

## **ВІДГУК**

на дисертаційну роботу **Велігоцького Дмитра Олексійовича**  
**«Підвищення ефективності хіміко-технологічного процесу  
комплексної водневої термобарохімічної технології інтенсифікації  
видобутку вуглеводнів»**, представлену на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання  
хімічної технології

**Актуальність теми.** Основою багатьох сучасних методів та технологій інтенсифікації видобутку вуглеводнів є хіміко-технологічні процеси (ХТП), дія яких спрямована на підвищення проникності привибійної зони свердловини, або зміну хіміко-фізичних властивостей, насичуючих продуктивний пласт флюїдів, для поліпшення гідродинамічного зв'язку останнього зі свердловиною. В ІПМаш НАН України розроблено інноваційну технологію комплексного водневого термобарохімічного впливу (КВТБХВ), що поєднує одночасну хімічну, теплову та механічну дію, ХТП якої засновано на ефекті водневої активації фільтрації та дифузії в умовах протікання складних хімічних реакцій багатостадійного термогазохмічного процесу. Зазначена технологія пройшла пілотні впровадження на нафтогазових родовищах не тільки в Україні, але й за кордоном, отримано позитивні результати, що підтверджується наявними актами та свідчить про велику перспективність та актуальність такого методу.

Кожна окрема свердловина характеризується певними геолого-технічними та конструктивними особливостями. При цьому існує багато чинників та їх комбінацій, які стають причиною зниження продуктивності свердловин. Тому покращення роботи свердловини потребує індивідуального підходу до визначення проблеми та найбільш ефективного багатостадійного ХТП для її вирішення. Окремої уваги потребують лімітуючі стадії процесу, особливо ті, на яких генерується та використовується водень.

Тому дисертація Велігоцького Д.О. безперечно є актуальною, бо вона вирішує важливу науково-практичну задачу – підвищення ефективності хіміко-технологічного процесу однієї з перспективних вітчизняних технологій інтенсифікації видобутку вуглеводнів.

Актуальність теми дисертації підтверджується також тим, що вона виконувалась згідно науково-дослідних робіт в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України згідно з планами держбюджетних НДР НАН України та МОН України: «Создание научно-практических основ применения водорода в технологиях интенсификации добычи нефти, газа и газового конденсата» – по целевой комплексной программе «Водород в альтернативной энергетике и новейших технологиях» (ДР № 0111U006515), «Усовершенствование и подготовка к широкому внедрению водородной термобарохимической технологии интенсификации добычи нефти, газа и газового конденсата» – по целевой комплексной программе научных исследований НАН Украины «Стратегические минеральные ресурсы Украины» (ДР № 0113U005008), «Створення перспективної водневої технології підвищення дебіту та глибини вилучення нафти шляхом використання воденьгенеруючих наносуспензій» цільової програми наукових досліджень НАН України «Мінерально-сировинна база України як основа безпеки держави» (ДР № 0116U006391); «Наукові основи використання нетрадиційних технологій для підвищення ефективності видобутку енергоносіїв (нафти, газу) і виробництва енергії» (ДР № 0102U007249); «Покращення робочих характеристик сумішевих твердих ракетних палив шляхом використання нових компонентів та удосконалення технології їх отримання» за цільовою науково-технічною програмою НАН України «Дослідження і розробки з проблем підвищення обороноздатності і безпеки держави» (ДР № 0116U004399), де здобувач був відповідальним виконавцем окремих етапів роботи.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.** В дисертації використано комплексний підхід, який включає критичний аналіз літератури, експериментальні дослідження, фізичне та математичне моделювання. Робота є втіленням методології інтенсифікації хіміко-технологічних процесів видобування та переробки вуглеводнів шляхом використання об'єктно-орієнтованої активації, яку розроблено в ІПМаш НАН України. Для цього створено унікальний дослідницький комплекс, на якому проводилися експериментальні дослідження та фізичне моделювання кінетичних, хімічних, фільтраційно-дифузійних, тепломасообмінних, гідродинамічних та інших процесів в гетерофазних середовищах. Комп'ютерне моделювання процесу комплексного водневого та темобарохімічного впливу на породу та флюїд проводилося з використанням класичної математичної моделі, яка ґрунтується на розв'язанні системи рівнянь Нав'є-Стокса. Закон збереження імпульсу з урахуванням характеру фільтрації представлявся у вигляді законів Дарсі, Форхгеймера та Дарсі з урахуванням дифузії.

Усі висновки виконано на основі класичних методів інтерпретації експериментальних та теоретичних досліджень.

**Достовірність результатів досліджень.** Робота характеризується коректними постановками при виконанні фізичного моделювання складних процесів, результати яких підтверджено великим об'ємом експериментальних досліджень. Для цього створено унікальний дослідницький комплекс, на якому проводилися експериментальні дослідження та фізичне моделювання кінетичних, хімічних, фільтраційно-дифузійних, тепломасообмінних, гідродинамічних та інших процесів в гетерофазних середовищах. Результати досліджень одержано з використанням сучасних хіміко-аналітичних методів вимірювання та аналізу. Використано також термометрія, хроматографія, спектральний аналіз та інш. Верифікацію удосконаленої математичної моделі проведено шляхом

порівняння з результатами фізичного моделювання та експериментальних досліджень.

**Повнота викладу основних наукових положень дисертації в опублікованих працях.** Основні положення дисертації викладено у 41 науковій праці, з яких: 7 статей у наукових фахових виданнях України (2 – у міжнародній наукометричній базі *Scopus*, 1 – у міжнародній наукометричній базі *Web of Science*; 6 – патенти України; 27 – матеріали науково-технічних конференцій. Рівень і кількість публікацій та апробації матеріалів дисертації повністю відповідають вимогам МОН України.

Наведені у публікаціях матеріали повністю відображають науково-практичні положення дисертації.

**Автореферат** є ідентичним за змістом дисертації і повністю відображає основні положення та наукові результати, які отримані здобувачем.

**Наукова новизна роботи.** В роботі представлено декілька важливих наукових результатів, які мають усі ознаки новизни:

– розроблено та створено сучасний експериментальний комплекс, який водночас є унікальним засобом вимірювання, що дозволяє в умовах високих тисків та температур досліджувати кінетику хіміко-технологічних процесів КВТБХВ, проводити фізичне моделювання комплексного впливу на зміну фільтраційно-ємнісних характеристик та проникності гірської породи. При цьому відтворюються технологічні особливості здійснення ХТП зазначеної технології та пластові умови;

– розвинуто та втілено методологію інтенсифікації хіміко-технологічних процесів видобування та переробки вуглеводнів шляхом використання об'єктно-орієнтованої активації. Зокрема, запропоновано методи активації, що впливають на характер протікання та підвищення

ефективності багатостадійного термобарохімічного процесу, зокрема його водневих стадій;

– запропоновано до використання, удосконалено технологію синтезу та досліджено вплив активаторів горіння, які підвищують та утримують температуру високотемпературної водневої стадії ХТП на рівні, достатньому для здійснення процесів гідрокрекінгу;

– розроблено методику досліджень впливу різних за характером протікання ХТП технології КВТБХВ на відновлення проникності та фільтраційно-ємнісних характеристик закольматованих природних кернів. Методика інтерпретації результатів досліджень дозволяє визначати найбільш ефективний за характером протікання тип хіміко-технологічного процесу для використання на свердловинах з різними за конструкціями, пластовими умовами та причинами зниження продуктивності;

– запропоновано методику уточнення математичної моделі процесу, в якій ураховуються результати експериментальних досліджень у вигляді функції зміни проникності гірської породи під час протікання нестационарного процесу її відновлення внаслідок комплексного водневого термобарохімічного впливу.

**Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.** Використання створеного дослідницького комплексу, розроблених методик проведення досліджень та інтерпретації їх результатів дає змогу вирішувати важливу науково-практичну задачу щодо підвищення ефективності ХТП багатостадійної водневої термобарохімічної дії на продуктивні горизонти нафтових та газових свердловин з метою підвищення їх продуктивності.

Широкі можливості розробленого дослідницького комплексу дозволяють його використовувати як для досліджень кінетики протікання хіміко-технологічного процесу комплексного водневого і термобарохімічного впливу та різних методів інтенсифікації видобутку

вуглеводнів, так і інших термогазохімічних процесів, в тому числі з генеруванням водню.

Удосконалено технологію та відновлено установку з синтезу полімерного нітрилу параціану, який може бути використаним не тільки як активатор протікання високотемпературної водневої стадії хіміко-технологічного процесу, але й як компонент сумішевого твердого ракетного палива.

Ґрунтуючись на результатах фізичного та постадійного комп'ютерного моделювання водневого термобарохімічного впливів, алгоритм розробки хіміко-технологічного процесу та підготовки до впровадження технології комплексного водневого і термобарохімічного впливу дозволяє проводити якісну підготовку до імплементації досліджуваної технології на різних родовищах з прогнозуванням передбачуваного ефекту.

Результати дисертаційних досліджень успішно використано під час дослідно-промислових впроваджень технології на свердловинах України, Індії, Грузії та Туреччини.

**Оцінка змісту дисертації.** Дисертація Велігоцького Д. О. складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків та за своїм змістом характеризується логічним та послідовним висвітленням комплексу питань, поставлених у задачах дослідження.

**У вступі** обґрунтовано актуальності теми дисертації, наведено зв'язок дисертації з державними науковими програмами, сформульовані мета та задачі досліджень, надано дані про використані наукові методи та окреслено наукову новизну та особистий внесок здобувача. Наведено інформацію про публікації та апробацію викладеного в дисертації матеріалу.

**У першому розділі** автором проведено критичний аналіз інформаційних джерел щодо існуючих методів та технологій інтенсифікації видобутку вуглеводнів, в основу яких покладено хіміко-технологічні

процеси. Найбільш ефективними серед них є ті, що комплексно впливають на продуктивний горизонт, поєднуючи ефективні тепловий, хімічний та баричний (механічний) впливи на продуктивний горизонт. Визначено, що однією з найбільш ефективних технологій інтегрованої дії на пласт є технологія комплексного водневого термобарохімічного впливу, ХТП якої ґрунтується на ефекті водневої активації процесів дифузії та фільтрації флюїду в пористому середовищі гірської породи. Обґрунтовано необхідність та доцільність, а також шляхи підвищення ефективності хіміко-технологічного процесу зазначеної технології. Наведено структуру досліджень.

**Другий розділ присвячено** створенню експериментального комплексу, необхідного для проведення досліджень кінетики протікання ХТП та фізичного моделювання КВТБХВ на фільтраційно-ємнісні характеристики та проникність гірської породи продуктивних горизонтів нафтових та газових свердловин. Розроблено методика проведення експериментальних досліджень кінетики зазначеного ХТП, за якою на створеному дослідницькому комплексі проведено дослідження хіміко-технологічного процесу, утворюваного технологічними рідинами з базовим хімічним складом. Одержані у вигляді графічних залежностей експериментальні дані, дозволили зробити висновки про неефективність водневих (низько та високотемпературних) стадій базового ХТП та необхідність проведення подальших досліджень щодо вирішення цієї проблеми.

**Третій розділ** присвячено розробці методів підвищення керованості водневих стадій ХТП, які є лімітуючими, та створенню методики визначення їх ефективності. Підвищення ефективності низькотемпературної водневої стадії досягнуто шляхом використання в складі базової системи горючо-окиснювальні склади – гідрореагуючі речовини (ГОС-ГРР) суміші до 50 % пасивованих гранул від загальної кількості нітрату амонію, при цьому генерування водню відбувається в реакціях гідролізу гідрореагуючих

речовин на основі алюмінію, які вивільнюються із захисних оболонок – капсул, що руйнуються при досягненні певних температур. Використання як активатора процесу горіння синтезованого за удосконаленою технологією полімерного нітрилу параціану менше 1 % дозволяє підвищити температуру протікання високотемпературної стадії ХТП до рівня, на якому за наявності активованого водню відбуваються процеси часткового гідрокрекінгу важких вуглеводнів. За розробленою методикою оцінки ефективності ХТП, яку засновано на визначенні впливу різних за характером протікання ХТП технологій КВТБХВ на відновлення проникності та фільтраційно-ємнісних характеристик закольматованих природних кернів, експериментально доведено, що найбільше відновлення проникності у разі кольматації гірської породи водонафтовою емульсією відбувається при використанні ХТП з додаванням до базових технологічних рідин гідрореагуючих речовин на основі алюмінію та синтезованого за удосконаленою технологією полімерного нітрилу параціану як активатору горіння.

**У четвертому розділі** обґрунтовано важливість та необхідність підвищення якості комп'ютерного 3D моделювання комплексного водневого термобарохімічного впливу з метою поліпшення результатів впровадження технології та розробки дизайну обробки свердловини. Показано, що математична модель ґрунтується на розв'язанні системи рівнянь Нав'є-Стокса, яку описують закони збереження імпульсу, маси та енергії, та до складу яких входять коефіцієнти проникності. Оскільки в більшості задач фільтрації коефіцієнти проникності є константами, було запропоновано та створено методику уточнення комп'ютерної 3D моделі процесу водневого термобарохімічного впливу на продуктивні горизонти свердловин, в якій в математичній моделі ураховуються результати експериментальних досліджень нестационарного процесу відновлення проникності гірської породи внаслідок комплексного водневого термобарохімічного впливу. В математичну модель додано функцію зміни коефіцієнта відновлення



проникності, від відносного об'єму продуктів реакції ХТП, отриману на основі експериментальних даних.

Експериментальна верифікація удосконаленої комп'ютерної моделі, яка здійснювалася шляхом проведення порівняльного аналізу результатів чисельного моделювання процесу фільтрації продуктів реакції на водневих стадіях КВТБХВ та результатів експериментальних досліджень, проведених на реальних кернах гірської породи, підтвердила суттєве підвищення точності моделювання. Удосконалену математичну модель покладено в основу комп'ютерної 3D моделі для постадійного комп'ютерного моделювання КВТБХВ з урахуванням кінетики ХТП. Такий підхід набув особливої актуальності за умов, коли завдяки розробленим методам з'явилася можливість керування стадіями, особливо водневими, за тривалістю та температурними рівнями.

Розроблено алгоритм підготовки до імплементації технології з урахуванням результатів фізичного й математичного моделювання, за яким створено дизайни обробок та виконано дослідно-промислові впровадження технології на свердловинах України, Індії, Грузії та Туреччини.

**До дисертації можна зробити наступні зауваження:**

1. З метою відтворення початкових пластових умов, зокрема температур, реактор оснащено термокабелем з термооболонкою. Проте не пояснено, чому всі дослідження, що видно з графічної візуалізації, проведено при початкових температурах, близьких до 20 °С.

2. Не досліджено наслідки введення в ХТП додаткової речовини, яка використовується для капсулювання гідрореагуючих речовин на низькотемпературній водневій стадії процесу.

3. Підчас комп'ютерного моделювання комплексного водневого термобарохімічного впливу на привибійну зону пласта, радіус її кольматації, який повинен бути оброблений продуктами реакції, задається. Проте, в роботі відсутня інформація щодо максимально можливого радіусу обробки, при якому КВТБХВ на пласт буде ефективним.

4. В дослідженнях з відновлення проникності закольматованих водонафтовою емульсією кернів недостатньо чітко описано за рахунок чого відбулося покращення проникності керну – за рахунок руйнування водонафтової емульсії, гідрокрекінгу АСПВ, або утворення нових мікро тріщин в керні.

5. Як відомо, гірська порода, особливо осадова, характеризується анізотропією багатьох її властивостей, зокрема проникності. З роботи незрозуміло, чи ураховується і яким чином цей показник при математичному моделюванні.

6. В дисертації вказано, що одним із важливих факторів зміни проникності кернів підчас здійснення КВТБХВ є тріщиноутворення. Не наведено результатів досліджень, які б доводили це твердження стосовно до даних досліджень.

7. Густина алюмогідриду натрію може відрізнятися від густин технологічних рідин. В такому випадку буде відбуватися осаджування або спливання міні-контейнерів з цією гідрореагуючою речовиною. Нерівномірність розташування по об'єму технологічних рідин може суттєво вплинути на організацію низькотемпературної водневої стадії процесу. В роботі не наведено шляхів вирішення цієї проблеми.

8. Ураховуючи достатньо широке впровадження технології КВТБХВ, доцільно було б навести економічні показники використання результатів дисертаційної роботи на реальних об'єктах.

### **Висновок**

Дисертація Велігоцького Дмитра Олексійовича «Підвищення ефективності хіміко-технологічного процесу комплексної водневої термобарохімічної технології інтенсифікації видобутку вуглеводнів» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології.

Дисертація є завершеною науково-дослідницькою роботою, яка полягає у розв'язанні актуальної наукової задачі – а саме, у підвищенні ефективності хіміко-технологічного процесу багатостадійної водневої термобарохімічної дії на продуктивні горизонти нафтових та газових свердловин. Дисертація відповідає вимогам п.п. 9, 11 і 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 567, відповідає паспорту спеціальності 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології, а її автор Велігоцький Дмитро Олексійович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології.

Офіційний опонент

завідувач кафедри інтегрованих технологій,  
процесів та апаратів Національного технічного  
університету «Харківський політехнічний інститут»  
доктор технічних наук, професор

  
Валерій ВЕДЬ

Підпис Валерія ВЕДЯ посвідчую



*Валерій ВЕДЯ / Зайшов О.Г.*