

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Сафоника Андрія Петровича** на тему **“Моделювання нелінійно-збурених керованих процесів очищення рідин від багатокомпонентних забруднень”**, подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Дане дисертаційне дослідження націлене на побудову системи моделей технічного процесу очищення забрудненої води у формі фільтрації багатокомпонентної рідини, що взаємодіє з реагентами фізичної та біологічної природи і ускладнена нелінійними ефектами та зворотними впливами процесу на власні параметри.

Недоліки існуючих математичних моделей пояснюються тим, що вони практично всі стосуються однокомпонентної рідини та не враховують або довільно задають багато характерних параметрів процесу. Зокрема, у багатьох випадках нехтують коефіцієнтом дифузії (що не відповідає реальності за певних обставин), або враховують у спосіб, який призводить до суттєвих і невиправданих обчислювальних затрат при комп'ютерному моделюванні. Мало розробленими є нелінійні “модельні механізми”, що враховують зворотній вплив різного роду характеристик процесу (концентрації забруднення рідини та осаду) на характеристики середовища (коефіцієнти пористості, фільтрації, дифузії, масообміну тощо). Практично відсутні є роботи, націлені на розробку математичного забезпечення для систем автоматизованого керування процесами фільтрування. Недостатньо розвинута побудова нових моделей процесів фільтрування шляхом збурення існуючих моделей, які описують відповідні процеси у спрощений спосіб. Багато з процесів фільтрування взагалі мають тільки евристичний опис на основі спостережень без фундаментального математичного обґрунтування.

Розвиток теорії і та адекватного комп'ютерного моделювання процесів фільтрації багатокомпонентної рідини через пористі фільтри потребує нарощування адекватності існуючих математичних моделей як у спосіб формування нових моделей, що враховують досягнення суміжних наук, так і послідовного узагальнення існуючих з контролем за рахунок порівнянь результатів моделювання з даними від дослідників і станцій водоочищення.

Тому вірним є висновок здобувача про **актуальність науково-прикладної проблеми розроблення математичних моделей та числово-асимптотичних методів розв'язання нелінійних регулярно та сингулярно збурених крайових задач процесів очищення рідин від багатокомпонентного забруднення через пористі середовища у ступені, достатньому для автоматизованого керування та ідентифікації невідомих параметрів**, вирішення якої надасть новий імпульс до покращення якості очищеної води та підвищення інтенсивності механізмів її очищення.

Дана робота виконувалася у відповідності з планом науково-дослідних робіт Національного університету водного господарства та природокористування (НУВГП) та Рівненського державного гуманітарного університету (РДГУ) за темами: “Системне математичне моделювання нелінійних збурень процесів типу “фільтрація-конвекція-дифузія” з післядією при неповних даних” (№ держ. реєстр. 0109U001065); “Просторові аналоги крайових задач на квазіконформні відображення і проблеми моделювання нелінійних процесів у пористих середовищах ” (№ держ. реєстр. 0112U001014); “Розробка

та дослідження елементів і систем автоматизації та їх моделювання” (№ держ. реєстр. 0110U000823), “Дослідження та обґрунтування базових параметрів процесу осадження феромагнітних домішок в поліградієнтних фільтруючих загрузках” (№ держ. реєстр. 0114U001139), “Дослідження та теоретико-експериментальне обґрунтування основних параметрів процесу магнітного очищення водних середовищ” (№ держ. реєстр. 0112U001591), “Дослідження і удосконалення базових параметрів апаратів магнітного осадження феровмісних продуктів корозії теплоенергетичного обладнання” (№ держ. реєстр. 0114U001615). У рамках виконання цих робіт автор розробив нові математичні моделі процесів фільтрування та методи їх розв’язання, провів дослідження цих моделей.

Завдання роботи створюють комплексну систему, і для зручності подальших посилань ми їх пронумеруємо:

1 розробити математичні моделі процесів очищення рідин від багатокомпонентних забруднень шляхом фільтрування для випадків:

1.1 домінування одних складових процесу над іншими;

1.2 зворотного впливу характеристик процесу (концентрації забруднення рідини та осаду) на характеристики середовища (коефіцієнти пористості, фільтрації, дифузії, масообміну тощо);

2 розробити методологію побудови числово-асимптотичного розкладу розв’язків відповідних модельних нелінійно-збурених задач, на основі отриманих розв’язків провести дослідження відповідних процесів очищення рідин;

3 розробити методику ідентифікації невідомих параметрів процесу очищення рідини від багатокомпонентного забруднення;

4 на основі розроблених математичних моделей розробити систему автоматизації процесу керування очищенням рідини від багатокомпонентного забруднення;

5 розроблені методики узагальнити [точніше казати – «розповсюдити»!] на моделювання та прогнозування процесів:

5.1 очищення рідин багат шаровими фільтрами,

5.2 прояснювачами із шаром завислого осаду;

5.3 магнітними та біологічними фільтрами та відповідними "просторовими фільтрами";

**Розглянемо ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації Сафоника Андрія Петровича.**

Основні наукові результати в дисертації в цілому обґрунтовані теоретично та підтверджені великим обсягом числових результатів, які, зокрема, були внеобхідними в процесі розробки систем керування станцій водоочищення.

Адекватність розроблених у роботі математичних моделей відповідним процесам фільтрування підтверджена відповідністю результатів проведених числових і фізичних експериментів, що проводились у спеціалізованих лабораторіях Національного університету водного господарства та природокористування, а також з результатами окремих натурних спостережень реальних об’єктів фільтрування.

Наукові положення і висновки, сформульовані в дисертаційній роботі, є всі підстави вважати обґрунтованими теоретично, а також підтвердженими практично у спосіб впровадження на водоочисних підприємствах (не зважаючи на ту особливість, що подробиці обчислювальних технологій, створених здобувачем, у даній роботі іноді бувають опущені).

**Достовірність одержаних в дисертації результатів і висновків** принципово

гарантується математичною точністю постановок задач, забезпечується у деталях використанням основних положень теорії регулярних і сингулярних збурень та застосуванням випробуваних математичних методів точного та наближеного числового розв'язку, порівнянням результатів обчислень, одержаних різними методами, зокрема, коли це було можливим, - порівнянням з точними розв'язками.

**Наукова новизна отриманих здобувачем результатів.** Враховуючи існуючі публікації та зміст дисертаційної роботи, яка розглядається, можна підтвердити, що в ній *вперше*

- 1) розроблено математичну модель процесу очищення рідин від багатокомпонентного забруднення для випадку домінування одних складових процесу над іншими, яка відрізняється від існуючих врахуванням зворотного впливу характеристик процесу (концентрації забруднення рідини та осаду) на характеристики середовища (коефіцієнти пористості, фільтрації, дифузії, масообміну тощо), і на прикладі очищення рідини від багатокомпонентних домішок (у механічних, магнітних і біологічних фільтрах) запропоновано спосіб подолання обчислювальної складності розрахунку та верифікації моделі на основі нового підходу до теоретичного обґрунтування моделі прояснення води в шарі завислого осаду.
- 2) побудовано математичну модель процесу аеробного очищення стічних вод, що враховує взаємодію бактерій, органічної і біологічно неокисної речовин, що узагальнено на процес очищення води у фільтрі-освітлювачі з урахуванням впливу дози реагенту та незворотної коагуляції домішкових частинок, а також запропоновано просторове узагальнення відповідної математичної моделі біологічного очищення, що дозволяє розраховувати потрібні параметри процесу очищення та оцінити точність отриманих розрахунків відповідно до результатів експериментальних досліджень.
- 3) побудовано математичну модель процесу магнітного осадження домішок в одно-, дво- та  $n$ -шаровому фільтрі, яка описує закономірності фільтрування й нагромадження домішок у пористій засипці, що розповсюджено на процес магнітного осадження домішок в зернистому фільтруючому матеріалі з урахуванням напруженості магнітного поля, зворотного впливу характеристик процесу (концентрації осаду) на технологічні параметри, зокрема на: пористість, напруженість магнітного поля, коефіцієнт відриву від гранул фільтруючого матеріалу частинок домішок, коефіцієнт фільтрації, що забезпечує прийнятну точність розрахунків для реальних технологічних процесів очищення.
- 4) одержано асимптотичні та числово-асимптотичні розклади нелінійно-збурених модельних задач процесів очищення рідин від багатокомпонентного забруднення (для одновимірного та просторового випадків), що дозволило розширити клас розв'язуваних задач і врахувати форму фільтра.
- 5) обґрунтовано спосіб визначення невідомих параметрів моделей очищення рідин від багатокомпонентних забруднень механічними, магнітними та біологічними фільтрами, що дає можливість застосувати методи обернених задач і, таким чином, розширити клас розв'язуваних задач до практично необхідного.
- 6) на основі розроблених математичних моделей процесів магнітного біологічного та механічного очищення рідин від багатокомпонентних забруднень розроблено автоматизовану систему керування відповідними процесами.

**Значущість отриманих результатів** для науки і практичного використання обумовлене тим, що отримані теоретичні результати та розроблені числові методи є основою для розв'язання наступних важливих прикладних задач:

- визначення часу захисної дії фільтра та регенерації, що забезпечує ефективний режим його роботи;

- розроблення прикладних програм, які дозволяють оперативно розраховувати параметри процесів фільтрування;
- заміна натурних експериментів на комп'ютерні, що зменшить затрати на виробництво очисних систем, а також надасть економію фільтруючих матеріалів; визначення невідомих параметрів процесів фільтрування;
- розроблення системи автоматизації процесу очищення рідини від багатокомпонентного забруднення, що підвищує продуктивність роботи очисних споруд.

Результати роботи впроваджено в робочих проектах на об'єктах "Реконструкція очисних споруд м. Баранівка Житомирської обл." та "Коригування робочого проекту "Реконструкція очисних споруд смт. Летичів Хмельницької обл.", на об'єкті "Будівництво об'єкту автодорожнього сервісу (кемпінг) вул. Бродівського, 96, с. Опарипси Радивилівського району Рівненської області", в проектно-розрахункових роботах при розробці системи очищення технологічних водних середовищ від залізовмісних домішок на котельнях виробничо-житлового комунального господарства (МПП "Мікроком-сервіс), на станції знезалізнення "Гоща", що підтверджується актами та довідками у додатках до дисертації..

Запропоновані моделі та алгоритми використовувалися для розв'язання відповідних задач у науково-дослідній лабораторії "Процеси і апарати фізико-хімічних методів очистки" кафедри фізики НУВГП, науково-дослідній лабораторії "Математичне моделювання нелінійних збурень процесів та систем" кафедри інформатики та прикладної математики РДГУ.

Матеріали дисертації використовуються в кількох учбових курсах кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій НУВГП і кафедри інформатики та прикладної математики РДГУ.

**Повнота викладення результатів в опублікованих матеріалах** цілком відповідає вимогам до докторських дисертацій: загалом 65 наукових праць, у тому числі: 1 монографія у співавторстві, 30 статей у фахових наукових виданнях з технічних наук, 5 публікацій у закордонних журналах (11 праць без співавторів), 1 патент на корисну модель. У цих роботах у достатньому обсязі відбито основні результати дисертації.

Особистий внесок здобувача в усіх сумісних публікаціях є підтвердженим.

### **Структура та зміст дисертації.**

Дисертація за об'ємом і структурою відповідає існуючим вимогам, зокрема, налічує 278 сторінок основного тексту при загальному обсязі 345 сторінок.

В *першому розділі* здійснено огляд та аналіз математичних моделей, що описують процеси очищення рідин від багатокомпонентних забруднень. Наведено найбільш відомі математичні моделі теорії очищення рідин шляхом фільтрування. Проаналізовано відомі підходи та методи до моделювання процесів очищення рідини від багатокомпонентного забруднення шляхом фільтрування, розглянуто основні феноменологічні моделі процесів фільтрування у пористому середовищі. Здійснено огляд наукової літератури, присвяченої процесам фільтрування рідин, моделюванню процесів очищення рідин шляхом фільтрування, наведено загальну методологію розв'язання задач теорії фільтрування, зокрема, методика розв'язання сингулярно збурених крайових задач типу "фільтрація-конвекція-дифузія-масообмін". Обґрунтовано доцільність розроблення математичних моделей, визначення невідомих параметрів процесу очищення, а на їх основі автоматизованих систем керування очисними спорудами. Розділ завершується

постановкою задачі дисертаційної роботи..

*Другий розділ* присвячено побудові математичних моделей процесів очищення рідин від багатокомпонентного забруднення у пористих середовищах з урахуванням зворотних впливів (концентрації забруднення та осаду) на характеристики середовища (коефіцієнти пористості, фільтрації, дифузії, масообміну тощо), а також узагальнення відповідних моделей на дво- та багат шарові фільтри.

*У третьому розділі* йдеться про розробку математичних моделей процесів біологічної очистки рідини від багатокомпонентного забруднення, зокрема моделюванню процесу прояснення стічної води у прояснювачі, моделюванню процесу аеробного очищення стічних вод в пористому середовищі, побудову числово-асимптотичне наближення розв'язків просторових модельних задач процесу аеробного очищення стічної води, моделювання сингулярно збурених процесів конвективної дифузії з урахуванням масообміну та температурного режиму, комп'ютерне моделювання процесу біологічного очищення води у регенераторі аеротенка.

*Четвертий розділ* присвячено питанням побудови математичних моделей процесів очищення рідин від багатокомпонентного забруднення магнітними фільтрами (осаджувачами) та аналізу відповідних процесів очищення на основі розроблених моделей, зокрема: вирішуються питання врахування зворотного впливу характеристик процесу (концентрації забруднення рідини та осаду) на характеристики середовища (коефіцієнти пористості, фільтрації, масообміну тощо) для випадку багатокомпонентності домішкових частинок у магнітних фільтрах, досліджується залежність процесу очищення від швидкості, тиску тощо.

*У розділі п'ятому* розглядаються та вирішуються питання очищення рідини від багатокомпонентного забруднення в припущенні домінування одних складових процесу над іншими, а також розв'язання обернених задач на знаходження невідомих коефіцієнтів з метою ідентифікації параметрів процесу очищення, та з врахуванням зворотний вплив визначальних факторів (концентрації забруднення рідини та осаду) на характеристики середовища (коефіцієнт пористості, дифузії).

*У шостому розділі* розглядаються та вирішуються питання комп'ютерного моделювання та автоматизації процесу очищення рідин, побудові систем автоматизованого контролю процесом очищення води та регенерації фільтра; розробки автоматизованих систем магнітної, біологічної очистки води; а також побудови автоматизованих систем, які на основі розрахункових залежностей дозволяють здійснювати контроль водоочисними станціями та промисловими очисними системами, що на даний час функціонують у ручному режимі експлуатації.

*У висновках* викладено основні наукові результати роботи та напрямки перспективних досліджень.

**Автореферат** здобувача передає зміст основних наукових положень, практичну значущість та висновки роботи. Дисертаційна робота та автореферат оформлені у відповідності з вимогами, що стосуються докторських дисертацій в Україні.

**У докторській дисертації Сафоника А. П. не фігурують** як наукові результати здобувача і не виносяться на захист результати наукових досліджень, за якими здобувач захистив **кандидатську дисертацію** “Моделювання нелінійних процесів фільтрування з урахуванням зворотних впливів та дифузійно-масообмінних збурень” за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, у 2010 році в спеціалізованій раді Національного університету “Львівська політехніка”.

Математика та прикладна частина дослідження Сафоника А. П. не мають суттєвих вад, про обрані шляхи досягнення результатів теж не варто сперечатись, оскільки вони призвели до бажаних результатів. Але викладення цієї великої, цікавої і об'єктивно

складної для сприйняття роботи має деякі недоліки, здебільшого в частині узагальненого погляду на її результати. Цим викликані основні **зауваження**. А саме

**1** Хоча задачі роботи сформульовано цілком адекватно відносно мети роботи і покрито в цілому новизною дослідження, зіставляти їх з формулюванням новизни у деталях важко, оскільки ці формулювання мають іншу структуру і, навіть, використовують дещо іншу термінологію. Наприклад, задачі вимагають розробити «методологію» (друга) і «методику» (третя задача), але жодне з формулювань новизни не стверджує своїм початком про те, що розроблено методологію, методику або хоча б метод. Лише за основним текстом дисертації та актами впровадження можна «вирахувати», що саме із зробленого здобувачем відповідає вказаним завданнями дисертації. Також окремі пункти новизни відповідають не одому певному завданню роботи а кільком, наприклад, перший відповідає завданням 1.1, 1.2, 5.2, 2 за нашою нумерацією, виконавши їх у своїй певній частині.

**2** Формулювання новизни та структура самої дисертаційної роботи незручно узгоджуються між собою. Наприклад, якщо читача роботи зацікавить випадок «домінування одних складових процесу над іншими ...» - перший пункт новизни - і він сподіватиметься знайти розгорнутий розгляд у 2-му розділі дисертації (першому, який призначається для викладення нових результатів), то він помилятиметься і змушений буде шукати аж до 5-го розділу, в якому «розглядаються і вирішуються питання ... в припущенні домінування одних складових процесу над іншим ...». Цю незручність для читача можна було б компенсувати навігаційними вказівками на початках розділів та відповідних параграфів автореферату.

**3** Нажаль, компактність формулювань задач дослідження досягнуто за рахунок опускання значущих слів, що призводить до деформації змісту: п'яте завдання вимагає створити, не мало, не багато, «систему автоматизації керування» (!?), шосте – передати для впровадження «апаратно-програмні комплекси» (тобто, зокрема «логічний контролер МК-51... з модулем розширення МР-07» - див. розділ 6.2 і далі за текстом дисертації - «програмовано-логічний контролер S7-300 з процесором CPU315-2DP від фірми Siemens...»). Невже ці роботи можна віднести до спеціальності 01.05.02? Вірогідно, що малось на увазі:

завдання 5 – «на основі розроблених математичних моделей розробити *модельючу систему у складі* системи автоматизації процесу керування очищенням рідини від багатокомпонентного забруднення;

завдання 6 – «передати в проектні організації та на об'єкти водоочищення розроблені *управляючі програми для* апаратно-програмних комплексів, методики, *комп'ютерні додатки* і результати імітаційного моделювання для безпосереднього використання.

**4** Слово «урахування», вжите при формулюванні науково-технічної проблеми, вказує нібито на те, що автоматизоване керування та ідентифікація параметрів при домінуванні одних компонент процесу над іншими вже здійснювались раніше, і здобувач тільки зумів відбити це в математичній моделі. Насправді ж, навпаки, і тому мова повинна йти про «проблему розвинення теорії математичного моделювання нелінійних технологічних процесів очищення рідин від багатокомпонентних забруднень *у ступені, достатньому* для автоматизованого керування».

**5** Як для великої роботи, дисертація Сафоника А. П. містить небагато технічних помилок, вона і автореферат ретельно редагувались. Одначе прикрим є те, що іноді описки та неточності зустрічаються саме у місцях, які привертають до себе підвищену увагу. Наприклад,

- чомусь саме на першій стор. автореферату майже у кожному параграфі зустрічається дрібна вада типу неузгодженості іменника з прийменником, відсутності коми і т.і.;

- з формулювання другого завдання дослідження випало слово «багатокомпонентних»;

- наприкінці першого розділу при загальній постановці математичних задач

дослідження у коментарі до системи рівнянь у частинних похідних відсутнє пояснення, що саме позначено буквами  $b_i b^*$ ;

- при поясненні змісту **своєї** кандидатської дисертації здобувач посилається на півтора десятка робіт, але з номерами посилань щось сталося, і 5 посилань припадають на роботи інших авторів.

**6** Шостий розділ дисертації вміщує значний об'єм пояснень до засобів побудови систем керування процесами водоочищення, зокрема апаратних, які, звісно, що здобувач сам не створював. Доцільніше було винести таку інформацію або до розділу 1 або у додатки.

**7** Не слід було опускати всі деталі нових обчислювальних алгоритмів, створених здобувачем під час його дослідження, оскільки від цього іноді залежить довіра до них у прикладному плані. Місце їм у додатках, об'єм яких не обмежується.

Цілком зрозуміло, що зроблені зауваження не ставлять під сумнів наукові результати здобувача, загальну якість виконаної ним роботи і, відповідно, її позитивну оцінку.

Оцінюючи роботу в цілому, вважаю, що дисертаційна робота **Сафоника Андрія Петровича** на тему “Моделювання нелінійно-збурених керованих процесів очищення рідин від багатоконпонентних забруднень” є завершеною науковою працею, в якій отримані нові, науково обґрунтовані та практично важливі результати, які у сукупності вирішують науково-прикладну проблему розвинення теорії математичного моделювання нелінійних технологічних процесів очищення рідин від багатоконпонентних забруднень у ступені, достатньому для автоматизованого керування та ідентифікації параметрів при домінуванні одних компонент процесу над іншими та розвитку методології розв'язання відповідних нелінійно-збурених задач, що має за мету покращення якості та підвищення інтенсивності механізмів очистки води.

Основні результати дисертації відповідають вимогам паспорту наукової спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, зокрема п. 1, п. 2 та п. 3.

Дисертаційна робота за своїм змістом відповідає вимогам п. п. 9,10, 12, 13 “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника” щодо докторських дисертацій, а її автор – Сафоник Андрій Петрович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

#### ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ:

професор кафедри моделювання систем і технологій  
Харківського національного університету  
імені В. Н. Каразіна,  
д.т.н., проф.



Підпис д.т.н. проф. Міщенко В. О. засвідчую

Міщенко В.О.