділів, що пояснюють та висвітлюють особливості бінарних систем.

7.2 В математичних записах 1.12 на стор. 70 та системі рівнянь 2.12 на

стор. 130 назви двох окремих рівнянь переплутано місцями або потребує додаткового пояснення назва «рівняння фільтрації», яке також слід вважати рівнянням руху.

7.3 В формул 2.4 на стор. 126 і 3.21 на стор. 172, а також 3.24 на стор. 175 використано запис в змішаній системі одиниць. Але та сама формула 3.28 на стор. 179 показана в СІ. В чому причина відходження від системи одиниць СІ лише в записах одної формули Форчхеймера-Краснопольського?

7.4 На рис. 1.7 та рис. 3.10 пояснюється алгоритм роботи програми прогнозування видобування теплоносія вуглеводневого типу при суміщеному вилученні енергоресурсів, але повний алгоритм програми «Газдрайв», яку було модифіковано, не наведено. Чому?

7.5 В рівнянні 4.23 на стор. 236 наведено систему рівнянь побудованого двошарового бонд-графу але не вказано та не має повноцінного опису по яких параметрах синхронізуються гідродинамічний та термодинамічні шари графу.

7.6 В розділі 7 наведено розрахунок упущеної вигоди від реалізації семи свердловинних геоенергетичних систем на базі свердловин Сфремівського ГКР (таблиці 7.12-7.13). Якщо є зрозумілими тренди прогнозування параметрів об'єкту розробки газоконденсатного родовища на перспективу (таблиці 7.10-7.11), оцінено упущено вигоду за період 2012-2021 рр., то чому не виконані техніко-економічні розрахунки для майбутнього періоду часу?

7.7 В дисертації анонсуються інноваційні технічні та схемо технічні рішення, але не вказано - вони запатентовані чи патентоспроможні, на які прототипи чи аналоги спирались дослідження. Також не виписано чітко - які з таких пропозицій головні та які другорядні.

Вказані зауваження не носять принципового характеру і не знижують наукової цінності дисертації, деякі з них можна розглядати як побажання автору в подальшій науковій роботі.

8. Загальний висновок

Дисертаційна робота **«Теоретичні основи процесів тепло масообміну раціонального вилучення геотермальних флюїдів вуглеводневих свердловин»** є завершеною науково-дослідною працею, зміст і результати якої відповідають її назві та паспорту спеціальності. 05.17.08 — процеси та обладнання хімічної технології

Одержані дисертантом результати отримані вперше і мають наукову новизну. Наукова аргументація основних положень є переконливою, підтверджена результатами чисельних моделювань у сучасних програмних комплексах, результатами експериментальних досліджень і відповідає сучасному рівню. Дисертаційна робота є цілісною та логічно послідовною. Висновки за розділами і загальні висновки відповідають поставленим завданням.

Робота оформлена відповідно до вимог державних стандартів. Автореферат і публікації повністю відображають зміст дисертації. Кількість публікацій відповідає вимогам.

Вважаю, що дисертаційна робота «Теоретичні основи процесів тепломасообміну раціонального вилучення геотермальних флюїдів вуглеводневих свердловин» в повній мірі відповідає вимогам п.п. 9,10,12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. №567, а здобувач Фик Михайло Ілліч заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю зі спеціальності 05.17.08 — процеси та обладнання хімічної технології.

Професор кафедри
газонафтопроводів та газонафтосховищ
Івано-Франківського національного технічного
університету нафти і газу,
д.т.н., професор В.Я. ГРУДЗ