

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію  
Зеленського Кирила Харитоновича

« Математичне моделювання нелінійних полімерних матеріалів в екструдерах»,  
що представлена до спеціалізованої вченої ради Д 26.255.01  
на здобуття наукового ступеню доктора технічних наук  
за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

### Актуальність теми дисертації.

Покращення якості виробів із полімерних матеріалів у зв'язку з їх широким застосуванням у різних галузях промисловості пов'язано із удосконаленням функціонування устаткування для перероблення цих матеріалів. З огляду на значну коштовність полімерних матеріалів експериментальне дослідження не є ефективним способом удосконалення виробництва виробів із полімерних матеріалів. Тому пошук альтернативних засобів дослідження впливу конструктивних і характеристик устаткування та реологічних параметрів полімерів на якість кінцевого продукту є важливою задачею. Одним із таких засобів є математичне моделювання процесів, що відбуваються у при переробці полімерів.

Оскільки пошук розв'язків відповідних крайових задач відомими методами (різницеvими, методами скінченних елементів тощо) не є ефективним стосовно нелінійних крайових задач математичної фізики з точки зору застосування отриманих розв'язків для вирішення задач управління нелійними об'єктами із розподіленими параметрами, задача розробки альтернативних підходів до вирішення зазначеної проблеми є на часі.

Тому створення наукових засад удосконалення і створення нового обладнання для комплексного екструзійного перероблення термопластичних матеріалів, які забезпечують визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів екструзійного обладнання є актуальною науково-технічною проблемою.

Про актуальність досліджень також свідчить те, що дисертаційна робота виконувалася у національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» на кафедрі теоретичної електротехніки відповідно до пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки в Україні, а також відповідно до тематики держбюджетних науково-дослідних робіт КІІ і Ігоря Сікорського «Методи та засоби структурно-параметричної ідентифікації електротехнічних систем технологічної лінії з виробництва вітчизняного кабелю з полімерною ізоляцією на надвисокі напруги» (№ 2908-п № державної реєстрації 0116U003716; замовник – МОН України; автор – виконавець теми).

### Структура дисертаційної роботи

Дисертаційна робота структурно складається з анотації, вступу, восьми основних розділів, висновків, списку використаних літературних джерел та трьох додатків.

Роботу викладено загальним обсягом 274 стор., вона містить 36 рисунків, 2 таблиці та список використаних джерел з 359 найменувань та додатків.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, зазначено її зв'язок із науковими програмами та темами, сформульовано мету і задачі досліджень,

*Вр. N 161, 29.04.21-2*



викладено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, наведено дані щодо публікацій автора за темою дисертації і його особистий внесок у роботах, написаних у співавторстві, а також відомості щодо впровадження результатів дисертаційної роботи.

У **першому розділі** виконано критичний аналіз технологічного процесу виготовлення кабелів на надвисокі напруги із ізоляційним полімерним покриттям за допомогою екструзійного устаткування, розглянуто існуючі підходи до математичного і комп'ютерного моделювання процесів теплообміну в одношнекових екструдерах.

Було зазначено, що ці підходи є спрощеними і не враховують специфіку процесів теплообміну у різних конструктивних зонах пластикуючого екструдера, що суттєво впливає на якість кінцевого продукту.

В результаті виконаного аналітичного дослідження зроблено висновок, що забезпечення якісного вихідного продукту необхідно врахувати нелінійні властивості полімерних матеріалів і специфіку процесів масо і теплоперенесення у різних конструктивних зонах екструдера. На ґрунті виконаного аналізу сформульовано постановку задач досліджень.

**Другий розділ** присвячено формулюванню математичних моделей у різних зонах екструдера: нагріву корпусу екструдера, зони завантаження та затримки плавлення, зони плавлення полімеру як двохфазної "прбока"-- розплав, зони дозування (гомогенізація і кристалізація розплаву).

**Третій розділ** присвячено розробці числово-аналітичного методу розв'язання нелінійних крайових задач математичної фізики. Пропонований метод ґрунтується на застосуванні скінченних інтегральних перетворень за всіма незалежними змінними і побудові ітераційної процедури пошуку розв'язків крайових задач спершу до лінійної частини відповідних рівнянь, а на наступних ітераціях – до нелінійних частин диференціальних рівнянь із частинним похідними математичної фізики. Оцінка точності розв'язків, що отримуються на ітераціях, здійснюється як різниця за нормою у гільбертовому просторі між двома суміжними ітераціями.

В якості ілюстрації застосування ітераційного числово-аналітичного методу наведено математичне моделювання процесів вирощення монокристалів і наплавлення за допомогою лазерного нагрівання злитків. Також у цьому розділі вирішується задача формування зварного шву при електродуговому зварюванні матеріалів як двохфазна задача тверде тіло – розплав.

**Четвертий розділ** присвячено розробці алгоритмічного забезпечення розв'язання крайових для нелінійних рівнянь математичної фізики. Розроблено метод апроксимації функцій, що подано у вигляді функціональних рядів за допомогою апроксимації їх дробово-раціональними функціями із застосуванням теорії ланцюгових дробів. Показана ефективність такої апроксимації стосовно функцій Бесселя. Розроблено метод (алгоритм) інтегрування добутків функцій Бесселя за рахунок подання цих добутків у вигляді суми відповідних ланцюгів другого порядку, інтегрування яких є стандартна процедура математичного аналізу.

У другій частині цього розділу розроблено застосування інтегральних перетворень до конвективних складових у рівняннях Нав'є–Стокса, що відображають процеси перенесення маси і енергії. Алгоритми спрощення також ґрунтуються на апроксимації рядів дробово-раціональними виразами другого порядку, які у просторі оригіналів за Лапласом являють собою тригонометричні функції із запізненням. Для



алгоритмів, що розроблено, реалізовано відповідне програмне забезпечення, що наведено у додатку 2. Наведено числові розрахунки алгоритмів, які свідчать про достатню точність апроксимації як функцій Бесселя, так і апроксимації конвективних складових.

У п'ятому розділі вирішується задача індукційного нагрівання корпусу екструдера із урахуванням променистого випромінювання на межі індуктор – зовнішня поверхня корпусу, як основного джерела нагрівання полімерної суміші. Задача вирішується із застосуванням пропонованого у третьому розділі ітераційного числово-аналітичного методу розв'язання із застосуванням алгоритмів апроксимації розділу 4.

Шостий розділ присвячено математичному і комп'ютерному моделюванню процесів нагрівання полімерної суміші до температури, близької до температури плавлення полімеру. У крайовій задачі враховується залежність коефіцієнту теплоємності від температури полімеру. Урахування цієї залежності суттєво впливає на точність визначення температурного поля суміші у зоні завантаження полімерної суміші.

Результати моделювання свідчать про значущість урахування цієї нелінійності на точність визначення температурного поля і надають можливість оптимізувати довжину цієї зони. Також у розділі вирішується задача математичного моделювання у так званій зоні затримки плавлення, тобто, коли температура суміші досягає значення близького до температури плавлення і починається процес плавлення у тонкій плівці прилеглому шару полімеру. Задача розглядається як одновимірна задача типу Стефана фазового переходу суміш – розплав. Автором запропоновано ітераційний алгоритм вирішення цієї задачі.

У сьомому розділі розглядаються методи математичного моделювання системи рівнянь масо і теплоперенесення у зоні плавлення із урахуванням конвективного перенесення маси рідини, дисипативної складової та залежності коефіцієнту в'язкості від температури полімеру. Суттєвим у цих моделях є наявність фазового переходу тверде тіло – рідина (розплав полімеру). Визначення швидкості руху межі фазового переходу і порівняння її із радіальною швидкістю обертання шнеку надає можливість оптимізувати температуру розплаву (для запобігання його перегрівання), отже, визначити оптимальну довжину зони завантаження, за рахунок оптимізації теплового внеску індуктором у нагрівання корпусу екструдера.

Восьмий розділ дисертації присвячено математичному моделюванню процесів у зоні дозування. У цій зоні здійснюються процеси гомогенізації і кристалізації розплаву полімеру. Сформульовано задачу математичного моделювання як тепло кінетичну задачу визначення частки процесу кристалізації і гомогенізації у поточному перерізі зони дозування як сумісної задачі рівняння для плавлення полімеру і кінетичних рівнянь полімеризації і кристалізації. Розроблений метод розв'язання цієї задачі за допомогою ітераційного числово-аналітичного методу (розділ 3) та алгоритмів апроксимації (розділ 4). Наведені результати комп'ютерного моделювання свідчать про ефективність пропонованих методів моделювання. Точка у зоні дозування, де частка кристалізованого розплаву є близька до одиниці, визначає довжину цієї зони і також підлягає оптимізації потужності індуктора. Що нагріває корпус екструдера у цій зоні. Процес полімеризації і кристалізації також здійснюється за рахунок проточної води у порожнині шнеку.



У **висновках** сформульовано основні наукові і практичні результати, що отримано у дисертаційній роботі, а також стверджується, що на основі виконаних теоретичних і практичних (експериментальних) досліджень у дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну проблему створення засобів математичного моделювання за допомогою ітераційного числово-аналітичного методу розв'язання нелінійних крайових задач математичної фізики та методів еквівалентного спрощення відповідних моделей, що надає можливість автоматизувати процеси розв'язання нелінійних крайових задач для різноманітних процесів, які описуються лінійними та нелінійними рівняннями із частинними похідними.

У **додатках** наведено акти впровадження результатів досліджень, програмна реалізація алгоритмів математичного моделювання процесів екструдері (додаток 1) та програмна реалізація алгоритмів інтегрування добутків циліндричних функцій, як складових у алгоритмах розв'язання нелінійних крайових задач у циліндричній системі координат (труба тощо).

### **Основні наукові результати**

У дисертаційній роботі Зеленьського К.Х. вирішено науково-практичну проблему створення методів і комп'ютерних засобів математичного моделювання процесів масо і теплообміну при переробленні полімерних матеріалів із урахуванням їх нелінійних властивостей. Аналіз дисертаційної роботи дозволяє зробити висновок, що автором у процесі досліджень отримані такі нові основні результати:

1. Вперше розроблено числово-аналітичний ітераційний метод розв'язання нелінійних крайових задач, що описуються системами нелінійних диференційних рівнянь у частинних похідних математичної фізики, який на відміну від існуючих підходів надає можливість отримати розв'язок цих задач у квадратурах, що сприяє створенню систем автоматичного або автоматизованого управління технологічними процесами у реальному часі.
2. Розроблено математичне та алгоритмічне і програмне забезпечення, що реалізує цей метод. Зокрема, запропоновано метод апроксимації циліндричних функцій дробово-раціональними виразами. Розроблено алгоритми еквівалентного спрощення складних виразів, що ґрунтуються на використанні апарату ланцюгових дробів. Розроблене алгоритмічне та програмне забезпечення надає можливість автоматизувати процес отримання розв'язків нелінійних крайових задач.
3. Запропоновано математичні моделі, що описують процеси: нагрівання корпусу екструдера, полімерної суміші у зоні завантаження, плавлення цієї суміші та її кристалізації у зоні дозування.
4. Вперше розроблено методи розв'язання нелінійних крайових задач тепломасоперенесення у зоні завантаження і пластикації екструдера, що ґрунтуються на використанні запропонованого ітераційного методу розв'язання нелінійних крайових задач.
5. Розроблено методи розв'язання крайових задач, що описують конвективно-дифузійні процеси у зоні плавлення полімерів та у зоні дозування із урахуванням реологічних властивостей полімерів із урахуванням наявної двофазної зони тверда суміш – розплав полімеру.



6. Запропоновано рекомендації щодо оптимального управління температурними полями в екструзійних пристроях як управління нелінійним об'єктом із розподіленими параметрами.

Дістали подальший розвиток:

1. Удосконалені математичні моделі процесів нагріву корпусу екструдера, процесу завантаження, плавлення полімерів у одношнековому екструдері.
2. Дослідження впливу різних чинників на динаміку плавлення полімерних сумішей, що підвищує ефективність проектування і модернізації екструдера.
3. Вплив процесів гомогенізації та кристалізації на якість кінцевого продукту.

### **Практична цінність результатів дисертаційної роботи**

Розроблені автором математичні моделі та методи моделювання процесів нагрівання, плавлення і течії полімерів у каналах екструзійних машин, надають можливість:

- проектувати нове обладнання, удосконалювати технологічні режими, при цьому мінімізувати коштовні натурні випробування;
- визначати області локальних перегрівів, що важливо при використанні сучасних полімерних матеріалів;
- враховувати вплив процесів тепломасоперенесення у шнеці на процеси пластикуючої екструзії;
- розробляти системи автоматичного управління технологічними процесами екструзії, орієнтованими на випуск нової продукції;

Дослідження, виконані автором, розширюють уявлення про процеси тепломасоперенесення, руху нелінійних полімерних середовищ у каналах екструзійного обладнання в умовах фазового переходу.

Практична цінність отриманих результатів підтверджена наведеними у додатках документами про впровадження результатів досліджень для удосконалення технологічних режимів роботи пластикуючих екструдерів при виготовленні пластмасової ізоляції на заводі "Південкабель" м. Харків, ПНВП «Прикарпатгаз» та ТОВ «Укрекоконсалт» та у навчальний процес НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Коло практичних застосувань результатів роботи, на наш погляд, не обмежується розглянутими в ній впровадженнями. Результати дисертаційної роботи можуть бути застосовані у наукових дослідженнях у споріднених галузях, а також в освітньому процесі закладів вищої освіти.

### **Ступінь обґрунтованості та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи**

Достовірність наукових положень і результатів, отриманих у дисертаційній роботі, підтверджується коректним використанням математичного апарату, зокрема математичного моделювання нелінійних динамічних систем – для побудови і дослідження процесів; методів математичної фізики; методів еквівалентних перетворень; методів обчислювальної математики – для комп'ютерної реалізації розроблених алгоритмів числово-аналітичного розв'язання крайових задач для нелінійних рівнянь математичної фізики; методів програмної інженерії – у розробці програмного забезпечення, що реалізує розроблені автором алгоритми; методами числового експерименту – для числового дослідження математичних моделей;



позитивними результатами дослідно-промислової перевірки запропонованих рекомендацій та їх впровадженням.

Наукові положення дисертації, основні результати досліджень, висновки і рекомендації достатньо обґрунтовані та відображають особистий внесок здобувача в досягненні мети дослідження.

### **Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації та опублікованих роботах автора**

Результати дисертаційного дослідження опубліковано у 47 публікаціях за темою дисертації, з яких: 1 колективна монографія, 27 публікацій у виданнях, що входять до переліку, затвердженого МОН України; 6 публікацій у виданнях, які включено до міжнародних наукометричних баз, з них 5 публікації у виданнях, що включено у міжнародні наукометричні бази Scopus та Web of Science; 2 публікації у закордонних виданнях, 14 публікацій у матеріалах наукових конференцій, зокрема 7 публікацій виконано одноосібно, англійською мовою – 6 публікацій. Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи відображено у публікаціях рівномірно за розділами.

Публікації автора задовольняють усім вимогам чинного «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567. Повнота відображення результатів дисертаційного дослідження та умови щодо кількості публікацій відповідає вимогам, які висуваються до докторських дисертацій з обраної спеціальності.

### **Оцінка мови, стилю та оформлення дисертації й автореферату**

Дисертаційну роботу написано українською мовою грамотно, на хорошому стилістичному рівні. Тест дисертації викладено грамотною технічною мовою, логічно і послідовно. Стиль викладення доказовий.

Застосована в роботі наукова термінологія є загальновизнаною, стиль викладення результатів теоретичних і практичних досліджень, нових наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття та використання. Мова і стиль викладання дисертації та автореферату коректно висвітлюють отримані науково-практичні результати.

Зміст автореферату повністю відповідає змісту дисертаційної роботи. Автореферат містить основні положення, висновки і рекомендації, що наведено у дисертації, а також усю іншу необхідну для оцінки роботи інформацію. Оформлення дисертаційної роботи й автореферату повністю відповідає вимогам державних стандартів України.

### **Зауваження по дисертаційній роботі**

1. Темою дисертаційного дослідження є математичне моделювання процесів в екструдерах. Було б доцільно дати коротке визначення та опис процесу екструзії, екструзійних пристроїв та їх застосування у вступі та першому розділі дисертації.

2. У другому розділі представлено математичні моделі, які детально розглянуті в наступних розділах. На мій погляд було б доцільно ввести підрозділ з описом і графічної ілюстрацією: в яких зонах екструдера і які саме процеси описують



запропоновані математичні моделі. Це значно спростило б розуміння всіх наступних розділів і сприйняття роботи як єдиного цілого..

3. У роботі наведено огляд існуючих методів розв'язання нелінійних крайових задач математичної фізики (підрозділ 3.2), та відомості із теорії ланцюгових дробів (підрозділ 4.2). Це було б доцільно зробити в першому розділі, а в подальших розділах надати запропоновані автором методи і алгоритми.

4. У третьому розділі в якості застосування пропонованого методу розв'язання нелінійних крайових задач розглянуто задачу про вирощування монокристалів. При розв'язанні задач типу Стефана розглянуто задачу про плавлення і випаровування матеріалу. Було б доцільним вказати застосування запропонованого методу і зв'язок розглянутих задач із задачами моделювання процесів в екструдерах.

5. У четвертому розділі при апроксимації добутку циліндричних функцій зазначено «Поставимо задачу домогтися точності апроксимації  $\varepsilon = 0,00001$ ». З тексту роботи не зрозуміло, чому обрана саме така точність і як вона досягається.

6. У висновках по розділу п'ять сказано, що «показана доцільність урахування променистого випромінювання на визначення оптимального температурного поля корпусу екструдера», але з тексту розділу це незрозуміло. Також в тексті розділу не вказано, як саме «математичне моделювання процесу індукційного нагріву корпусу екструдера із урахуванням променистого випромінювання ... надало можливість удосконалити процес теплопередачі від індуктора до корпусу екструдера», про що зазначено у висновках до роботи.

7. У підрозділі 6.2.1 «Оцінка похибки ітерацій» бажано було б навести числові значення для похибки ітераційної процедури побудови температурних полів, що представлені на рис. 6.3-6.4.

8. У висновках до розділу сім зазначено, що «отриманий вираз для рухомої межі може використовуватися для постановки задачі оптимального управління процесом плавлення полімерів», але в тексті розділу не вказано, як саме.

9. На рис. 6.1 наведено залежність температури на межі корпус – шнек від параметрів, але не вказано, від яких.

10. Рисунок 5.1 збігається з рисунком 2.1

11. В роботі нерідко зустрічається некоректна нумерація рисунків і формул, а також посилань на літературні джерела.

Але наведені зауваження не торкаються сутності виконаних досліджень, не знижують високий науковий рівень дисертаційної роботи і не впливають на її загальну позитивну оцінку.

**Висновки щодо відповідності дисертації встановленим вимогам МОН України.**

Дисертаційна робота К. Х. Зеленського «Математичне моделювання нелінійних полімерних матеріалів в екструдерах» є завершеною науковою працею, в якій отримано нові, науково обґрунтовані та практичні результати, що в сукупності вирішують важливу науково-прикладну проблему створення методів і засобів математичного моделювання процесів оброблення нелінійних полімерних матеріалів в одношнекових екструдерах.



Автореферат у повній мірі відображає основний зміст, результати та висновки дисертаційної роботи і є ідентичним положенням дисертації. Наведені в авторефераті та дисертації публікації повністю висвітлюють основні наукові результати дисертаційного дослідження. Оформлення дисертації і автореферату відповідають вимогам МОН України. Тема, зміст та результати дисертації відповідають паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки).

Вважаю, що за актуальністю теми, високим науковим рівнем виконаних досліджень, новизною, науковим та прикладним значенням одержаних результатів дисертаційна робота «Математичне моделювання нелінійних полімерних матеріалів в екструдерах» відповідає вимогам пп. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567 на здобуття наукового ступеню доктора наук, а її автор Зеленський Кирило Харитонович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент  
професор кафедри прикладної математики  
Харківського національного  
університету радіоелектроніки,  
доктор технічних наук, професор



Л.О. Кіріченко

Підпис проф. Кіріченко Л.О. засвідчую.

Учений Секретар  
Харківського національного  
університету радіоелектроніки



І.В. Магдаліна

« 27 » 04 2021 р.