

ВІДГУК

офіційного опонента Ляпоценка Олександра Олександровича на дисертаційну роботу Фика Михайла Ілліча «Теоретичні основи процесів тепломасообміну раціонального вилучення геотермальних флюїдів вуглеводневих свердловин», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.17.08 — процеси та обладнання хімічної технології

Ступінь актуальності обраної теми. На відміну від вітрогенераторів та сонячних колекторів, свердловинна геоенергетична система (СГС) має ту перевагу, що вона вимагає набагато меншу питому площу на одиницю генерованої енергії. Тому за прогнозами експертів впродовж наступних 5 років глобальні потреби в потужності геотермальних теплоелектростанцій виростуть з 16 ГВт (з кінця 2020 року) до 22-24 ГВт (у 2025 році). Тільки в 2019 році в світі пробурено більше 200 свердловин для геотермальної енергетики, а відповідно до статистичних прогнозів (Renewable Capacity Statistics 2020 Міжнародного агентства відновлюваної енергетики IRENA) в 2025 році їх число зросте до 350-400 свердловин. Серед провідних країн-виробників геотермальної енергії за встановленою потужністю в секторі розбудови ГеоТЕС домінують США, Індонезія, Філіппіни, Туреччина, Італія, а лідерами з розбудови потужностей ГеоТС є КНР, США, Ісландія, Туреччина, Швеція, Японія та Німеччина.

Тому раціональне вилучення геотермальних флюїдів виснажених нафтогазових свердловин та термальних покладів серед існуючих технологій з альтернативної енергетики безсумнівно набуває актуальності, а це свідчить про актуальність теми та поставлених задач дисертаційних досліджень як на світовому рівні, так і для розвитку вітчизняної геотермально-вуглеводневої енергетики для інтенсифікації видобування енергоресурсів з надр та використання нерентабельних вуглеводневих свердловин в Україні.

Дисертаційна робота відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки й техніки на період до 2021 року (Закон України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», стаття 3, пункти 1, 3, 4).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі. Наукові положення, теоретичні висновки та практичні рекомендації, сформульовані у дисертаційній роботі, викладені в логічній послідовності, є достатніми і належним чином обґрунтованими. Великий обсяг матеріалів, зібраних в ході проведення наукових досліджень та експериментів, ретельно узагальнено і логічно проаналізовано. Наукові положення та теоретичні висновки у своєму логічному викладенні не суперечать фундаментальним положенням механіки суцільних середовищ, гідродинаміки, підземної гідравліки, термодинаміки, а також основним законам з теорій фільтрування, тепло- і масообміну. Достовірність результатів досліджень забезпечуються коректною постановкою і вирішенням задач досліджень, методами досліджень та аналізу, які застосовувались автором. Загальні висновки до дисертаційної роботи та висновки за окремими розділами, які наведено після кожного розділу окремим останнім підрозділом, викладено чітко та науково обґрунтовано, за винятком розд.6, в якому висновки наводяться окремим абзацом після кожного з підрозд.6.1-6.4.

Наукова новизна дисертаційних досліджень. Дисертаційна робота містить наукові положення та науково обґрунтовані результати у галузі процесів та обладнання хімічної технології, що розв'язують важливу науково-прикладну проблему, яка полягає в розробці теоретичних основ раціонального вилучення геотермальних флюїдів свердловинами вуглеводневих родовищ, що полягає у застосуванні суміщеного вилучення-видобування «флюїд-геотепло» для свердловин нафтогазових родовищ.

Наукова новизна проведених дисертаційних досліджень з формування феноменологічної моделі, яка відображає послідовність та взаємозв'язок всіх елементарних субпроцесів такого вилучення-видобування флюїд-геотермальних ресурсів, з розробкою математичних моделей цих субпроцесів, а потім на їх основі математичної моделі суміщеного процесу вилучення «флюїд-геотепло» в цілому є безперечною і полягає в наступному:

- вперше розроблена комплексна феноменологічна модель геотермальної свердловинної системи суміщеного вилучення геотермальних флюїдів свердловин, яка включає субпроцеси 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;

- вперше розроблена модель геотермального резервуару газоконденсатної свердловини, яка враховує зміни теплопровідності гірських порід від бортів до вибою свердловини і включає уточнені рівняння теплового балансу енергії при радіальній фільтрації продукції свердловини, що містять конвективну та кондуктивну складову теплообміну та теплоприпливу;

- вперше розроблено модель геотермальної системи «теплообмінник-гірський масив» за коефіцієнтом перетворення теплоти геотермального теплообмінника в привибійній зоні теплоприймання і встановлено ключові параметри впливу на коефіцієнт перетворення теплоти геотермального теплообмінника, а також визначено кількісну оцінку впливу цих параметрів на коефіцієнт перетворення теплоти геотермального теплообмінника;

- розширено уявлення про теоретичні основи внутрішньосвердловинних теплообмінних процесів для боротьби з гідратоутворенням в нагнітальних свердловинах, які відрізняються тим, що як теплоносії в суміщеному процесі вилучення «флюїд-геотепло» використано суміш вуглеводнів, яка подається через нагнітальні свердловини в продуктивний пласт нафтового родовища;

- отримала подальшого розвитку модель неізотермічного руху газорідинної суміші вуглеводнів у трубопроводі, яка відрізняється від відомих одночасним урахуванням внутрішнього конвективного теплообміну, інтегрального ефекту Джоуля-Томсона і акомодатії енергії, уточнено формулу визначення коефіцієнту Джоуля-Томсона, яка дозволяє оцінити вплив ефекту теплового насоса на енергетичні та термобаричні параметри газотранспортних процесів;

- доведено, що міжнитковий дросель викликає ефект теплового насоса в приймаючій нитці трубопровідного контуру, спричиняє до локального нагріву транспортованого продукту-флюїду в одній зоні і охолодження в іншій, не містить спеціальних вторинних контурів теплопередачі, роль яких виконують окремі ділянки багатониткового трубопроводу.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

- обґрунтовано раціональну геометричну топологію теплообмінників і встановлено закономірності ефективного вилучення геотермальної енергії з пласта-колектора нафти (газу) та приколонного простору, проведення її через перехідну кольматаційну зону «пласт-вибій свердловини» і ліфтування енергії по свердловині та транспортування поверхневими системами до споживача з урахуванням властивостей бокових гірських порід свердловини, колекторів, теплоносіїв, структури підземного теплообмінника, схемотехніки ефективного видобування, накопичення та зберігання енергоресурсів, геологічних та технологічних особливостей нафтогазоконденсатних родовищ, ресурсо- та теплопродуктивності нафтогазоносних та виснажених пластів-колекторів, що спрямовано на реалізацію суміщеного видобутку «флюїд – геотермальне тепло» як дуально-суміщеної технології вилучення енергоресурсів;
- запропоновано виділення різновиду теплового насосу як пристрою з розподіленими параметрами, який являє собою багатонитковий розгалужений продуктопровід, що помпує низькопотенційну теплову енергію з оточуючого середовища у трубопровідний контур;
- удосконалені теоретико-методологічні основи розрахунків внутрішньо-свердловинних теплообмінників для боротьби з гідратоутворенням в нагнітальних свердловинах, основи використання методу бонд-графів для мережевого трубопровідного теплообмінника вибою свердловини;
- встановлено, що найбільш ефективним технічним рішенням що забезпечує збільшення інтегрального коефіцієнта трансформації свердловинних геотермальних систем є ребра теплообмінних труб, що можуть бути доповненням в розглянутих геометричних топологіях типу «Біляче колесо» та «Меридіанна сфера»;
- запропоновано методологічний підхід та дієвий алгоритм з послідовних етапів та імплементації напрацьованих методів моделювання елементів схемної феноменології та технологічних вузлів технічної геоенергетичної системи для оцінки сумарного (суміщеного) свердловинного вилучення енергосировини (вуглеводнів) та геотермальної енергії від нафтогазових покладів;
- продемонстровано порівняння результатів моделювання за класичною теорією розробки вуглеводневих родовищ та вдосконаленого моделювання в умовах раціоналізації технологічної схемотехніки та реалізації суміщених процесів вилучення-видобування «флюїд-геотепло» на прикладі сайклінг-процесу.

Наукові результати та практичні рекомендації дисертаційної роботи використані при виконанні НДДКР НТУ «ХП», УкрНДГаз, Інститут транспорту газу, ПАТ «Укртрансгаз», ПАТ «Укргазвидобування», ТОВ «Карпатигаз» (впродовж 2011-2020 рр.). За відповідними актами про впровадження, які надано у додатках до дисертаційної роботи, що посвідчують використання отриманих результатів в промисловості у вигляді рекомендацій, схем та програмних алгоритмів щодо створення суміщених систем вилучення енергоресурсів свердловинами, фактичний економічний ефект для ТОВ «Карпатигаз» склав 263 тис. грн/рік, а очікуваний (підтверджений розрахунками) економічний ефект для ПАТ «Укргазвидобування» - 350,8 тис. грн./рік.

Загальна оцінка змісту дисертаційної роботи та її завершеність. Дисертація складається зі змісту, переліку скорочень і основних умовних позначень, вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел з 410 найменувань і чотирьох додатків, у яких наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи, список опублікованих праць за темою дисертації, інші допоміжні і довідкові матеріали. Повний обсяг дисертації становить 342 сторінки основного тексту та містить 61 рисунок і 23 таблиці.

У *вступі* обґрунтовано актуальність роботи, сформульовані мета і завдання досліджень, наукова новизна та практичне значення, наведені відомості про особистий внесок автора і апробацію отриманих результатів.

В *першому розділі* проведено огляд та аналіз проблеми освоєння геотермальних ресурсів вуглеводневих свердловин. На основі аналізу стану розвитку свердловинної геоенергетики розкриваються особливості теоретичних досліджень процесів тепломасообміну свердловинних геоенергетичних систем, практика експериментальних досліджень тепломасообмінних процесів свердловинних геоенергетичних систем, основні тенденції розвитку техніки та технологій свердловинної геоенергетики на базі родовищ нафти і газу. У результаті доведено актуальність теми дисертаційних досліджень, виділено та поставлено науково-прикладну проблему, визначено мету роботи та поставлено основні задачі досліджень, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети.

В *другому розділі* обрано основні базові методи проведення досліджень, зокрема, розкрито особливості досліджень тепломасообмінних процесів в окремих просторових елементах системи вилучення «флюїд-геотепло» шляхом деталізації специфіки методів досліджень процесів у трубних та пластових теплообмінних елементах, пласта-колектора, мережевих трубопровідних вузлів вибою та колон свердловин, теплопродуктивності та інтегрального коефіцієнту перетворення потужності свердловинних геоенергетичних систем, процесів тепломасообміну з урахуванням дроселювання та тепломеханічного ефекту.

В *третьому розділі* викладено результати системного дослідження і формування феноменологічної моделі суміщеного процесу вилучення «флюїд-геотепло», здійснено аналіз геометричних і топологічних особливостей руху флюїду та тепла в закритих і відкритих односвердловинних системах, розробку структурної та технологічної схеми руху флюїду та теплової енергії, по-процесній феноменологічної моделі-схеми вилучення геотермального флюїду вуглеводневою свердловиною, дослідження субпроцесів зони притоку до вибою та ліфтингу з комплексним врахуванням специфіки теплообміну по висхідній колоні, привибійній зоні та пласту-колектору, ліфтингу вологого газоподібного геотермального флюїду по вертикальній та нахилений до вертикалі колоні свердловини, прогнозування параметрів вилучення газорідного геотермального флюїду з урахування режимів розробки родовищ вуглеводнів.

В *четвертому розділі* наведено результати досліджень процесів тепломасообміну в пласті-колекторі та на вибої, зокрема визначено вплив параметрів теплообмінної поверхні та геометрії вибою на інтегральний коефіцієнт трансформації теплової потужності, особливості впливу топології вибійного теплообмінника на теплообмінні процеси, залежності масової витрати геотермального флюїду від термобаричних умов, коефіцієнту теплопровідності та молярної маси вуглеводневої суміші, залежності теплопродуктивності геотермально-вуглеводневої свердловини від радіусу дренування по пласту з урахуванням коефіцієнту теплообміну, представлено теоретичне обґрунтування методологічних основ прогнозування вилучення геотермальних ресурсів газоконденсатних родовищ на прикладі системи «пласт-привибійна зона-свердловина».

В *п'ятому розділі* наведені результати експериментальних досліджень тепломасообмінних процесів вилучення вуглеводнів-теплоносіїв на базі суміщених технологій. В розділі представлено два показових експерименти, які мають місце при стабілізації та інтенсифікації процесів вилучення та евакуації вуглеводнів, а також залежні від параметрів тепломасообміну в пласті та колоні свердловини: експериментальна оцінка теплопродуктивності та можливості її утилізації для запобігання гідратоутворень в нагнітальних вуглеводневих свердловинах нафтового родовища з використанням геотермального флюїду; експериментальне дослідження впливу гомогенізуючих вспінюючих поверхнево-активних речовин на масову витрату газоподібного геотермального флюїду свердловин.

В *шостому розділі* викладено результати експериментальних досліджень процесів вилучення геотермальних флюїдів свердловин, в тому числі оцінка теплопродуктивності свердловин Дніпровсько-Донецької западини, термобаричні та гідравлічні параметри заглиблених мереж трубопроводів шлейфових полів Новотроїцького родовища, параметри процесів тепломасообміну в свердловинах Ланівського родовища, показники виникаючого ефекту теплового насосу між трубопровідними ділянками свердловин Юліївського родовища.

В *сьомому розділі* описано рекомендації з раціонального вилучення геотермальних флюїдів Єфремівського та Юліївського вуглеводневих родовищ Дніпровсько-Донецької западини з розрахунком ефекту від впровадження результатів досліджень на Єфремівському газоконденсатному родовищі, а також вилучення геотермального флюїду при залученні свердловини із спостережного фонду Пролетарського підземного сховища газу.

У *висновках* до окремих розділів та загальних висновках до дисертаційної роботи викладаються здобуті у дисертації найбільш важливі наукові та практичні результати, які сприяли розв'язанню наукової проблеми з зазначенням кількісних показників одержаних результатів, обґрунтуванням достовірності результатів, формулюванням рекомендацій щодо їх практичного використання.

У *додатках* наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи, список опублікованих праць за темою дисертації, інші допоміжні і довідкові матеріали, які необхідні для повноти сприйняття основного тексту дисертації.

Автореферат ідентичний за змістом з основними положеннями дисертації і достатньо повно відображає основні її наукові результати, що отримані здобувачем, а обсяг відповідає встановленим нормам. Оформлення дисертації та автореферату відповідає вимогам МОН України. Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.17.08 — процеси та обладнання хімічної технології. Інформація про отримані результати у кандидатській дисертації «Зменшення енерговитрат газотранспортних систем з урахуванням сезонних чинників» (спеціальність 05.15.13 — трубопровідний транспорт, нафтогазосховища) в тексті докторської дисертації здобувача відсутня.

Повнота викладення результатів роботи в опублікованих працях. Основні положення та результати дисертаційної роботи у достатній мірі викладені в опублікованих 43 наукових працях, з них одна колективна монографія, 16 статей у наукових фахових виданнях України та 4 статті у фахових видання іноземних держав (у тому числі 8 статей у виданнях, які обліковуються наукометричними базами Scopus та Web of Science), 22 публікації у матеріалах та працях конференцій (у тому числі 4 публікації, які обліковуються наукометричною базою Scopus). Обсяг і зміст опублікованих праць повністю охоплює всі розділи дисертації, а також в достатній мірі відображає її зміст. Основні результати проведених здобувачем досліджень отримані самостійно, а особистий внесок здобувача в опублікованих у співавторстві роботах є визначальним. Особливо хочеться відмітити високу обізнаність автора щодо сучасного стану, основних тенденцій перспектив розвитку геоенергетики у світі і в Україні, а також наукової проблематики та програм міжнародних і вітчизняних фондів грантової підтримки фундаментальних досліджень та прикладних розробок з обраного напряму досліджень.

Академічна доброчесність. Дисертаційна робота містить необхідні посилання на наукові публікації інших авторів. При проведенні досліджень автор дотримувався принципів академічної доброчесності. В дисертаційній роботі та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати, порушень академічної доброчесності (академічного плагіату, самоплагіату, фабрикації, фальсифікації) не виявлено.

Зауваження щодо змісту і оформлення дисертації та автореферату, завершеності дисертації в цілому:

1. Перелік основних умовних позначень, наведений в дисертації на с.7-12, побудований не в алфавітному порядку, а це ускладнює користування ним.

2. Наведена на рис.1.2 з дисертації (рис.1 з автореферату) блок-схема з класифікацією СГС переобтяжена лініями зв'язку між блоками, які часто перехрещуються, що ускладнює її сприйняття. Як наслідок, важко навіть прослідкувати ієрархічну структуру між деякими блоками.

3. Система рівнянь (1.7) на с.53 з дисертації повністю дублює аналогічну систему рівнянь (1.1) на с.41, наведену раніше в дисертації, за виключенням лише кількох рівнянь (Громека, Лемба, Кірхгофа, Онзагера). Тому на с.53 достатньо було просто надати посилання на систему рівнянь (1.1), додатково зауваживши, які з рівнянь цієї системи не обраховувалися. В наступних розділах дисертації ця система рівнянь є вихідною при побудові моделей і наводиться ще декілька разів.

4. Відсутні пояснення, в чому полягає відмінність розробленої (рис.9 на с.22 з автореферату) і базової (рис.1.10 на с.91 з дисертації) технологічної схеми бінарної СГТС? Зазначена схема без змін зустрічається знов на рис.7.3 (с.330 в дисертації)

5. Розд.2 дисертаційної роботи включає частину авторських досліджень з вдосконалення методологічних інструментів, які логічно і доцільно було би перенести в розд.3 з метою наочної і доказової демонстрації їх використання при самостійному проведенні теоретичних досліджень для отримання нових наукових результатів.

6. На рис.3.5, 3.6 (с.171, 172 з дисертації відповідно) зона розташування легенд даних обрано невдало, частково затуляє область розташування даних з масової витрати (дебіту свердловини) M_q в залежності від пластової температури T_{pl} в діапазонах значень 354-360 К і 340-380 К відповідно.

7. На с.198 у тексті дисертації відсутні пояснення, з яких міркувань значення температури на глибині нейтрального шару прийнято рівним $T_S=280$ К.

8. Запис громіздких дробових рівнянь у три та більше поверхів знаменника (наприклад, рівняння (3) на с.16 з автореферату й аналогічне рівняння (4.7) на с.212 з дисертації) ускладнює їх сприйняття.

9. При розв'язанні системи рівнянь (наприклад, система рівнянь (4.8) на с.219 з дисертації) відсутні позначення системи рівнянь.

10. Залежність (4.15) на с.223 з дисертації та відповідна залежність (4) на с.16 з автореферату визначає не гідравлічний опір, а коефіцієнт гідравлічного опору (коефіцієнт гідравлічного тертя) λ для різних гідродинамічних режимів руху потоку середовища (флюїду).

11. З тексту дисертації незрозуміло, наведені у розд.5 на рис.5.4 (с.266 з дисертації) графічні залежності зміни термобаричних умов в свердловині є результатами авторських досліджень чи довідковими даними? Причому на двох з трьох двовимірних графіків, наведених на рис.5.4, відсутні значення на вісях координат, що не дозволяє відтворити ці дані, а тому надає лише якісну, а не кількісну оцінку.

12. У тексті розд.6 з дисертації відсутня оцінка достовірності одержаних результатів експериментальних досліджень процесів вилучення геотермальних флюїдів свердловин на промислових об'єктах з оцінкою похибок вимірювань.

13. Табл.7.1-7.8, 7.10 та рис.7.1 з дисертації, які повністю займають площу сторінки, слід віднести до додатків, а відповідні сторінки, на яких вони розташовані (с.301-313, 320), не враховувати в загальному обсязі дисертаційної роботи.

14. В дисертаційній роботі поставлено конкретні задачі досліджень щодо інтенсифікації та підвищення ефективності реалізації тепломасообмінних процесів, але не всі отримані результати доведено та показано кількісно з повноцінним статистичним описом.

Вказані зауваження не стосуються принципових положень дисертаційної роботи, а тому не зменшують її науково-практичної цінності та значимості роботи в цілому. Слід також зазначити, що вказані зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, а є лише дорадчими, дискусійними чи технічними.

Загальний висновок по дисертаційній роботі.

Дисертаційна робота Фика Михайла Ілліча «Теоретичні основи процесів тепломасообміну раціонального вилучення геотермальних флюїдів вуглеводневих свердловин» є завершеною науковою працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати у галузі процесів та обладнання хімічної технології, що в сукупності розв'язують важливу науково-прикладну проблему, яка полягає у розширенні уявлень про теорії гідромеханічних, теплових і масообмінних процесів і створенні теоретичних основ відповідних процесів стосовно інтенсифікації раціонального суміщеного видобування з вилученням геотермальних енергоресурсів при використанні для цього нерентабельних вуглеводневих свердловин нафтогазових родовищ для розвитку вітчизняної геотермально-вуглеводневої енергетики інноваційного типу.

За актуальністю, науковою новизною, обґрунтованістю та достовірністю наукових положень, висновків та рекомендацій, отриманими новими результатами та їх практичною цінністю дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.17.08 — процеси та обладнання хімічної технології та вимогам п.п. 9, 10, 12 та 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р., які висуваються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, а її автор, Фик Михайло Ілліч, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.08 — процеси та обладнання хімічної технології.

Офіційний опонент,

доктор технічних наук, професор, старший науковий співробітник,
професор кафедри хімічної інженерії
Сумського державного університету

О.О.Ляпощенко

Фик М.І.

