

## 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

Предметом дисертаційного дослідження є методи математичного та комп'ютерного моделювання процесів масо-тепло-переносу в екструзійному устаткуванні виробництва продукції з полімерних матеріалів.

Дисертаційна робота Зеленського К. Х. 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 університету: «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; науковий керівник – Зеленський К.Х.).

### **Актуальність теми дисертації**

Покращення якості виробів із полімерних матеріалів пов'язано із удосконаленням устаткування для перероблення цих матеріалів. З огляду на значну коштовність полімерних матеріалів експериментальне дослідження процесів їх виробництва є не ефективним способом удосконалення технології. Тому пошук альтернативних засобів дослідження впливу конструктивних характеристик устаткування та

реологічних параметрів полімерів на якість кінцевого продукту є актуальним. Одним із таких засобів є математичне моделювання процесів, що відбуваються при переробці полімерів.

Зважаючи на складність тепло-масо-обмінних процесів, що відбуваються під час термічної обробки полімерної сировини, їх математичні моделі слушно описувати системами диференційних рівнянь із частинними похідними (рівняннями типу рівнянь Нав'є–Стокса). Урахування залежності реологічних і в'язко-пружних властивостей полімерів від температури нагрівання вимагає розглядати такі системи рівнянь як нелінійні.

Оскільки пошук розв'язків відповідних крайових задач відомими методами (різницеvими, методами скінченних елементів тощо) не є ефективним для вирішення задач управління даним технологічним процесом, задача розробки ефективних підходів до вирішення проблеми розробки методів математичного та комп'ютерного моделювання процесів масо-тепло-переносу в екструзійному устаткуванні виробництва продукції з полімерних матеріалів є важливою, а тема відповідних дисертаційних досліджень є актуальною.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації**

Автор добре розуміє специфіку проблеми, що розглядається у дисертації та коректно формулює її постановку.

Достовірність наукових положень і результатів, отриманих у дисертаційній роботі, підтверджується використанням наведеного у розділах 3 – 8 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; методи числового експерименту – для числового дослідження математичних моделей.

### **Достовірність одержаних результатів**

Достовірність наукових положень, які захищаються здобувачем, висновків і рекомендацій підтверджується їх відповідністю методології дослідження поставленій проблемі; повнотою розгляду на теоретичному і експериментальному рівнях об'єкту дослідження, що охоплюють його змістовні і процесуальні характеристики; застосуванням комплексу методів, адекватних предмету дослідження; тривалістю практичної роботи і можливістю її відтворення.

Достовірність і обґрунтованість результатів дисертації базуються на:

– методах математичного моделювання із застосуванням теорії суцільних середовищ, методів математичної фізики, методів наближеного аналізу, що дозволило врахувати специфіку їх застосування для розв'язання прикладних задач;

– коректності виведення математичних залежностей при розробці та удосконалення наявних математичних моделей розглянутих процесів;

– узгодженості із наявними результатами інших авторів, які надруковано у вітчизняній та зарубіжній літературі.

### **Наукова новизна одержаних здобувачем результатів**

У дисертаційній роботі Зеленського К. Х. вирішено науково-практичну проблему, мета якої полягає у створенні методів і комп'ютерних засобів математичного моделювання процесів масо і теплообміну при переробленні полімерних матеріалів із урахуванням їх нелінійних властивостей. З цією метою автором розроблено числово-аналітичний метод розв'язання нелінійних рівнянь математичної фізики.

Автором уперше отримано такі наукові результати:

1. Розроблено чисельно-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'язки 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. Розроблено методи розв'язання нелінійних крайових задач тепло-масо-перенесення 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 з урахуванням реологічних властивостей полімерів.

Набуло подальшого розвитку:

1. Удосконалення математичної моделі процесів нагріву корпусу екструдера, процесу завантаження, плавлення полімерів у одношнековому екструдері.

2. Урахування впливу різних чинників на динаміку плавлення полімерних сумішей, що підвищує ефективність проектування і модернізації екструдера.

3. Урахування впливу процесів гомогенізації та кристалізації на якість кінцевого продукту.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Роботу виконано 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 (Постанова Кабінету міністрів (КМ) України від 24.12.2001 р., № 1716), Державної програми розвитку промисловості на 2003–2011 рр. (Постанова КМ України від 28.07.2003 р., № 1174), а також відповідно до тематики держбюджетних науко-дослідних робіт КПІ ім. Ігоря Сікорського: НДР. «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).

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

Математичні моделі процесів нагрівання, плавлення і текучості полімерів у каналах екструзійних машин та формуючих інструментах надають можливість:

- проектувати нове обладнання, удосконалювати технологічні режими з мінімізацією коштів на проведення натурних випробувань;
- визначати області локальних перегрівів, що важливо при використанні сучасних полімерних матеріалів;
- враховувати вплив процесів тепло-масо-перенесення у шнеці на процеси пластикуючої екструзії;
- розробляти системи автоматичного керування технологічними процесами екструзії, орієнтованими на випуск нової продукції.

Результати даної дисертаційної роботи можуть знайти застосування у наукових дослідженнях споріднених галузей, а також в освітньому процесі закладів вищої освіти.

**Оцінка змісту дисертації, її завершеність у цілому, відповідність оформлення дисертації вимогам, затвердженим МОН України**

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

Роботу викладено загальним обсягом 312 стор. з яких: 232 стор. основного тексту, що містить 48 рисунків, 4 таблиці та список використаних джерел з 358 найменувань на 39 стор. та додатків на 2 стор.

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

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

У **другому розділі** розглянуто математичні моделі у різних зонах екструдера із урахуванням нелінійних властивостей полімерних матеріалів.

**Третій розділ** присвячено розробці числово-аналітичного методу розв'язання нелінійних крайових задач математичної фізики.

Запропонований метод ґрунтується на застосуванні скінченних інтегральних перетворень за всіма незалежними змінними і побудові ітераційної процедури пошуку розв'язків крайових задач для нелінійних диференційних рівнянь із частинним похідними математичної фізики. Досліджено точність розв'язання нелінійної крайової задачі запропонованим методом. Розглянуто комбінований нагрів злитка індуктором і плазмовим джерелом. Наведено розв'язання крайових задач зі змінними межами (задач типу Стефана). Розглянуто задачу плавлення і випаровування матеріалу.

В якості ілюстрації застосування ітераційного чисельно-аналітичного методу наведено результати математичного моделювання процесів вирощення монокристалів і наплавлення за допомогою лазерного нагрівання злитків.

**Четвертий розділ** присвячено розробці алгоритмічного забезпечення розв'язання крайових задач 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.

Розглянуто 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.

У п'ятому розділі виконано комп'ютерне моделювання температурного поля корпусу. Вирішується задача індукційного нагрівання корпусу екструдера із урахуванням променистого випромінювання на межі індуктор – зовнішня поверхня корпусу, як основного джерела нагрівання полімерної суміші на основі застосування ітераційного числово-аналітичного методу із використанням алгоритмів апроксимації.

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.

Також у розділі розв'язується 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 примежового шару полімеру. Задача розглядається як одновимірна задача типу Стефана фазового переходу суміш–розплав.

У сьомому розділі розглядаються методи математичного моделювання системи рівнянь масо-тепло-перенесення 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 та алгоритмів апроксимації). Наведені результати комп'ютерного моделювання свідчать про ефективність запропонованих 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.

#### **Оцінка мови та стилю викладення дисертації і автореферату**

Мова та стиль дисертації та автореферату свідчать про вміння автора аргументовано викладати свої думки та відповідають вимогам МОН України.

Сформульовані у дисертаційній роботі основні положення, висновки та рекомендації викладені у логічній послідовності та доказовій формі, що значно сприяє усвідомленню думок автора. Всі розділи дисертації мають внутрішню єдність і завершеність. Змістовне наповнення підрозділів роботи відповідає змісту визначених розділів.

Отримані підсумкові результати дисертації співпадають із загальною метою і конкретними науковими завданнями, сформульованими у вступі. В цілому, дисертаційна робота сприймається як закінчена наукова праця, що містить нові наукові результати.

## **Підтвердження повноти викладу основних результатів дисертації в наукових фахових виданнях**

Результати дисертаційного дослідження опубліковано у 33 статтях, зокрема, у таких, що належать до наукових фахових видань та індексуються у міжнародних наукометричних базах, та 14 публікацій у доповідях наукових конференцій. Отримані у дисертаційній роботі наукові результати доповідалися та опубліковані у тезах і доповідях 14 міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференцій.

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи відображено у публікаціях рівномірно за розділами.

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.

Публікації Зеленського К. Х. 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.

## **Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації**

Зміст автореферату відповідає основним положенням дисертації і дає повне уявлення про отримані результати дослідження та їх наукову новизну і практичну значимість.

Відмічаю в цілому науково-коректний стиль викладення матеріалів дисертації. Назва роботи відповідає її змісту та паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

## **Зауваження до дисертаційної роботи**

В якості зауважень до дисертаційної роботи варто вказати таке.

1. Роботі більш відповідає назва – «Математичне моделювання процесу виробництва полімерних матеріалів в екструдерах».

2. В першому пункті наукової новизни доцільно замінити «...що сприяє створенню систем автоматичного або автоматизованого управління...» на «...що забезпечує створення покращеної якості систем автоматичного або автоматизованого управління...» .

3. В нумерації пунктів наукової новизни міститься помилка – після четвертого пункту відразу йде шостий (див. стор. 26).

4. В розділі наукова новизна **Дістали подальший розвиток:** далі йдуть некоректні перелічення списком, наприклад:

– вплив різних чинників на динаміку плавлення полімерних сумішей, що підвищує ефективність проектування і модернізації екструдера.

– вплив процесів гомогенізації та кристалізації на якість кінцевого продукту.

5. В пункт **На захист виносяться** не може включатися постановка задачі.

6. Висновки по розділам в ряді випадків написано у вигляді анотації того, що зроблено.

7. Алгоритм перетворення конвективної складової рівнянь Нав'є–Стокса у додатку 2 відсутній, хоча на це є посилання на стор.141. У додатку 2 є тільки лістинг програми.

8. Формули в ряді випадків йдуть без пояснення змінних та параметрів, які в них присутні, наприклад: (3.147), (3.148), (4.25) и т.д.

9. Відсутній аналіз обчислювальних витрат на реалізацію запропонованих алгоритмів.

10. Відсутній аналіз сходження запропонованих алгоритмів.

11. У розділі 3 розроблено метод розв'язання нелінійних крайових задач математичної фізики із лінійними межовими умовами. При цьому не висвітлено питання нелінійних межових умов, що має місце у численних додатках.

12. Не зрозуміло, яким чином отримано апроксимуючий вираз (6.2) для коефіцієнту тепломісткості.

13. В роботі мають місце окремі стилістичні та граматичні помилки.

14. У роботі відсутні матеріали, які відповідають пункту наукової новизни, а саме: «Запропоновано метод оптимального управління температурними полями в екструзійних пристроях, як управління нелінійним об'єктом із розподіленими параметрами».

Вказані недоліки, безумовно, не знижують науковий рівень даної дисертації і, на мою думку, не впливають на позитивне враження від дисертації, як кваліфікаційної роботи в цілому, завершеність якої не викликає сумніву. Робота містить висунуті автором науково обґрунтовані теоретичні результати та результати моделювання, наукові положення, особистий внесок здобувача в науку.

#### **Загальні висновки**

1. Дисертаційна робота Зеленського Кирила Харитоновича є завершеним науковим дослідженням, яке містить нові науково обґрунтовані результати, що у своїй сукупності вирішують актуальну науково-прикладну проблему в галузі математичного моделювання та підвищення його ефективності – розроблення методів математичного моделювання процесу виробництва полімерних матеріалів в екструдерах, що в повній мірі відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

2. Сукупність наукових положень, сформульованих та обґрунтованих у дисертаційній роботі складає основу для побудови програмного забезпечення математичного моделювання процесу виробництва полімерних матеріалів в екструдерах, що дозволяє підвищити точність моделювання.

3. Автореферат повністю відображає зміст та основні положення дисертації.

4. За науковим рівнем, практичною цінністю, публікаціями та апробацією дисертаційна робота відповідає пп. 9, 10 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567 на здобуття наукового ступеню доктора наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, а її автор, Зеленський Кирило Харитонович, заслуговує на присудження наукового ступеню доктора технічних наук.

Офіційний опонент

завідувач кафедри авіаційних комп'ютерно-  
комплексів інтегрованих

Національного авіаційного університету України

д.т.н., проф., Заслужений діяч науки

і техніки України

V.M. Синеглазов



*Синеглазов В.М.*  
д.т.н., проф.  
Заслужений діяч науки  
і техніки України  
*М. Мелешко*