

Міністерство освіти і науки України  
Одеський національний політехнічний університет

На правах рукопису

**ГРИГОРЕНКО Юрій Васильович**

УДК 519.972.5:004.942.001.57

**МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ  
ПРОЦЕСІВ ПЕРВИННОЇ ПЕРЕРОБКИ СИРИХ ВУГЛЕВОДНІВ**

Спеціальність 01.05.02 — Математичне моделювання та обчислювальні методи

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса — 2015

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Одеському національному політехнічному університеті  
Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор  
**Положаєнко Сергій Анатолійович**,  
Одеський національний політехнічний університет,  
завідувач кафедри комп'ютеризованих систем  
управління

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Верлань Анатолій Федорович**,  
Інститут проблем моделювання в енергетиці НАН  
України імені Г. Є. Пухова, завідувач відділом  
моделювання динамічних систем

кандидат технічних наук  
**Красношлик Наталя Олександрівна**,  
Черкаський національний університет імені Богдана  
Хмельницького, доцент кафедри прикладної  
математики та інформатики

Захист відбудеться « 29 » грудня 2015 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 41.052.11 в Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, просп. Шевченка, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеського національного політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, просп. Шевченка, 1.

Автореферат розіслано « 27 » листопада 2015 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

О. О. Фомін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Пріоритетними напрямками розвитку нафтогазопереробної та нафтохімічної промисловості при сучасному рівні потреб економіки України є збільшення «глибини» переробки сирих вуглеводнів та підвищення якості товарної продукції. Одним з дієвих шляхів вирішення цих задач слід розглядати удосконалення математичного забезпечення АСУ ТП первинної переробки сирих вуглеводнів (ППСВ).

Існуючі емпіричні та рекурентні математичні моделі (ММ), а також комп'ютерні засоби дозволяють успішно розв'язувати певне коло практичних задач у складі математичного забезпечення автоматизованих систем управління технологічними процесам (АСУ ТП) ППСВ. Завдяки простоті математичної формалізації, емпіричні та рекурентні ММ процесів ППСВ потребують незначних обчислювальних ресурсів при чисельній реалізації, що, безумовно, є їх важливою перевагою. Однак, вказані ММ мають низку суттєвих недоліків, що обмежує ефективну область використання цих моделей. Зокрема, емпіричні та рекурентні ММ забезпечують достатню точність лише в стаціонарних (та близьких до них) режимах і не можуть застосовуватися в нештатних та аварійних режимах. Крім того, вид емпіричних та рекурентних ММ в значній мірі визначається конструктивними особливостями та продуктивністю технологічних апаратів (ТА), процеси в яких вони (моделі) описують, а тому ці ММ не можуть бути уніфікованими для однотипних, але конструктивно відмінних ТА.

Вказаних недоліків позбавлено ММ процесів ППСВ, які представлено у вигляді диференційних рівнянь у часткових похідних (ДРЧП), оскільки ці ММ складено на основі фундаментальних законів збереження маси та енергії. Разом з тим, для ММ процесів ППСВ у вигляді ДРЧП не вирішеною залишається задача врахування нелінійності коефіцієнтів при диференційних операторах, яка проявляється у вигляді залежності фізико-хімічних параметрів сировини (наприклад, густини або теплопровідності) від шуканих функцій процесу (температури, тиску, концентрації тощо). Нелінійність ММ проявляється на перехідних режимах роботи ТА (складають 25 — 40 % часу плин технологічного процесу), а також її необхідно враховувати при одночасному перебуванні в технологічному процесі сировини з різними фізико-хімічними параметрами. Враховуючи останнє виникає проблема невизначеності фракційного складу первинної сировини, що потребує необхідності розв'язання задачі параметричної ідентифікації ММ (як лінійних, так і нелінійних).

Питанням методології системного аналізу та математичного моделювання у нафтохімічній технології присвячено роботи вітчизняних та зарубіжних вчених, зокрема, В. В. Кафарова, А. І. Боярінова, В. В. Ажогіна, М. З. Згуровського, А. Г. Лапіги, А. І. Скобло, О. В. Кравцова, А. Г. Резаєва, Г. М. Островського, В. С. Путохіна, W. Rey, Z. Duan, R. Znau, J. Peng. Не дивлячись на це, існує брак теоретичних та прикладних досліджень в області розробки ММ процесів ППСВ, а також чисельних методів та комп'ютерних засобів реалізації цих ММ.

Таким чином, систематизація і аналіз вказаної області досліджень свідчать про те, що *актуальною* і не повною мірою розв'язаною є науково-технічна задача створення, удосконалення та ефективного застосування моделей (зокрема,

підвищення точності), методів та засобів математичного моделювання процесів ППСВ.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Цільову спрямованість досліджень, виконаних у дисертаційній роботі, тісно пов'язано з планами наукових досліджень Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ) та Відділення «Електроніка та математичне моделювання» ІПМЕ НАН України при ОНПУ. Робота виконувалася у рамках держбюджетних науково-дослідницьких робіт: «Алгоритми, програми та пристрої систем контролю, діагностики і управління технологічними процесами» № 548-63, 2005 — 2008 р. р., (№ держ. реєстр. 0105U007208); «Моделі складних технологічних об'єктів і процесів та апаратно-програмні засоби їх реалізації в системах управління» № 18-63, 2009 — 2012 р. р., (№ держ. реєстр. 0109U008452); «Моделі та інформаційні технології діагностування і управління складними динамічними об'єктами» № 80-63 2013 — 2016 р. р. (№ держ. реєстр. 0113U007625).

**Мета та задачі дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягає у створенні та подальшому розвитку методів математичного та чисельного моделювання процесів первинної переробки сирих вуглеводнів на основі застосування принципу типізації та уніфікації, а також у розробці комп'ютерно-орієнтованих засобів, які забезпечують ефективне розв'язування прикладних задач при дослідженні класу промислово вживаних процесів первинної переробки сирих вуглеводнів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

— на основі аналізу поширених типових промислових технологій відокремити та систематизувати процеси ППСВ, а також дати характеристику особливостей цих процесів;

— на прикладах типових прикладних задач дослідження процесів (апаратів) ППСВ обґрунтувати підхід до їх математичного опису, заснованому на застосуванні ДРЧП (в тому числі для нестационарної та нелінійної постановки задач);

— розробити ММ процесів ППСВ, що являють собою крайові задачі для відповідних ДРЧП, виконати узагальнення та аналіз якісних характеристик отриманих моделей;

— розробити дискретні ММ процесів ППСВ, які враховують основні якісні властивості динаміки досліджуваних процесів, та метод чисельної реалізації цих моделей;

— розробити метод параметричної ідентифікації ММ процесів ППСВ на основі якого розв'язати відповідні лінійну та нелінійну задачі;

— розробити інструментальні засоби, які реалізують запропоновані методи дослідження процесів ППСВ та виконати оцінку прикладних можливостей цих методів шляхом розв'язування задач, поширених у промисловій практиці.

**Об'єктом дослідження** є процеси моделювання технологічних систем первинної переробки сирих вуглеводнів.

**Предметом дослідження** є математичні моделі процесів первинної переробки сирих вуглеводнів та обчислювальні методи їх чисельної і комп'ютерної реалізації.

**Методи дослідження.** В дисертаційній роботі використано положення теорій: рівнянь математичної фізики (розробка неперервних ММ процесів ППСВ); оптимального управління та оцінювання (станів та параметрів) просторово-

розподілених фізичних процесів (розробка та удосконалення методів обчислювальної реалізації ММ у вигляді ДРЧП при розв'язуванні задач моделювання та ідентифікації); чисельного аналізу (розробка алгоритмів реалізації дискретних ММ); організації комп'ютерних засобів моделювання (розробка програмного забезпечення); обчислювального експерименту (дослідження алгоритмів та програмних засобів при розв'язуванні прикладних задач). Комп'ютерне моделювання проводилось методами обчислювального експерименту за допомогою пакету Matlab (Реквізити використаного пакету License number: 21808 Platform: All License option: Group Term: Perretual Use: Classroom).

**Наукова новизна** результатів, які виносяться на захист, полягає у наступному.

*Вперше:*

— запропоновано нестационарні та нелінійні ММ процесів ППСВ у вигляді ДРЧП, які отримано на основі фундаментальних законів фізики, що забезпечує адекватність цих моделей у широкому діапазоні змін технологічних параметрів, на відміну від існуючих емпіричних та рекурентних ММ;

— запропоновано узагальнену ММ систематизованої сукупності процесів ППСВ, що дозволило поставити та розв'язати задачу пошуку методу реалізації досліджуваних ММ окремих процесів на основі принципу типізації та уніфікації;

— доведено теореми існування та єдиності розв'язків ДРЧП, які утворюють узагальнену ММ процесів ППСВ, а також керованості зазначеними процесами (для випадків розподіленого та граничного управління за умови наявності обмежень на управління), що дозволило виконати якісний аналіз узагальненої ММ процесів ППСВ;

— запропоновано метод реалізації узагальненої ММ процесів ППСВ, який зводиться до дискретизації неперервної узагальненої ММ за різницевою схемою з вагами та подальшого розв'язання отриманої системи нелінійних дискретних рівнянь за процедурою простої ітерації. Метод дозволяє скоротити обчислювальні витрати при чисельному розв'язуванні ДРЧП, що утворюють узагальнену ММ процесів ППСВ, за рахунок застосування економічних різницевих схем.

*Набув подальшого розвитку* метод параметричної ідентифікації, що ґрунтується на використанні градієнтної процедури оптимізації. Це дозволило поширити його на випадок процесів ППСВ і отримати розв'язок задачі параметричної ідентифікації у разі, коли параметр, який ідентифікується, являє собою функцію просторових координат (лінійна задача) або шуканої розподіленої функції простору стану (нелінійна задача).

**Практична цінність роботи** полягає в тому, що запропоновані методи та засоби моделювання дозволяють розширити клас важливих для практики задач дослідження процесів ППСВ, а також створено комплекс програм комп'ютерного моделювання для розв'язування задач моделювання (аналізу) та параметричної ідентифікації процесів ППСВ.

При цьому підвищення точності чисельного моделювання, що забезпечують розроблені нелінійні та нестационарні ММ процесів ППСВ та метод їх (моделей) чисельної реалізації, дозволяють зменшити енерговитрати на технологічні операції на (10...15)% .

Результати, отримані в дисертаційній роботі, впроваджено: у Товаристві з обмеженою відповідальністю «ЛУКОЙЛ Технолоджи Сервісиз Україна» (ММ процесів (апаратів) ППСВ та комп'ютерні засоби їх реалізації), у Товаристві з обмеженою відповідальністю «Інфраструктура Технолоджи Сервісиз та Інжинірінг Україна» (ММ процесів (апаратів) ППСВ та комплекс програмних засобів їх реалізації), у Товаристві з обмеженою відповідальністю «Скай Систем Аутомейшн» (ММ процесів (апаратів) ППСВ та підхід до розв'язання задачі параметричної ідентифікації вказаних ММ).

Матеріали дисертаційної роботи використано при розробці лекційних курсів і циклів лабораторних робіт з дисциплін: «Автоматизація типових виробничих процесів» та «Автоматизація проектування систем управління», які поставлено та які викладаються на кафедрі комп'ютеризованих систем управління ОНПУ.

### **Особистий внесок здобувача в працях, опублікованих із співавторами.**

Наукові положення, висновки та рекомендації, які викладено у дисертаційній роботі, і які виносяться на захист, отримано особисто здобувачем та узагальнено під час оформлення дисертаційної роботи. В працях, опублікованих у співавторстві [3 — 13], особистий внесок автора складає:

— в [3] — запропоновано метод розв'язання задачі параметричної ідентифікації ММ водо-нафтових сумішей;

— в [4, 5] — запропоновано процедури синтезу законів управління та аналітичного конструювання регуляторів для класу енергетичних об'єктів з вираженою інерційністю;

— в [6] — запропоновано ММ трубчастої печі установки каталітичного риформінгу високооктанових бензинів;

— в [7] — сформулювало та доведено для задачі параметричної ідентифікації ММ водо-нафтових сумішей: теорему щодо існування та єдиності розв'язку задачі, теорему щодо диференційованості функціоналу якості;

— в [8, 9] — запропоновано метод чисельної реалізації узагальненої ММ процесів ППСВ;

— в [10] — виконано чисельне дослідження методу параметричної ідентифікації;

— в [11 — 13] — запропоновано ММ процесів ППСВ та виконано їх узагальнення;

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Основні положення дисертаційної роботи обговорювалися на наукових семінарах кафедри комп'ютеризованих систем управління ОНПУ, Одеса, 2005 — 2015 р. р.; на Міжнародній конференції «Modern Information Technology — 2013», Одеса, 2013 р.; на IV Міжнародній науково-практичній конференції «Обробка сигналів і негауссівських процесів», Черкаси, 2013 р.; на XIV Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології», Одеса, 2013 р.; на Міжнародній конференції AASRI Conference on Intelligent Systems and Control (Vancouver, Canada, 2013); на VI Міжнародній конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування і оптимізації», Кам'янець-Подільський, 2014 р.; Міжнародній конференції «Мультинаукові дослідження як тренд розвитку сучасної науки», Київ, 2015 р.

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 15 наукових працях, в тому числі: 10 статтях, з яких 8 опубліковано в журналах, що включено до Переліку фахових видань України (зокрема, 1 — у журналі, що індексуються у міжнародних наукометричних базах даних: *Index Copernicus International*, *Ulrich's Periodicals Directory*, *Electronic Journals Library*, «*Google Scholar*») та 2 — у зарубіжних журналах; 1 монографії; 4 тезах наукових конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаної літератури зі 155 найменувань (на 14 сторінках), додатків на 63 сторінках, 50 рисунків та 12 таблиць (на 45 сторінках). Основний текст дисертаційної роботи складає 139 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Вступ** містить загальну характеристику дисертаційної роботи; обґрунтування актуальності теми досліджуваної проблеми; мету і задачі дослідження; відомості про зв'язок обраного напрямку досліджень з планами наукових досліджень організації, де виконувалася робота. Визначено об'єкт та предмет дослідження, а також наукова новизна та практична цінність отриманих результатів; зазначено особистий внесок здобувача у роботах, виконаних у співавторстві; наведено відомості щодо апробації результатів дисертаційної роботи та вказано основні положення, які виносяться на захист.

**У першому розділі «Обґрунтування технологічної необхідності та наукового підходу щодо математичного моделювання процесів первинної переробки сирих вуглеводнів»** наведено загальну характеристику і виконано аналіз процесів та апаратів первинної переробки сирих вуглеводнів (на прикладі сирої нафти), розглянуто сучасні технологічні схеми процесів ППСВ. Сира нафта (тобто така, що надходить безпосередньо з родовища, та не зазнала стадії нормалізації за хімічним та мінеральним складом) містить підтоварну емульсовану воду, різноманітні мінеральні солі (хлористий натрій, хлористий магній, хлористий калій тощо) та механічні домішки. Хлористі солі лужних металів, які присутні в сирій нафті, викликають підвищену ерозію технологічних апаратів товарної перегонки нафти (наприклад, крекінг-процесу) внаслідок гідролізу цих солей.

Видалення солей та механічних домішок з сирої нафти здійснюється на поточний час шляхом промивання її водою. Однак нафта з водою утворює достатньо стійку емульсію «вода в нафті». Існує декілька способів руйнування водо-нафтової емульсії: механічний, термічний, хімічний та електричний. Призначення будь-якого з них полягає у тому, щоб поєднати щонайменші краплі води у достатньо крупні (коалесценція), здатні швидко осідати на дно відстійника. Найбільш ефективним способом руйнування водо-нафтової емульсії, тобто *знесолення та зневоднення* сирої нафти — це комбінація вище зазначених методів, що, власне й застосовується в сучасних технологічних схемах НПЗ. Саме моделювання таких процесів ППСВ віднесено до *об'єкту дослідження* в чинній дисертаційній роботі.

У зв'язку з цим вивчено питання математичного опису, а також чисельних методів дослідження процесів ППСВ, розглянуто сукупність фізичних явищ та відповідних ММ, притаманних процесам ППСВ. Вказані ММ та методи становлять *предмет* дисертаційного дослідження. Обґрунтовано адекватність представлення ММ досліджуваного класу процесів у вигляді диференціальних рівнянь (або систем

диференціальних рівнянь) у часткових похідних (ДРЧП). Дано аналіз існуючим підходам та апаратним засобам щодо розв'язання задач математичного моделювання процесів ППСВ, а також чисельної реалізації і параметричної ідентифікації їх ММ. Сформульовано проблематику основних нерозв'язаних задач дослідження процесів ППСВ.

У другому розділі «Математичні моделі процесів первинної переробки сирих вуглеводнів та чисельна реалізація цих моделей на основі принципу типізації» виконано систематизацію процесів ППСВ за сукупністю фізико-хімічних явищ, які в них відбуваються. При цьому виділено: процеси, що характеризуються явищами *поверхневого* теплообміну (в яких теплообмін здійснюється на поверхні розділу окремих реагентів (фаз)); процеси, що характеризуються явищами *об'ємного* теплообміну (в яких теплообмін здійснюється в межах всього об'єму задіяних реагентів); процеси, що характеризуються явищами *розсередженого* теплообміну (в яких теплообмін одночасно відбувається на декількох окремих поверхнях).

Розроблено ММ виділених при систематизації класів процесів ППСВ. Моделі розроблено на основі строгої математичної формалізації фізичних явищ (зокрема, законів збереження маси та енергії), покладених в основу систематизації процесів ППСВ, і які (моделі) представлено у вигляді ДРЧП.

Так, наприклад, для термо- та електродегідраторів, які відносяться до апаратів об'ємного теплообміну, ММ виглядають наступним чином. Термо- та електродегідратори призначено для знесолення та зневоднення сирої нафти. В них відбувається термохімічна обробка водо-нафтової емульсії — її руйнація, тобто відділення знесоленої сирої нафти від промивної води, під впливом температурних градієнтів (для термодегідраторів) або електричного поля (для електродегідраторів). Якщо абстрагуватися від способу руйнування водо-нафтової емульсії, то, з точки зору конструктивного виконання, термодегідратор та електродегідратори (надалі — дегідратори) виконано за аналогічною схемою (рисунок 1).

Вони являють собою вісесиметричний горизонтально орієнтований циліндр довжиною  $z$  і характеризується одним вхідним та двома вихідними потоками. Вхідний потік утворюється водо-нафтовою емульсією з регульованою витратою  $F_e = F_e(t)$ , яка надходить до дегідратора зі змішувача при температурі  $T_e = T_e(t)$ . Перший вихідний потік утворює знесолена сира нафта при витраті  $F_{zn} = F_{zn}(t)$  та температурі  $T_{zn} = T_{zn}(r, z, t)$ . Другий вихідний потік утворює промивна вода, яка накопичується в нижній частині дегідратора при термо-(електро)хімічному руйнуванні водо-нафтової емульсії. Цей потік має регульовану витрату  $F_{пв} = F_{пв}(t)$  та температуру  $T_{пв} = T_{пв}(r, z, t)$ . Стійкість в часі водо-нафтової емульсії, яка надходить в дегідратор — незначна. Тому можна вважати, що переважно в дегідраторі перебуває двофазна система «знесолена нафта — промивна вода» з поверхнею розділу фаз, яка знаходиться на відстані  $r$  від його осі. Слушною альтернативою очевидному складанню системи рівнянь для двофазного потоку було запропоновано відображення в ММ якісного переходу водо-нафтової емульсії в монофазні прошарки (знесолену сирину нафту та промивну воду). В якості ознак такого якісного переходу пропонується розглянути швидкість  $v(r, z, t)$  та температуру  $\theta(r, z, t)$  реакції руйнування водо-нафтової емульсії. Тоді процес відділення знесоленої сирої нафти від промивної води в дегідраторі можна описати



наступними законами збереження енергії (в термінах теорії управління, суть — рівняннями динаміки):

$$\begin{aligned} \frac{\partial v(r, z, t)}{\partial t} &= \frac{F_e(t)}{A_c} \left[ \frac{\partial v(r, z, t)}{\partial z} + \frac{1}{2\pi r} \cdot \frac{\partial v(r, z, t)}{\partial r} \right] - \\ &- \frac{2\pi r_{\max} \alpha_{ен}}{\rho_H C_{\rho_H} A_c^2} [F_e(t) - F_{3H}(t)] - \frac{2\pi r_{\max} \alpha_{ев}}{\rho_B C_{\rho_B} A_c^2} [F_e(t) - F_{пв}(t)], \\ \frac{\partial \theta(r, z, t)}{\partial t} &= \frac{F_e(t)}{A_c} \left[ \frac{\partial \theta(r, z, t)}{\partial z} + \frac{1}{2\pi r} \cdot \frac{\partial \theta(r, z, t)}{\partial r} \right] - \end{aligned} \quad (1)$$

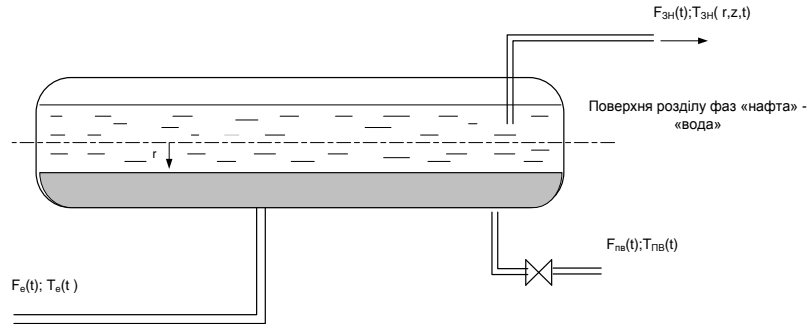


Рисунок. 1. Технологічна схема термо- та електродегідгаторів

$$- \frac{2\pi r_{\max} \alpha_{ен}}{\rho_H C_{\rho_H} A_c} [T_e(t) - \theta(r, z, t)] - \frac{2\pi r_{\max} \alpha_{ев}}{\rho_B C_{\rho_B} A_c} [T_e(t) - \theta(r, z, t)], \quad (2)$$

з початковими

$$v(r, z, t)|_{t=0} = v_0, \quad \theta(r, z, t)|_{t=0} = \theta_0 \quad (3)$$

та граничними умовами

$$\begin{aligned} v(r, z, t)|_{r=0} = \psi_v, \quad \theta(r, z, t)|_{r=0} = \psi_\theta, \quad v(r, z, t)|_{r=r_{\max}} = 0, \quad \theta(r, z, t)|_{r=r_{\max}} = T_e(t), \\ \frac{\partial v(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial \theta(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad \frac{\partial v(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_{\max}} = \frac{\partial \theta(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_{\max}} = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $\rho_H, \rho_B, C_{\rho_H}, C_{\rho_B}, \alpha_{ен}, \alpha_{ев}$  — густини, теплоємності та коефіцієнти теплопередачі для відповідних речовин (індекс «н» позначає знесолену нафту, індекс «в» — промивну воду, індекс «ен» — поверхню розділу «емульсія – знесолена нафта», індекс «ев» — поверхню розділу «емульсія – промивна вода»);  $\psi_v, \psi_\theta$  — деякі (загалом постійні) функції;  $A_c$  — площа «дзеркала» водо-нафтової емульсії, яка визначається наступним чином:

$$A_c = \begin{cases} 2\sqrt{r_{\max}^2 - r^2} \cdot z_{\max}, & \beta = \pm(\pi/2); \\ 2r_{\max} z_{\max}, & \beta = 0. \end{cases}$$

Аналогічним чином одержано ММ апаратів поверхневого та розподіленого теплообміну, в яких відбуваються процеси ППСВ у відповідності до реальних технологічних схем діючих НПЗ. Запропоновані ММ процесів ППСВ відповідають першому пункту наукової новизни чинної дисертаційної роботи.

Тотожність структур ДРЧП, які представляють ММ досліджуваних процесів ППСВ, дозволила виконати узагальнення математичного опису останніх. Таке узагальнення дозволяє, з одного боку — описати будь-який конкретний процес ППСВ, що має місце в прикладних задачах (у рамках узагальненої ММ), а, з другого боку — уніфікувати, на умовах *мінімізації*, підходи щодо чисельної та обчислювальної реалізації складених ММ.

Узагальнену ММ процесів ППСВ записано відносно функції  $\Phi = \Phi(r_j, z, t)$ , яка є фізичною величиною, що визначає простір стану досліджуваного процесу ППСВ в конкретній задачі, наприклад, температуру, швидкість фізико-хімічної реакції, тощо. Функцію  $\Phi = \Phi(r_j, z, t)$  задано на обмеженій відкритій множині  $Q = (0, t_k) \times \Omega$  простору  $R^{M_k}$  з гладкою границею  $\partial\Omega$  і є розв'язком системи ДРЧП

$$\frac{\partial \bar{\Phi}_i(r_j, z, t)}{\partial t} = f_i \left[ \bar{\Phi}_i(r_j, z, t), \frac{\partial \bar{\Phi}_i(r_j, z, t)}{\partial z}, \frac{\partial^2 \bar{\Phi}_i(r_j, z, t)}{\partial r_j^2}, \frac{\partial \bar{\Phi}_i(r_j, z, t)}{\partial r_j}, \bar{U}_g(r_j, z, t) \right] + D_i(\bar{\Phi}_i, r_j, z, t), \quad (5)$$

$$\forall i = 1, \dots, k; \forall j = 1, \dots, N; \forall (r_j, z) \in \Omega; \forall t \in (0, t_k), \quad \bar{\Phi}_i \leq \Phi_{\text{д}}, \quad \bar{\Phi} = [\bar{\Phi}_1, \bar{\Phi}_2, \dots, \bar{\Phi}_k]^T,$$

з урахуванням початкових (ПУ)

$$\bar{\Phi}_i(r_j, z, 0) = \bar{\Phi}_{i_0}(r_j, z), \quad \forall i = 1, \dots, k; \forall j = 1, \dots, N; \forall (r_j, z) \in \Omega \quad (6)$$

та граничних (ГУ) умов наступних типів:

— граничних умов першого роду, ГУ-1 (типу Діріхле)

$$\bar{\Phi}_i(r_j, z, t) \Big|_{\substack{r_j=0 \\ r_j=r_{j\max} \\ z=0 \\ z=z_{\max}}} = \varphi_i [P_i(r_j, z, t)], \quad \forall i = 1, \dots, k; \forall j = 1, \dots, N; \forall (r_j, z) \in \Omega \quad (7)$$

— граничних умов третього роду, ГУ-3

$$\frac{\partial \bar{\Phi}_i(r_j, z, t)}{\partial r_i} \Big|_{r_i=0}^{r_i=r_{i\max}} = \lambda_i [\bar{\Phi}_i(r_j, z, t), P_i(r_j, z, t)], \quad \forall i = 1, \dots, k; \forall j = 1, \dots, N; \forall (r_j, z) \in \Omega, \quad (8)$$

де  $\bar{\Phi}_i(r_j, z, t)$  — безперервні функції стану, що залежать від часової  $t \in (0, t_k)$  та просторових  $\forall (r_j, z) \in \Omega$  координат (координати  $r_j, z$  змінюються у відкритій (циліндричній) множині  $\Omega \in R^{M_k}$  із гладкою границею  $\partial\Omega$ ;  $R^{M_k}$  — евклідовий простір дійсних чисел розмірності  $M_k$ ); функції стану  $\bar{\Phi}_i(r_j, z, t)$  визначаються розв'язком системи (5) — (8), що існує і є єдиним (для коректності ці твердження доведено в дисертаційній роботі);  $\bar{U}_g(r_j, z, t)$ ,  $g = 1, \dots, k^*$  — функції розподіленого управління, що належать гільбертовому простору  $\bar{U}_{g_1}$  на  $R^{M_k}$ .

Змінні стану  $\bar{\Phi}_i(r_j, z, t)$  та управління  $\bar{U}_g(r_j, z, t)$  визначено у відкритих гільбертових просторах із границями відповідно  $\Omega_{\Phi_i}, \Omega_{U_r}$ ,  $\forall i = 1, \dots, k; \forall r = 1, \dots, k^*$ .

Функції  $f_i[\cdot]$  — безперервні лінійні або нелінійні функції;  $D_i(\bar{\Phi}_i, r_j, z, t) = D_i\{r_j, z, t, \Phi_1(r_j, z, t), \Phi_2(r_j, z, t), \dots, \Phi_k(r_j, z, t)\}$  — лінійні або нелінійні функції, що характеризують дію зовнішніх збуджуючих впливів;  $P_i(r_j, z, t)$ ,  $\forall i = 1, \dots, k; \forall j = 1, \dots, N; \forall (r_j, z) \in \Omega$  — задані функції на границі  $\partial\Omega$  області, які можуть виступати в якості граничних управляючих впливів;  $\varphi_i, \lambda_i$ ;  $\forall i = 1, \dots, k$  — параметри, які характеризують енергетичні властивості елементів об'єкта (технологічного апарата);  $N$  — число поверхонь теплообміну (зокрема, ректифікаційних тарілок в апаратах розподіленого теплообміну).

Змінні стану  $\bar{\Phi}_i(r_j, z, t)$  та управління  $\bar{U}_g(r_j, z, t)$  можуть визначати різні фізичні (наприклад, температуру, витрату), або геометричні (наприклад, рівень) величини, а також відхилення цих величин від стаціонарних значень; параметри  $\lambda_i$  визначають, зокрема, коефіцієнт теплопередачі.

Представлення математичного опису процесів ППСВ у вигляді узагальненої ММ виду (5) — (8) складає *другий пункт наукової новизни* дисертаційної роботи.

Виконано якісний аналіз узагальненої ММ процесів ППСВ виду (5) — (8) на предмет врахування некоректностей методологічного та обчислювального характеру, які можуть виникнути у зв'язку з певним рівнем формалізації як на етапі постановки, так і на етапі чисельного розв'язання задачі математичного моделювання процесів ППСВ. В результаті аналізу було сформульовано та доведено наступні теореми щодо існування та єдиності розв'язків ДРЧП, які утворюють узагальнену ММ виду (5) — (8), а також керованості процесами ППСВ для випадків розподіленого та граничного управління за наявності обмежень на управління.

**Теорема 2.1.** Нехай для системи (5) — (8) задано функції  $\bar{\Phi}_{i_0}(\bar{g})$ ,  $\Phi_d$  та  $D_i(\bar{\Phi}_i, \bar{g}, t)$ ;  $\bar{g} = (r_j, z)$ , причому:  $D_i(\bar{\Phi}_i, \bar{g}, t) \in L^2(Q)$ ;  $Q = \Omega \times (0, t_k)$ ,  $\bar{\Phi}_{i_0} \in H_0^1(\Omega) \cap L^p(\Omega)$ ;  $p > 0$ ,  $\Phi_d \in L^2(Q)$ . Тоді існує функція  $\bar{\Phi}_i = \bar{\Phi}_i(\bar{g}, t)$  така, що задовольняє умовам:  $\bar{\Phi}_i \in L^\infty(0, t_k; H_0^1(\Omega) \cap L^p(\Omega))$ ,  $(\partial \bar{\Phi}_i / \partial t) \in L^\infty(0, t_k; H_0^1(\Omega) \cap L^p(\Omega))$ ,  $\bar{\Phi}_i(\bar{g}, 0) = \bar{\Phi}_{i_0}(\bar{g})$ ,  $\bar{\Phi}_i(\bar{g}, t) \leq \Phi_d$ .

При доведенні теореми 2.1 було побудовано «наближені розв'язки», для яких визначено апріорні оцінки та виконано перехід до межі, спираючись на властивості компактності відображення  $\bar{\Phi}_i(\bar{g}, t) \rightarrow \bar{\Phi}_i(\bar{g}, t)$ .

**Теорема 2.2.** Розв'язок задачі (5) — (8), який є неперервним (в наслідок доведення теореми 2.1) у замкненій області  $Q$  з границею  $\Sigma = \partial\Omega \times (0, t_k)$  по часовій  $t \in (0, t_k)$  та просторових координатах  $\bar{g} = (r_j, z)$  — єдиний.

Доведення теореми 2.2 ґрунтується на використанні формули Гріна.

**Теорема 2.3.** (випадок розподіленого управління). Для будь-яких  $\bar{\Phi}_{i_{\text{зад}}}(\bar{g}) \in L^2(\Omega)$  та додатного  $\varepsilon$  існує управління  $\bar{U}_\varepsilon \in \bar{U}_d \leq U_d$ , для яких система (5) — (8) має такий розв'язок, що  $J(\bar{U}_\varepsilon) = \int_\Omega |\bar{\Phi}_i(\bar{g}, t_k, \bar{U}) - \bar{\Phi}_{i_{\text{зад}}}(\bar{g})|^2 d\bar{g} \leq \varepsilon$ , тобто система (5) — (8) є керованою за наступних умов: функція  $D_i(\bar{\Phi}_i, \bar{g}, t)$  має монотонний характер ( $D_i(\bar{\Phi}_i, \bar{g}, t) \leq C(1 + |\bar{\Phi}_i(\cdot)|^m)$ ,  $m > 0$ ;  $\bar{\Phi}_{i_{\text{зад}}}(\bar{U}_d) \leq \Phi_d$ ).

**Теорема 2.4.** (випадок граничного управління). Якщо функція  $D_i(\bar{\Phi}_i, \bar{g}, t)$  є монотонною та неперервною в області  $Q$  з границею  $\Sigma = \partial\Omega \times (0, t_k)$ , а для системи (5) — (8) виконується  $\bar{\Phi}_i(\bar{g}, t) + D_i(\bar{\Phi}_i, \bar{g}, t) = B\bar{U}(t)|_\Sigma$ ;  $\bar{U}(t) \leq U_d$ , причому перетворення  $B\bar{U}(t)$  щільне у просторі  $L^2(\Omega)$ , то для будь-якого  $\bar{\Phi}_{i_{\text{зад}}}(\bar{g}) \in L^2(\Omega)$  ( $\bar{\Phi}_{i_{\text{зад}}}(\bar{g}) \leq \Phi_d(U_d)$ ) та будь-якого  $\varepsilon > 0$  існує управління  $\bar{U}_\varepsilon \in \bar{U}_d \leq U_d$ , для якого система (5) — (8) має такий розв'язок, що  $J(\bar{U}_\varepsilon) \leq \varepsilon$ , тобто система (5) — (8) є керованою.

Доведення теорем 2.3 та 2.4 спирається на використання оператора спостереження  $\bar{Y}_i(\bar{g}, t) = C\bar{\Phi}_i(\bar{g}, t) \leq CU_d$  для якого отримано верхні оцінки (наприклад,  $\|\bar{Y}_i(t_k)\|_{L^2(\Sigma)}^2 \leq \varepsilon$  — для граничного управління).

Формулювання та доведення цих теорем визначає *третій пункт наукової новизни*.

З метою машинної реалізації ММ процесів ППСВ (за умови типізації на підставі узагальненої моделі виду (5) — (8)) в дисертаційній роботі розроблено їх дискретні аналоги, які враховують найважливіші якісні характеристики безперервних ММ: нестационарність та нелінійність. Апроксимацію безперервних ММ було виконано на основі методу кінцевих різниць з використанням економічних різницевих схем — *схем з вагами* (шляхом введенням у схему речовинного параметру  $0 \leq \sigma \leq 1$ ). Для забезпечення можливості ефективного розв'язання конкретних практичних задач було розглянуто випадки побудови явної ( $\sigma = 0$ ) та неявних ( $\sigma \neq 0$ ) дискретних ММ. Дискретні ММ представлено в стандартній векторно-матричній формі ( $m$  — номер шару дискретизації за часом)

$$\begin{aligned} [\Phi_{l_i}^{m+1} - \Phi_{l_i}^m] = \Delta t \left[ \sigma \left( \mathbf{A}_i + \frac{\mathbf{B}_i}{2(\Delta r_j + \Delta z)} \right) \nabla^2 \Phi_{l_i} \right]^{m+1} + \\ + \Delta t \left[ (1 - \sigma) \left( \mathbf{A}_i + \frac{\mathbf{B}_i}{2(\Delta r_j + \Delta z)} + \mathbf{C}_i \right) \nabla \Phi_{l_i} \right]^m = [\mathbf{D}_i U^m + \mathbf{E}_i F^m], \quad 0 \leq \sigma \leq 1 \end{aligned} \quad (9)$$

і для них одержано відповідні умови стійкості.

Розроблено *метод чисельної реалізації нестационарних нелінійних* ММ процесів ППСВ, який зводиться до дискретизації неперервної ММ за схемою з вагами (вираз (9)) та подальшого розв'язання системи нелінійних дискретних рівнянь за процедурою простої ітерації

$$\|\Phi_{l_i}^* - \Phi_{l_i}^v\| \leq \frac{q^v}{1-q} \|\Phi_{l_i}^1 - \Phi_{l_i}^0\|, \quad \text{де } v \text{ — номер ітерації, } q \leq 1 \text{ — параметр методу.} \quad (10)$$

Вважаючи, що характер нелінійності однаковий для всіх вузлів області дискретизації  $\Omega$ , ітераційний процес (10) завершується за умови виконання критерію

$$\max_{L_r, L_z} \left| \frac{\Phi_{l_i}^{v+1} - \Phi_{l_i}^v}{\Phi_{l_i}^{v+1}} \right| \leq \delta_{l_i}, \quad \text{де } \delta_{l_i} \text{ — задана точність розв'язку.} \quad (11)$$

Запропонований метод чисельної реалізації дискретних нестационарних нелінійних ММ процесів ППСВ становить *четвертий пункт наукової новизни* дисертаційної роботи.

Проведене чисельне дослідження дискретних ММ процесів ППСВ на основі принципу типізації із застосуванням узагальненої ММ підтвердило їх слушність та ефективність при розв'язанні прикладних задач.

В якості прикладного застосування запропонованої сукупності ММ сформульовано і розв'язано задачу синтезу управління процесами ППСВ. Дотримуючись підходу типізації та уніфікації, при формалізації задачі управління динаміку процесів ППСВ описано у рамках узагальненої ММ, причому враховано виражені інерційні властивості досліджуваних процесів. Синтез законів управління реалізовано на основі дискретного принципу максимуму. За критерій якості управління обрано квадратичний критерій виду

$$J(U) = \sum_{m=0}^M [\tilde{\Phi}_m^T \mathbf{V} \tilde{\Phi}_m + \mathbf{U}_m^T \mathbf{R} \mathbf{U}_m], \quad (12)$$

де  $\tilde{\Phi}_m$  — вектор, елементи якого являють собою прирощення функції стану відносно деяких номінальних значень;  $\mathbf{V}$  — додатно визначена симетрична матриця, яка відбиває особливості врахування станів;  $\mathbf{R}$  — додатно визначена матриця налаштувань коефіцієнтів регуляторів і яка являє собою «штраф» на управління.

Далі, у відповідності до принципу максимуму, складено функцію Гамільтона

$$\mathbf{H}_m = [\tilde{\Phi}_m^T \mathbf{V} \tilde{\Phi}_m + \mathbf{U}_m^T \mathbf{R} \mathbf{U}_m] + \bar{p}_m^T \{ \mathbf{F} \Phi_m + \mathbf{D}^* \mathbf{U}_m \}; \quad m = \overline{0, M}, \quad (13)$$

де  $\mathbf{F} = \{ \mathbf{A} + [\mathbf{B}/(2\Delta\bar{g})] + \mathbf{C} \}$ ; матрицю  $\mathbf{D}^*$  складено з елементів матриць  $\mathbf{D}$  та  $\mathbf{E}$ , що входять до виразу (9) (тобто зовнішні збудження розглядаються як керовані і виступають в якості можливих управляючих впливів);  $\bar{p}_m$  — вектор зведених координат.

Необхідні і достатні умови мінімізації (12) одержано у вигляді

$$\frac{\partial \mathbf{H}_m}{\partial \tilde{\Phi}_m} = \mathbf{V} \tilde{\Phi}_m + \mathbf{F}^T \bar{p}_m, \quad (14) \quad \frac{\partial \mathbf{H}_m}{\partial \mathbf{U}_m} = \bar{0} = \mathbf{R} \mathbf{U}_m + \mathbf{D}^{*T} \bar{p}_m. \quad (15)$$

Результуючі співвідношення для закону управління із зворотним зв'язком одержано на підставі розв'язку доточкової кураєвої задачі, який має вигляд

$$\mathbf{U}_m = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{D}^{*T} \mathbf{F}^T \{ [\mathbf{A} - \mathbf{V}] \Phi_m \}. \quad (16)$$

Елементами діагональної матриці  $\mathbf{R}$  є наступні адитивні величини

$$r_{i_m} = \max_r \begin{cases} r_{\text{в}} = U_{\text{max}} - U_m; \\ r_{\text{н}} = U_m - U_{\text{min}}; \end{cases} \quad i = \overline{1, n}; \quad m = \overline{0, M}. \quad (17)$$

З фізики процесів ППСВ та конструктивного виконання технологічних апаратів, в яких реалізуються ці процеси, слід зауважити, що компонентами вектору управляючих впливів  $\mathbf{U}(\cdot)$  можуть слугувати витрати відповідних реагентів або функції енергії (переважно температури). Розв'язання практичних задач показало ефективність та конструктивність розробленої процедури синтезу управління процесами ППСВ, яка використовує запропоновані ММ цих процесів в якості відповідних моделей динаміки.

**У третьому розділі «Ідентифікація математичних моделей процесів первинної переробки сирих вуглеводнів»** виконано формалізовану постановку і наведено розв'язання задачі параметричної ідентифікації ММ процесів ППСВ. При цьому, під задачею ідентифікації, малося на увазі відшукання значень фізичних параметрів середовища моделювання (зокрема, густини нафти або водо-нафтової суміші  $\rho(r_j, z)$ ) на основі використання результатів обрахунку шуканих функцій стану  $\Phi_i = \bar{\Phi}_i(r_j, z, t)$  та вимірювань вхідних і збуджуючих ( $\bar{U}(t)$ ,  $\bar{F}(t)$ ) впливів,  $\forall i = 1, \dots, k; \forall j = 1, \dots, N$ . Важливо відзначити, що параметри, які ідентифікуються, можуть бути функціями не тільки просторових координат, але також і шуканих функцій простору стану (наприклад, густина нафти або водо-нафтової суміші суттєво залежить від температури). В такому випадку поставлена задача повинна розглядатися як *нелінійна*.

Задача параметричної ідентифікації процесів ППСВ для параметра густини нафти або водо-нафтової суміші  $\rho(r_j, z)$  має вигляд (нижче для узагальненої ММ (9) з відповідними ПУ та ГУ всі диференціальні оператори представлено як функції

густини  $\rho = \rho(r_j, z)$  або  $\rho = \rho(\Phi)$  — для нелінійних задач, а всі інші параметри — для простоти запису — опущено)

$$\frac{\partial \bar{\Phi}_i}{\partial t} = \sum_{i=1}^3 A_i(\rho) \frac{\partial^2 \bar{\Phi}_i}{\partial r_j^2} + \sum_{i=1}^3 B_i(\rho) \frac{\partial \bar{\Phi}_i}{\partial r_j} + \sum_{i=1}^3 C_i(\rho) \frac{\partial \bar{\Phi}_i}{\partial z} + C_i(\rho) \bar{\Phi}_i + D_i(\rho) U_i + E_i(\rho) F_i, \forall j = \overline{1, N}; \quad (18)$$

$$\bar{g} = \{r_j, z\}, \bar{g} \in \Omega \subset R^3; \bar{\Phi}_i = [\Phi_{1_i}, \Phi_{2_i}, \dots, \Phi_{k_i}]; t \in (0, t_k), Q = \Omega \times (0, t_k);$$

$$\bar{U} = [U_1, U_2, \dots, U_{k_1}]^T, \bar{F} = [F_1, F_2, \dots, F_k]^T, k_1 \leq k;$$

$$\Phi_i(0, \bar{g}) = \Phi_{0_i}(\bar{g}); \bar{g} \in \Omega, \quad (19) \quad \lambda_j(0, t) \frac{\partial \Phi_i(0, t)}{\partial r_j} + K_j(t) \Phi_i(0, t) = \Psi_j(t), \forall j = \overline{1, N}. \quad (20)$$

Надалі задачу параметричної ідентифікації сформульовано і розв'язано як задачу оптимального управління. Нехай  $\rho'(\cdot)$  являє собою точне значення густини нафти або водо-нафтової суміші. Для певної  $l$ -ї шуканої функції  $\Phi_l (\forall l \in k)$  позначимо її вимірюване значення наступним чином

$$P_l^\Phi = \int_{\Omega} \Phi_l' dz + \varepsilon_l^\Phi, l \in k, \quad (21)$$

де  $\Phi_l'$  — точне значення  $l$ -ї шуканої функції  $\Phi_l$ , яке визначається відповідно до ММ виду (18) — (20). Вводиться у розгляд функціонал

$$J[\rho(\cdot)] = \int_{T_l} [\Phi_l' - P_l^\Phi]^2 dt, \quad (22)$$

де  $P_l^\Phi$  визначається співвідношенням (14), а  $\Phi_l'$  являє собою розв'язок задачі (18) — (20) для заданих значень  $\rho'(\cdot)$ ;  $T_l$  — проміжок часу, на протязі якого вимірюється шукана функція  $P_l^\Phi$ .

Виконання умови  $J[\rho(\cdot)] \rightarrow \inf, \forall \rho(\cdot) \in \Lambda_{\text{прин}}^\rho$ , де  $\Lambda_{\text{прин}}^\rho$  — множина допустимих функцій  $\rho(\cdot) \in L^2[\Omega]$  відповідає розв'язанню задачі параметричної ідентифікації. Іншими словами, необхідно визначити таке  $\hat{\rho}(\cdot)$ , для якого

$$J(\hat{\rho}) \leq J(\rho), \forall \rho(\cdot) \in \Lambda_{\text{прин}}^\rho. \quad (23)$$

Для коректності розв'язання поставленої задачі параметричної ідентифікації виконано якісне дослідження оптимізаційної задачі (22), (23), внаслідок чого сформульовано та доведено наступні теореми.

**Теорема 3.1.** Для множини функцій, визначених співвідношенням  $P_l^\Phi(t) \in L^2(t, \Omega); \forall t \in (0, t_k), \forall l \in k$ , та областю допустимих параметрів  $\Lambda_{\text{прин}}^\rho$ , існує розв'язок задачі (23) і цей розв'язок — єдиний.

Доведення теореми 3.1, в частині існування розв'язку, ґрунтується на отриманні оцінок збіжності розв'язку системи (18) — (20) для параметру  $\rho = \rho(r_j, z)$  (або  $\rho = \rho(\Phi)$  — для нелінійних задач), а, в частині єдиності розв'язку, — на тотожності розв'язків системи (18) — (20), отриманих за умови незмінності значень управлінь  $\bar{U} = [U_1, U_2, \dots, U_{k_1}]^T$  та зовнішніх збуджень  $\bar{F} = [F_1, F_2, \dots, F_k]^T$ .

**Теорема 3.2.** Для значень параметра  $\forall \rho(\cdot) \in \Lambda_{\text{прин}}^\rho$  функціонал (3.9) є диференційованим в області  $\Omega \subset \mathfrak{R}^n$ .

Доведення теореми 3.2 ґрунтується на неперервності відображення  $(\rho(\cdot)) \rightarrow \bar{\Phi}_l$  для  $\forall \rho(\cdot) \in \Lambda_{\text{прин}}^\rho$  в просторі  $L^2[\Omega]$ .

Розв'язання задачі параметричної ідентифікації ММ процесів ППСВ засновано на *подальшому розвитку* методу, який відноситься до градієнтних

процедур оптимізації. При цьому було показано, що прирощення функціонала (23)  $\Delta J = J[(\rho + h^\rho)] - J(\rho)$  може бути представлено як  $\Delta J = \int_{\Omega} \{J'(\rho, h^\rho)\} dz + [O(\|h^\rho\|_{L^2})]$ , де  $J'(\rho, h^\rho)$  — певна функція з  $L^2(\Omega)$ ,  $O(\|h^\rho\|_{L^2})$  — залишковий член такий, що  $\lim_{\alpha^\rho \rightarrow 0} O(\alpha^\rho)(\alpha^\rho)^{-1} = 0$ , а градієнт цього функціонала має вид

$$J'[\rho(r_j, z)] \equiv \rho \phi_{i\Phi}^*; \quad \forall r_j, z \in \Omega; \forall t \in [0, t_k]; \quad i = \overline{1, k}; \quad \forall j = \overline{1, N}, \quad (24)$$

де  $\phi_{i\Phi}^* = \phi_{i\Phi}^*(r_j, z, t)$  — розв'язок зведеної до (18) — (20) задачі

$$\frac{\partial \phi_{i\Phi}^*}{\partial t} - \left[ \sum_{i=1}^3 A_i(\rho) \frac{\partial^2 \phi_{i\Phi}^*}{\partial r_j^2} + \sum_{i=1}^3 B_i(\rho) \frac{\partial \phi_{i\Phi}^*}{\partial r_j} + \sum_{i=1}^3 B_i(\rho) \frac{\partial \phi_{i\Phi}^*}{\partial z} + C_i(\rho) \phi_{i\Phi}^* \right] = D_i(\rho) U_i + E_i(\rho) F_i, \quad i = \overline{1, k}; \quad (25)$$

$$\bar{U} = [U_1, U_2, \dots, U_{k_1}]^T, \quad \bar{F} = [F_1, F_2, \dots, F_k]^T, \quad k_1 \leq k;$$

$$\phi_{i\Phi}^*(t, \bar{g}) \Big|_{t=t_k} = 2[\bar{\Phi}_i(r_j, z, t_k, \rho) - P_i^\Phi(t_k)] \phi_{i\Phi}^*(t_k, \bar{g}); \quad \bar{g} \in \Omega; \quad (26)$$

$$\lambda_j(0, t) \frac{\partial [\bar{\Phi}_i(0, t)]}{\partial r_j} + K_j(t) [\bar{\Phi}_i(0, t)] = \psi^*_j(t), \quad 0 \leq t \leq t_k; \quad \forall j = \overline{1, N}. \quad (27)$$

Таким чином, для отримання градієнта функціонала (23) необхідно розв'язати дві крайові задачі: спочатку, визначити розв'язок системи (18) — (20); потім, в (27) підставити віднайдений розв'язок задачі (18) — (20) та, з системи (25) — (27), віднайти зведену функцію  $\phi_{i\Phi}^* = \phi_{i\Phi}^*(r_j, z, t)$  і, нарешті, одержаний розв'язок зведеної задачі підставити в (24). Надалі, маючи градієнт (24), для розв'язання задачі (18) — (20), (24) використовується процедура методу проєкції градієнта, що дає змогу записати ітераційні процеси щодо параметра, який ідентифікується (густини)

$$\rho_{g+1}(r_j, z) = \begin{cases} \rho_g(r_j, z) - \alpha_\rho \rho \phi_{i\Phi}^*, & \rho_{\min} \leq \rho_g(r_j, z) - \alpha_\rho \rho \phi_{i\Phi}^* \leq \rho_{\max}, \\ \rho_{\min}, & \rho_g(r_j, z) - \alpha_\rho \rho \phi_{i\Phi}^* < \rho_{\min}, \\ \rho_{\max}, & \rho_g(r_j, z) - \alpha_\rho \rho \phi_{i\Phi}^* > \rho_{\max}, \end{cases} \quad (28)$$

де  $g$  — номер ітерації;  $\alpha_\rho = \text{const} \geq 0$ , яке відшукується з умови

$$J[\rho_g(r_j, z)] - J[\rho_{g+1}(r_j, z)] \geq \varepsilon_\rho \|\rho_g - \rho_{g+1}\|_{L^2}, \quad \varepsilon_\rho > 0 \text{ — похибка методу.}$$

Описаний метод параметричної ідентифікації процесів ППСВ складає *n'ятий пункт наукової новизни* дисертаційної роботи.

У дисертаційній роботі реалізовано чисельне розв'язання задачі параметричної ідентифікації процесів ППСВ, засноване на використанні узагальненої ММ. При цьому виконано кінцево-різницеву апроксимацію прямої (18) — (20) та зведеної (25) — (27) задач з представленням відповідних дискретних аналогів у стандартній векторно-матричній формі. Дискретизацію критерію якості (22) реалізовано за квадратурними формами. Розроблено алгоритм чисельного розв'язання задачі параметричної ідентифікації процесів ППСВ у відповідності до запропонованого методу, який (алгоритм) засновано на ітераційному уточненні розв'язку до досягнення заданої точності. Досліджено питання віднаходження глобального екстремуму одержуваного розв'язку. Обчислювальну спроможність та ефективність запропонованих методу та алгоритму ідентифікації підтверджено розв'язанням прикладної задачі параметричної ідентифікації ММ апаратів процесу електро- (термо)знесення і зневоднення сирової нафти.

У четвертому розділі «Комп'ютерні засоби та їх застосування при розв'язуванні задач моделювання і ідентифікації процесів первинної переробки сирих вуглеводнів» розроблено комп'ютерні засоби розв'язування задач моделювання динаміки процесів ППСВ та параметричної ідентифікації їх ММ. Комп'ютерні засоби реалізовано у вигляді проблемно-орієнтованого комплексу програм. Використовуючи комплекс як інструментальну базу показано застосування запропонованих методів моделювання процесів ППСВ та параметричної ідентифікації їх ММ в умовах реальних НПЗ.

Комплекс являє собою користувацький додаток, розроблений на платформі пакету Matlab і дозволяє формалізувати задачу дослідження певного процесу ППСВ у вигляді конкретної ММ з числовими значеннями коефіцієнтів та джерел.

ММ певного процесу ППСВ формується в класі відповідних операторів у часткових похідних і може бути представлена як *лінійна* (коефіцієнти при дифузійних членах не залежать від шуканої функції стану) або як *нелінійна* (коефіцієнти при дифузійних членах змінюються в залежності від значення шуканої функції стану). ММ може також являти собою систему ДРЧП (простір стану має більше ніж одну компоненту).

Геометрія просторової області моделювання  $\Omega$  формується за принципом конструктивної блокової геометрії — CDSG (constructive block solid geometry), який реалізується засобами Matlab при завданні складних просторових областей. Відповідно до даного принципу складна область  $\Omega$  представляється як об'єднання, перетин або різниця геометричних примітивів  $\Omega_j$  (де  $j$  — число типових областей) зі стандартним програмним забезпеченням конструювання геометричних форм.

Початкові умови формуються у вигляді добутку нормованого значення ПУ та вагового коефіцієнта — безрозмірної величини, що визначає масштаб шкали завдання ПУ. Така форма завдання ПУ дає змогу перевизначати їх на будь-якому етапі підготовки розв'язку прикладної задачі перед інтегруванням диференціальних рівнянь динаміки.

Виходячи з фізики задач дослідження процесів ППСВ, що розв'язуються, можливими типами граничних умов (ГУ) для них є: завдання функції (потенціалу) на границі (ГУ 1 роду, або типу Діріхле) та змішані ГУ (адитивний випадок завдання потенціалу на границі та потоку через неї, тобто ГУ 3 роду). ГУ також формуються у вигляді добутку відповідних нормованих значень та вагових коефіцієнтів і можуть бути перевизначені на будь-якому етапі підготовки розв'язку задачі перед інтегруванням.

Запропоновані в дисертаційній роботі ММ, методи і алгоритми, що їх реалізують, було апробовано при розв'язанні практичних задач моделювання процесів ППСВ та ідентифікації їх ММ. Зокрема, виконано моделювання динаміки процесу електро-(термо)знесолення та зневоднення сирової нафти за результатами якого на рисунках 2 та 3 (як приклад) наведено поля швидкостей  $v(r, z, t)$  та температури  $\theta(r, z, t)$  реакцій руйнування водо-нафтової емульсії (ВНЕ)— в дегідраторі.

Дано оцінку точності моделювання, в залежності від дискретизації вихідної задачі за просторовими координатами, а також критерії вибору кроку моделювання за часом. При розв'язанні задачі у нелінійній постановці, врахування нелінійного характеру ММ (при точності (2,5...3)%) потребувало від 5 до 8 ітерацій. Загальний



час на реалізацію нелінійної ММ, у порівнянні з лінійною, збільшився на (40...60)%. Однак це не позбавляє можливості здійснювати обчислення у реальному масштабі часу, а підвищення точності моделювання в даному випадку (нелінійна задача) дозволяє знизити енерговитрати на технологічні операції на (10...15)%.

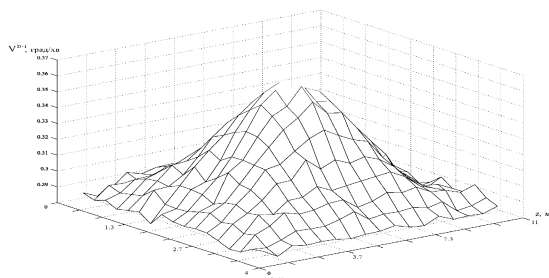


Рисунок 2. Поле швидкостей  $v(r, z, t)$  реакції руйнування ВНЕ

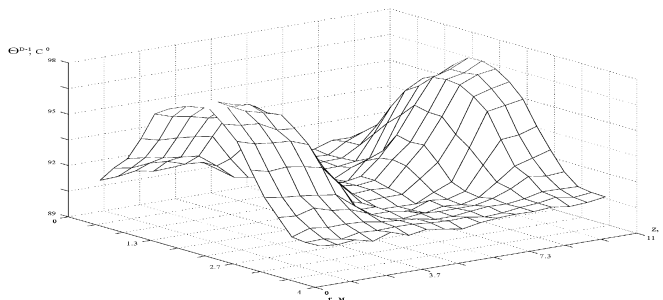


Рисунок 3. Поле температур  $\theta(r, z, t)$  реакції руйнування ВНЕ

Виконано розв'язання задачі

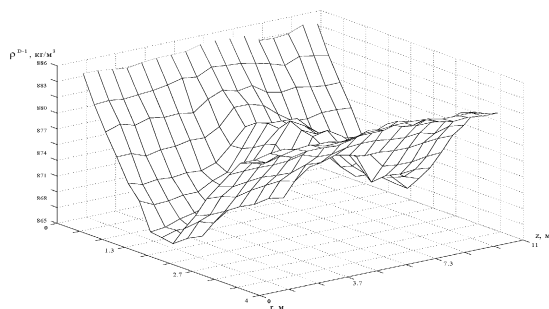


Рисунок 4. Поле параметру густини для дегідратора

параметричної ідентифікації ММ процесу електро-(термо)знесолення та зневоднення сирової нафти за параметром густини, яку (задачу) зумовлено переходом з переробки «легкої» нафти ( $\rho = 815 \text{ кг/м}^3$ ) на «важку» нафту ( $\rho = 985 \text{ кг/м}^3$ ) при фіксованій витраті нафти на вході процесу ( $Q = 0,015 \text{ м}^3/\text{хв}$ ). Результати розв'язання вказаної задачі параметричної ідентифікації (поля параметру густини) показано, як приклад, на рисунку 4 для дегідратора.

Поле параметра густини має вигляд

гладкої функції, що зумовлено інерційними властивостями технологічних апаратів та, переважно монотонним, характером зміни збуджуючих впливів. Останнє, як показали числові експерименти, має місце лише при регламентних режимах технологічного процесу, і може порушуватися при аварійних режимах.

**У висновках** сформульовано основні наукові і практичні результати дисертаційної роботи.

**У додатках** містяться документи про впровадження результатів дисертаційної роботи, певні математичні викладки та доведення окремих теоретичних положень, а також вигляд діалогових вікон, які відповідають режимам роботи програмного комплексу.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено важливу наукову задачу, яка полягає у створенні та подальшому розвитку методів математичного та чисельного моделювання процесів і апаратів первинної переробки сирих вуглеводнів на основі застосування принципу типізації та уніфікації, а також у розробці комп'ютерно-орієнтованих засобів, які забезпечують ефективне розв'язування прикладних задач при дослідженні класу промислово вживаних процесів і апаратів первинної переробки сирих вуглеводнів.

В тому числі отримано наступні теоретичні та практичні результати:

1. Виконано аналіз існуючих ММ технологічних процесів ППСВ. Показано, що у практичних реалізаціях автоматизованих систем управління процесами ППСВ існує брак адекватних ММ відповідних процесів. Обґрунтовано адекватність математичного опису процесів ППСВ у вигляді ДРЧП або систем ДРЧП. Виявлено можливість розширення математичного опису досліджуваного класу процесів у вигляді ДРЧП (систем ДРЧП) на випадки нестационарної та нелінійної постановок задач.

2. Виконано систематизацію процесів ППСВ на основі якої розроблено сукупність ММ у вигляді нестационарних нелінійних ДРЧП (або систем вказаних ДРЧП), а також виконано узагальнення математичного опису даного класу процесів (апаратів) ППСВ, для якого проведено якісне дослідження з метою доведення існування та єдиності розв'язків отриманих ДРЧП (систем ДРЧП).

3. Застосування запропонованих ММ при моделюванні процесів ППСВ дало змогу підвищити точність комп'ютерного моделювання на (10...15)% у порівнянні із відомими (емпіричними, рекурентними та статистичними) ММ. Причому, останні придатні до застосовування лише у вузькому діапазоні значень технологічних параметрів, з урахуванням яких утворено ці ММ. У іншому випадку адекватність емпіричних, рекурентних та статистичних ММ різко знижується (зменшується точність обчислень) і вони потребують корекції. На відміну від зазначеного, запропоновані ММ зберігають адекватність при зміні технологічних параметрів у широкому діапазоні, оскільки утворені на основі фундаментальних фізичних законів (зокрема, збереження маси, енергії, імпульсу, тощо), що характеризують плин технологічного процесу, який вони моделюють.

4. Запропоновано та обґрунтовано метод реалізації узагальненої ММ процесів ППСВ, який зводиться до дискретизації неперервної узагальненої ММ за різницевою схемою з вагами та подальшого розв'язання отриманої системи нелінійних дискретних рівнянь за процедурою простої ітерації. Запропонований метод характеризується універсальністю, повнотою та точністю отримуваних розв'язків ДРЧП (систем ДРЧП) і, на відміну від відомих методів реалізації моделей процесів (апаратів) ППСВ, дозволяє врахувати основні якісні властивості цих процесів: просторово-розподілений характер, нелінійність та нестационарність. Розроблено ефективну процедуру чисельного розв'язування ДРЧП (систем ДРЧП), які утворюють ММ процесів ППСВ, а також отримано умови сталості їх дискретних аналогів.

Метод дозволяє скоротити на (3...7)% обчислювальні витрати при чисельному розв'язуванні ДРЧП, що утворюють узагальнену ММ процесів ППСВ, за рахунок застосування економічних різницевоїх схем.

5. Розвинуто застосування методу параметричної ідентифікації, заснованого на градієнтній процедурі оптимізації, на випадок процесів ППСВ. Встановлено можливість отримання розв'язку задачі параметричної ідентифікації у випадках, коли параметр, який ідентифікується, являє собою функцію просторових координат (лінійна задача) або шуканої розподіленої функції простору стану (нелінійна задача).

6. Створено комплекс програмних засобів щодо моделювання та ідентифікації класу процесів ППСВ. Програмні засоби розроблено із застосуванням платформи

спеціалізованого пакету Matlab та поєднано у єдиний пакет прикладних модулів у відповідності до концепції Matlab Application Toolboxes, яку прийнято у системі Matlab.

7. Запропоновані ММ, методи та алгоритми їх реалізації, а також розроблені програмні засоби, дозволили ефективно розв'язати низку прикладних задач, а саме:

— виконано моделювання динаміки процесу електро-(термо)знесолення та зневоднення сирої нафти при незмінних параметрах математичної моделі;

— виконано моделювання динаміки процесу електро-(термо)знесолення та зневоднення сирої нафти при нелінійному характері математичної моделі;

— виконано моделювання динаміки процесу електро-(термо)знесолення та зневоднення сирої нафти при ідентифікації параметрів математичної моделі;

— розглянуто можливість практичного застосування сукупності розроблених ММ процесів ППСВ у складі інструментального забезпечення систем управління даними процесами (апаратами) у зв'язку з чим запропоновано конструктивну процедуру синтезу відповідних законів управління. Процедура враховує наявність фізично притаманних процесам ППСВ запізнювань на елементи векторів простору стану та управління. Введення в структуру запропонованих систем управління процесами ППСВ відповідних компенсаторів дало змогу скоротити час виходу на усталений режим в середньому на 2,7%. Результати тестових досліджень свідчать про цілковиту придатність застосування розроблених ММ та законів управління в режимі реального часу в системах автоматизованого управління процесами ППСВ.

Запропоновані ММ, методи та програмні засоби їх чисельної реалізації, розроблено на підставі принципу типізації та уніфікації, що дає змогу застосовувати їх при розв'язанні достатньо широкої гами прикладних задач моделювання та параметричної ідентифікації процесів ППСВ.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ З ОСОБИСТИМ ВКЛАДОМ**

Основні результати дисертації викладено у 15 наукових працях, в тому числі: 10 статтях, з яких 8 опубліковано в журналах, що включено до Переліку фахових видань України та 2 — у зарубіжних журналах; 1 монографії; 4 тезах наукових конференцій.

### ***Статті, які опубліковано у фахових виданнях України:***

1. Григоренко Ю. В. Чисельний метод реалізації математичних моделей процесів первинної переробки сирих вуглеводнів / Ю. В. Григоренко // Інформатика та математичні методи в моделюванні. — № 1, 2014. — С. 85 — 92.

2. Григоренко Ю. В. Математичні моделі та узагальнення математичного опису процесів первинної переробки сирих вуглеводнів / Ю. В. Григоренко // Інформатика та математичні методи в моделюванні. — № 2, 2014. — С. 180 — 188.

3. Sergey A. Polozhaenko. Research of solvability of task of authentication of water-oil mixtures on the parameters of tuning of mathematical model / Sergey A. Polozhaenko, Yuri V. Grigorenko // Informatics and mathematical methods in simulation. — № 3, 2012. — PP. 199 — 210.

4. Положаенко С. А. Синтез законів управління енергетическими об'єктами, характеризуючимися вираженим запаздыванием / С. А. Положаенко,

Ю. В. Григоренко // *Електромашинобудування та електрообладнання*. — К.: Техніка, 2008. — Вип. 71. — С. 78 — 82.

5. Положаенко С. А. Аналитическое конструирование регуляторов для класса объектов с выраженными инерционностями / С. А. Положаенко, Ю. В. Григоренко, Н. И. Логинова // *Електромашинобудування та електрообладнання*. — К.: Техніка, 2009. — Вип. 74. — С. 75 — 79.

6. Положаенко С. А. Система управления трубчатой печью установки каталитического риформинга высокооктановых бензинов / С. А. Положаенко, Ю. В. Григоренко // *Електромашинобудування та електрообладнання*. — К.: Техніка, 2010. — Вип. 75. — С. 62 — 67.

7. Polozhaenko S. A. Qualitative analysis of identification problem for water-oil reservoirs by parameters of mathematical model settings / Polozhaenko S. A., Yu. V. Grigorenko, O. V. Babychuk // *Electrotechnic and computer systems*. — № 09(85), 2013. — PP. 89 — 97.

Працю [7] проіндексовано у світових наукометричних базах *Index Copernicus International*, *Ulrich's Periodicals Directory*, *Electronic Journals Library*, «*Google Scholar*».

8. Положаенко С. А. Математичне моделювання процесів первинної переробки сирих вуглеводнів / С. А. Положаенко, Ю. В. Григоренко // *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки: зб. наук. праць / Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАНУ, Кам'янець-Подільський націон. ун-т ім. Івана Огієнка*. — Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський націон. ун-т ім. Івана Огієнка, 2014. — Вип. 10. — С. 178 — 181.

***Статті, які опубліковано у зарубіжних виданнях:***

9. Sergey A. Polozhaenko. Method of Numerical Implementing Mathematical Models for the Primary Processing of Raw Hydrocarbons / Sergey A. Polozhaenko, Yuri V. Grigorenko // *Eastern European Scientific Journal*. — 2014. — №2. — P. 290 — 296 (<http://dx.DOI.10.12851/EESJ201404ART44>)

10. Pavlenko V. Identification Accuracy of Nonlinear System based on Volterra Model in Frequency Domain / Pavlenko V., Fomin A., Pavlenko S., Grigorenko Y. // *AASRI Procedia*. — 2013. — Vol. 4. — P. 297-305. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.aasri.2013.10.044>).

***Розділи монографії:***

11. Погосов А. Ю. Моделирование физических процессов и технологическая информатизация в нефтяной промышленности и энергетике: монография / А. Ю. Погосов, С. А. Положаенко, Ю. В. Григоренко. — Одесса: Наука и техника, 2013. — 656 с.

***Тези доповідей конференцій:***

12. Положаенко С. А. Математичні моделі процесів та апаратів первинної обробки сирих вуглеводнів / С. А. Положаенко, Ю. В. Григоренко // *Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ-2013)*. — Труды XIV Международной научно-практической конференции. — Одесса, 27 — 31 мая 2013г. — Т. 1. — С. 163 — 164.

13. Григоренко Ю. В. Математичні моделі процесів первинної переробки сирих вуглеводнів / Ю. В. Григоренко, В. В. Маліченко // *Modern Information*

Technology (MIT-2013). — Труды Международной научно-практической конференции. — Одесса, 25 — 26 апреля 2013 г. — С. 80 — 81.

14. Григоренко Ю. В. Математичні моделі процесів первинної обробки сирих вуглеводнів та їх обчислювальна реалізація / Григоренко Ю. В. // Праці IV Міжнародної науково-практичної конференції «Обробка сигналів і негауссівських процесів», присвяченої пам'яті професора Ю. П. Кунченка: Тези доповідей. — Черкаси: ЧДТУ, 2013. — С. 7 — 9.

15. Григоренко Ю. В. Чисельна реалізація та дослідження математичних моделей процесів первинної переробки сирих вуглеводнів / Григоренко Ю. В. // Збірник центру наукових публікацій з матеріалами міжнародної практичної конференції: «Мультинаукові дослідження як тренд сучасної науки»: збірник статей. — К.: Центр наукових публікацій, 2015. — С. 6 — 10.

**Григоренко Ю. В. Моделі, методи і засоби прикладного математичного моделювання процесів та апаратів первинної переробки сирих вуглеводнів. — Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 — Математичне моделювання та обчислювальні методи. — Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2014.

Дисертаційну роботу присвячено створенню та подальшому розвитку методів математичного та чисельного моделювання процесів і апаратів первинної переробки сирих вуглеводнів на основі застосування принципу типізації та уніфікації, а також розробці комп'ютерно-орієнтованих засобів, які забезпечують ефективно розв'язування прикладних задач при дослідженні класу промислово вживаних процесів і апаратів первинної переробки сирих вуглеводнів.

В роботі виконано систематизацію процесів первинної переробки сирих вуглеводнів (ППСВ), для яких здійснено формалізацію та узагальнення математичного опису у класі диференційних рівнянь у часткових похідних.

Запропоновано сукупність математичних моделей (ММ) процесів ППСВ та методів їх реалізації в задачах математичного моделювання та параметричної ідентифікації зазначених процесів.

Результати теоретичних досліджень, зокрема, розроблені ММ, методи та алгоритми їх обчислювальної реалізації, покладено в основу побудови програмного комплексу, орієнтованого на розв'язання прикладних задач математичного моделювання та параметричної ідентифікації процесів ППСВ.

Ключові слова: сирі вуглеводні, процеси (апарати) первинної переробки сирих вуглеводнів, моделювання, параметрична ідентифікація, математична модель, диференційне рівняння у часткових похідних, чисельний метод (алгоритм).

**Григоренко Ю. В. Модели, методы и средства прикладного математического моделирования процессов и аппаратов первичной переработки сырых углеводородов. — Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 — Математическое моделирование и вычислительные методы. — Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2014.

Диссертационная работа посвящена созданию и дальнейшему развитию методов математического и численного моделирования процессов и аппаратов первичной переработки сырых углеводородов на основе применения принципов типизации и унификации, а также разработке компьютерно-ориентированных средств, обеспечивающих эффективное решение прикладных задач при исследовании класса промышленно используемых процессов и аппаратов первичной переработки сырых углеводородов.

В результате анализа технологические процессы первичной переработки сырых углеводородов (ППСУ), систематизированы по введенным классификационным признакам: поверхностный теплообмен, объемный теплообмен и распределенный теплообмен.

Выполнено математическое описание (формализация) процессов ППСУ на основе дифференциальных уравнений в частных производных. Предложены математические модели (ММ) частных случаев процессов ППСУ и выполнено их обобщение. Особенностью предложенных ММ является возможность учета ярко выраженного нестационарного и нелинейного характера процессов ППСУ. Обобщение математического описания совокупности процессов ППСУ позволило разработать методы математического и численного моделирования процессов ППСУ на основе принципа типизации и унификации. При этом предложен конструктивный метод вычислительной реализации ММ процессов ППСУ, который сводится к дискретизации непрерывной обобщенной ММ исследуемого класса процессов по схеме с весами и дальнейшего решения полученной системы нелинейных дискретных уравнений в соответствии с процедурой простой итерации.

Сформулирована и решена задача параметрической идентификации ММ процессов ППСУ. Получило дальнейшее развитие применение метода параметрической идентификации, основанного на градиентной процедуре оптимизации, на случай процессов ППСУ. При этом показана возможность получения решения параметрической идентификации в случае, когда идентифицируемый параметр представляет собой функцию пространственных координат (линейная задача) или искомой распределенной функции пространства состояний (нелинейная задача).

Результаты теоретических исследований, разработанные ММ, методы и алгоритмы вычислительной реализации этих ММ, положены в основу построения проблемно-ориентированного программного комплекса для решения прикладных задач математического моделирования и идентификации процессов ППСУ.

Ключевые слова: сырые углеводороды, процессы первичной переработки сырых углеводородов, моделирование, параметрическая идентификация, математическая модель, дифференциальное уравнение в частных производных, численный метод (алгоритм).

**Grigorenko Yu. V. Models, methods and tools applied mathematical modeling of processes and apparatuses of primary processing of raw hydrocarbons. — Manuscript.**

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 01.05.02 — Mathematical simulation and computing methods. — Odessa National Polytechnic University, Odessa, 2014.

The thesis is devoted to the creation and further development of mathematical and numerical modeling of the processes and apparatuses of primary processing of raw hydrocarbons on the basis of the principle of typification and unification, as well as in the development of computer-based tools that provide effective applied problems in the study of a class of industrial processes and devices used primary processing of raw hydrocarbons.

The work done systematization processes (machines) primary processing of raw hydrocarbons (PPRH), which made the formalization and generalization of the mathematical description of a class of differential equations in partial derivatives.

A set of mathematical models (MM) processes (machines) PPRH and methods of implementation problems in mathematical modeling and parameter identification of these processes (machines).

The results of theoretical studies, in particular, developed MM methods and computational algorithms for their implementation, the basis for building complex software-based solution of applied problems of mathematical modeling and parameter identification processes (machines) PPRH.

Keywords: raw hydrocarbon processes (machines) primary processing of raw hydrocarbons, modeling, parameter identification, mathematical model, differential equations in partial derivatives, numerical method (algorithm).