

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
ЗЕЛЕНСЬКОГО Кирила Харитоновича
«Математичне моделювання нелінійних
полімерних матеріалів в екструдерах»,
яку представлено на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
зі спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання
та обчислювальні методи

1. Актуальність теми наукового дослідження та її зв'язок з науковими програмами, планами і темами

Процеси та обладнання для перероблення полімерних матеріалів характеризуються значною складністю, оскільки вони є реологічно складні, перероблення яких супроводжується тепломасообмінними процесами, зміною фазового стану при плавленні та кристалізації.

Ці чинники передбачають необхідність ретельного вибору конструктивних характеристик екструзійного обладнання і режимів його функціонування. Науковою основою дослідження і проектування такого енергоємного технологічного процесу є теоретичні методи, що ґрунтуються на математичному моделюванні цих процесів, що надає змогу визначити оптимальні фізико-технічні характеристики обладнання, а також складні властивості полімерної сировини, що має перероблятися.

У зв'язку із зазначеним предмет дисертаційних досліджень, а саме математичне моделювання тепломасоперенесення в екструдерах є своєчасним та актуальним.

Дисертаційне дослідження Зеленського К. Х. проводилось в рамках науково-дослідних робіт 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 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" (№ державної реєстрації 0116U003716).

Одержані результати, наукове і практичне значення, матеріали впровадження у виробництво виконаних Зеленським К. Х. досліджень підтверджують актуальність дисертаційної роботи.

*Вх. №161.29.04.21-1
всіх 29.04.2021 р.*

2. Основні наукові результати

У дисертаційній роботі Зеленського К. Х. отримано наукові результати, які дозволили розв'язати науково-технічну проблему розробки наукових засад удосконалення і створення нового обладнання для комплексного екструзійного перероблення термопластичних матеріалів, які забезпечують визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів екструзійного обладнання на базі одношнекових екструдерів, що сприятиме заощадженню енергетичних і матеріальних ресурсів, які необхідні для виконання численних експериментальних досліджень, та отриманню продукції високої якості.

На основі аналізу результатів дисертаційного дослідження К. Х. Зеленського доцільно відзначити наступні наукові результати, що мають наукову новизну:

1. Вперше розроблено числово-аналітичний ітераційний метод розв'язування нелінійних крайових задач, що описуються системами нелінійних диференціальних рівнянь у частинних похідних, 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 для автоматизації процесу отримання розв'язків нелінійних крайових задач, зокрема, запропоновано метод апроксимації циліндричних функцій дробово-раціональними виразами, розроблено алгоритми еквівалентного спрощення складних виразів, що ґрунтуються на використанні апарату ланцюгових дробів.
3. Вперше розроблено методи розв'язування нелінійних крайових задач тепломасоперенесення у зоні завантаження і пластикації екструдера, що ґрунтуються на використанні запропонованого ітераційного методу розв'язування нелінійних крайових задач.
4. Розроблено метод розв'язування крайових задач, що описують конвективно-дифузійні процеси у зоні плавлення полімерів та у зоні дозування із урахуванням реологічних властивостей полімерів.
5. Отримали подальший розвиток математичні моделі процесів нагріву корпусу екструдера, процесу завантаження, плавлення полімерів у одношнековому екструдері, які враховують вплив різних чинників на динаміку плавлення полімерних сумішей, що підвищує ефективність проектування і модернізації екструдера, а також вплив процесів гомогенізації та кристалізації на якість кінцевого продукту.

Отримані дисертантом результати є новими науковими знаннями та вирішують важливу науково-технічну проблему. Зазначені вище елементи наукової новизни дисертаційних досліджень вказують на те, що докторська дисертація Зеленського К.Х. цілком відповідає вимогам, які висуваються до дисертаційних робіт, представлених на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

3. Загальна характеристика дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 274 сторінки, 36 рисунки, 2 таблиці, список використаних джерел включає 359 найменувань.

У *вступі* подано загальну характеристику роботи, сформульовано актуальність наряду досліджень, мету та завдання, наведено відомості про зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, відзначені наукова новизна й практична цінність отриманих результатів, відомості про апробацію результатів дослідження.

У *першому розділі* здійснено огляд екструзійних пристроїв для виготовлення ізоляційних покривів кабелів на надвисокі напруги та показано, що якість виготовлення ізоляційних покривів у значній мірі залежить від процесів руху і теплопереносу полімерів у гвинтовому каналі шнека. Як результат виконаного аналітичного дослідження зроблено висновки про те, що у зв'язку із складністю, або в багатьох випадках, відсутністю можливостей проведення натурних (експериментальних) досліджень на існуючих екструзійних лініях неперервного виробництва та їхньою значною коштовністю для визначення оптимальних режимів і параметрів устаткування доцільним є математичне моделювання процесів тепломасоперенесення. Аналіз існуючих підходів до математичного моделювання процесів тепломасоперенесення засвідчив, що переважна більшість цих підходів ґрунтується на опису процесів в екструдері за допомогою класичних рівнянь Нав'є-Стокса у лінійній постановці із урахуванням конвективних складових. Числова реалізація математичних моделей процесів в екструзійних машинах зазвичай здійснюється або чисельними або напівчисельними методами.

Незважаючи на широкий спектр наявних публікацій з даного напрямку наукових досліджень залишаються нерозв'язаними ряд проблем, що стосуються математичного моделювання нелінійних полімерних матеріалів в екструдерах, зокрема: формулювання математичних моделей, що описують

процеси у зонах завантаження, затримки плавлення, плавлення і дозування полімерів як ізоляційне покриття кабелів надвисокої напруги; розробка методів чисельно-аналітичного розв'язування нелінійних крайових задач, що описують процеси у відповідних зонах шнекового формування ізоляційного покриття; розробка відповідного математичного і програмного забезпечення; розробка методів оптимального управління процесами тепломасоперенесення у відповідних зонах екструдера.

У *другому* розділі дисертаційної роботи подано математичні моделі, які враховують як крайові умови для кожної із зон екструдера, так і в'язку пластині властивості полімеру: нагрів корпусу екструдера, зони завантаження та затримки плавлення, зони плавлення полімеру як двохфазної «пробки» – розплав, зони дозування (гомогенізація і кристалізація розплаву). Побудовані математичні моделі, які подано у вигляді нелінійних диференціальних рівнянь із частинними похідними, є основою інформаційного та програмного забезпечення процесів екструзійного перероблення термопластичних полімерних матеріалів.

Третій розділ присвячено методам розв'язування нелінійних крайових задач для рівнянь у частинних похідних. Основним результатом цього розділу є запропонований чисельно-аналітичний метод розв'язування нелінійних крайових задач математичної фізики, сутність якого полягає у поданні вихідної крайової задачі у вигляді суми лінійної та нелінійної частин. Пошук розв'язку задачі здійснюється на основі ітераційного підходу шляхом застосування скінченних інтегральних перетворень за просторовими змінними. Також вартий уваги ітераційний метод розв'язання лінійних та нелінійних крайових задач із рухомими межами, відомих як задачі типу Стефана. Основу цього методу складає ітераційний числово-аналітичний метод розв'язання нелінійних крайових задач математичної фізики.

Запропоновані в межах третього розділу чисельно-аналітичні методи розв'язування нелінійних крайових задач із фіксованими і рухомими межами надають можливість виконувати математичне моделювання широкого класу нелінійних задач математичної фізики, зокрема – теплових процесів, процесів фільтрації поверхневих і підземних вод, ґрунтових процесів, процесів хімічного виробництва тощо, та здійснювати математичне моделювання нелінійних полімерних матеріалів в екструдерах. Ефективність розглянутих методів досліджено шляхом розв'язування модельних задач методом обчислювальних експериментів.

Четвертий розділ присвячено розробці алгоритмічного забезпечення розв'язування крайових задач для нелінійних рівнянь у частинних похідних.

Для вирішення проблем обчислення інтегралів від довільного добутку циліндричних функцій, зокрема функцій Бесселя першого та другого типів, в межах роботи запропоновано алгоритм апроксимації циліндричних функцій дробово-раціональними виразами. Спрощення дробово-раціональних функцій шляхом пониження їхніх степенів запропоновано здійснювати із використанням ланцюгових дробів. Застосування цього алгоритму надає можливість запобігти надмірності степенів рядів, оскільки ланцюгові дроби володіють рядом позитивних властивостей, зокрема вони збігаються швидше ніж інші послідовні ряди.

П'ятий, шостий, сьомий та восьмий розділи є практично орієнтованими. В межах цих розділів здійснено комп'ютерне моделювання ряду практично важливих задач моделювання масо і теплопереносу нелінійних полімерних матеріалів в екструдерах.

Сформульовано та розв'язано ряд задач, зокрема: сформульовано задачу про індукційне нагрівання корпусу екструдера та отримано її розв'язок із застосуванням скінченних інтегральних перетворень за просторовими змінними та інтегрального перетворення Лапласа за часовою змінною; сформульовано математичну модель нагрівання полімерної суміші у зоні її завантаження та розроблено метод її розв'язання, що надало можливість отримати реальний розподіл температурного поля полімерної суміші у зоні завантаження і визначити оптимальну довжину цієї зони; сформульовано задачу моделювання процесів плавлення полімерів в екструдері, яка враховує конвективне перенесення рідини, нелінійну залежність від температури теплофізичних параметрів полімеру та дисипативну складову, та отримано її розв'язок шляхом використання ітераційного числово-аналітичного методу розв'язання нелінійних крайових задач; сформульовано задачу визначення ступеня полімеризації і кристалізації розплаву полімеру у зоні дозування екструдера у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь відносно температури розплаву (рівняння масо і теплопереносу) із урахуванням межових умов охолодження та нелінійних кінетичних рівнянь ступеню полімеризації і кристалізації розплаву полімеру, яку розв'язано шляхом застосування числово-аналітичного ітераційного методу.

У висновках сформульовано основні результати дисертаційної роботи.

У додатках подано копії документів про впровадження результатів дисертаційного дослідження та програмний код мовою С реалізації розроблених алгоритмів.

4. Ступінь обґрунтування наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Наукові результати роботи, висновки та рекомендації достатньою мірою обґрунтовані, оскільки базуються на аналізі сучасних та загальноновизнаних літературних джерел. Загалом в роботі розглянуто та проаналізовано джерела наукової літератури, як вітчизняних, так і зарубіжних вчених (259 найменування у списку використаних джерел), досліджено поточний стан проблеми математичного моделювання нелінійних полімерних матеріалів в еструдерах.

Зеленський К. Х. проводить дисертаційне дослідження із застосуванням загальноновизнаних теорій, використовуючи методи математичного моделювання із застосуванням положень теорії суцільних середовищ і механіки неньютоновських речовин, а також числово-аналітичні методи розв'язування крайових задач для систем нелінійних диференціальних рівнянь математичної фізики. Їх коректне застосування забезпечує обґрунтованість отриманих результатів.

Результати проведених обчислювальних експериментів підтверджують достовірність отриманих результатів моделювання. У роботі подано приклади розв'язування модельних задач, а також наявні акти впровадження результатів дисертаційного дослідження у виробничому процесі.

Результати дисертаційної роботи були апробовані на численних науково-практичних конференціях.

5. Практична цінність результатів роботи

Практична цінність дисертаційної роботи Зеленського К.Х. полягає у розробленні наукових засад побудови математичних моделей температурних і масообмінних процесів перероблення полімерних матеріалів методом екструзії, що забезпечило теоретичне дослідження взаємозв'язку між фізико-механічними і реологічними властивостями полімерних матеріалів та оптимальними параметрами обладнання та режимами його роботи.

Отримані результати дозволяють проектувати нове та модернізувати існуюче обладнання (екструдери), удосконалювати технологічні режими, при цьому мінімізуючи коштовні натурні випробування, визначати області локальних перегрівів, враховувати впливи процесів тепломасоперенесення у шнеці на процеси пластикуючої екструзії тощо.

Результати дисертаційного дослідження прийнято до впровадження: в ПНВП «Прикарпатгаз» для удосконалення технологічних режимів роботи пластикуючих екструдерів при виготовленні пластмасової ізоляції; в ТОВ

«Укрекоконсалт» для підвищення точності визначення необхідних теплофізичних та геометричних характеристик та підвищення ступеня очищення повітря від шкідливих домішок, що реалізовано у рекомендаціях до проектної документації на виготовлення пиловловлюючого обладнання; в освітньому процесі на кафедрі біомедичної кібернетики факультету біомедичної інженерії НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

6. Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації та опублікованих в роботах автора

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційного дослідження повною мірою відображені в опублікованих роботах. За темою дисертації опубліковано 47 наукових праць, у тому числі монографія, 32 статті у наукових фахових виданнях, із них 2 у наукових виданнях іноземних держав, 4 у наукометричних виданнях, 14 доповідей у збірниках праць науково-практичних конференцій.

Зміст та кількість публікацій Зеленського К. Х., повнота відображення в них результатів дисертаційного дослідження відповідають існуючим вимогам.

7. Рекомендації щодо використання результатів дисертації

Результати дисертації Зеленського К. Х., які стосуються першою чергою розроблення методів розв'язування нелінійних крайових задач для систем диференційних рівнянь із частинними похідними, математичного і комп'ютерного моделювання на основі цих методів процесів переробки полімерних матеріалів в екструдерах є значущі для теорії і практики проектування, модернізації і визначення оптимальних параметрів екструзійного обладнання. Отримані результати можуть бути застосовані у переробній, хімічній та легкій промисловості. Результати дисертації можуть бути рекомендовані для вирішення досить широкого кола задач, математичні моделі яких описуються системами нелінійних диференційних рівнянь математичної фізики, а також можуть бути рекомендовані для широкого використання в освітньому процесі.

8. Оформлення дисертації та автореферату

Зміст автореферату відповідає змісту дисертації. Автореферат містить основні положення, висновки і рекомендації, подані в дисертації, а також всю необхідну для оцінки роботи інформацію. Вступ та висновки автореферату та дисертації співпадають.

Мова і стиль викладення дисертації і автореферату чітко висвітлюють одержані науково-практичні результати, які відповідають меті досліджень.

9. Зауваження по дисертації та автореферату

1. Потребує додаткового пояснення шостий пункт наукової новизни, який стосується «оптимального управління температурними полями в екструзійних пристроях».
2. У першому розділі при аналізі технологічних процесів екструзії полімерів не висвітлені питання реологічних та в'язкопружних властивостей полімерів при їхній обробці.
3. Математичні моделі теплоперенесення, що наведені у першому розділі, доцільно було б розглядати у другому розділі, у якому формулюються математичні моделі, що підлягають дослідженню.
4. У третьому розділі надто докладно висвітлено питання кристалізації злитків, які не мають прямого відношення до теми дисертаційного дослідження.
5. У сьомому розділі не наведено числові дані стосовно визначення межі фазового переходу тверда суміш – розплав.
6. В дисертаційній роботі не приділено увагу побудові та застосуванню математичних моделей у формі інтегральних моделей Вольтерри та Гаммерштейна для керування нелінійними динамічними процесами, що відбуваються в об'єктах із розподіленими параметрами.
7. У дисертації відсутні числові значення кількох вхідних параметрів у початкових та межових умовах крайових задач.
8. В авторефераті та дисертаційній роботі зустрічаються граматичні та стилістичні помилки механічного характеру.
9. При оформленні дисертації допущено ряд неточностей, зокрема відсутні вільні рядки вище і нижче кожної формули, рівняння, що значно вплинуло на обсяг основної частини дисертації.

10. Висновок про відповідність дисертації паспорту спеціальності і встановленим вимогам

Подані зауваження не знижують загального позитивного враження від дисертації, її наукової та практичної цінності.

Дисертація Зеленського Кирила Харитоновича «Математичне моделювання нелінійних полімерних матеріалів в екструдерах» є завершена наукова праця, в якій отримано нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, що у сукупності є суттєві для розвитку ефективних процесів та обладнання для екструзійного оброблення полімерних матеріалів. Наукові результати одержані автором самостійно і мають наукову новизну та практичне значення. Результати наукових досліджень, за якими здобувач захистив кандидатську дисертацію, на захист докторської дисертації не виносяться. Зміст дисертації відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 — математичне моделювання та обчислювальні методи.

Дисертаційна робота відповідає вимогам п. п. 9, 10 та п. 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. та чинним вимогам Міністерства освіти і науки України, які висуваються до докторських дисертацій, а її автор Зеленський Кирило Харитонович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 — математичне моделювання та обчислювальні методи.

Завідувач кафедри інформатики
Кам'янець-Подільського національного
університету імені Івана Огієнка,
доктор технічних наук, доцент



В. А. Іванюк

