

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»



СОКОЛЬСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР ЛЕОНІДОВИЧ

УДК [678.027.3+678.057.3]:678.073(043.3)

**НАУКОВІ ЗАСАДИ РОЗРОБЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ І ПРОЦЕСІВ
ПЕРЕРОБЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ ЕКСТРУЗІЇ**

05.05.13 – машини та апарати хімічних виробництв

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі хімічного, полімерного і силікатного машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Мікульонок Ігор Олегович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
професор кафедри хімічного, полімерного і силікатного
машинобудування

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Виноградов Борис Володимирович,
ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний
університет» (м. Дніпро),
професор кафедри інноваційної інженерії

доктор технічних наук, професор
Місяць Володимир Петрович,
Київський національний університет технологій та дизайну
(м. Київ),
професор кафедри прикладної механіки та машин

доктор технічних наук, доцент
Кривопляс-Володіна Людмила Олександрівна,
Національний університет харчових технологій
(м. Київ),
професор кафедри мехатроніки та пакувальної техніки

Захист відбудеться «13» жовтня 2020 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.05 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корп. 19, ауд. 340.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «11» вересня 2020 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.05



О. І. Іваненко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток галузі переробки полімерів в Україні безпосередньо пов'язаний з потребою створення нового та удосконалення існуючого обладнання. Для забезпечення необхідних умов виконання та встановлення основних параметрів реалізації технологічних процесів у сучасних економічних умовах розроблювані машини за своїми техніко-економічними показниками не повинні поступатися кращим світовим зразкам. Найактуальнішою проблемою є забезпечення довговічності і продуктивності машини за мінімальних матеріало- та енергоємності. Необхідність підвищення технічного рівня, якості та конкурентоспроможності полімерної продукції потребує безперервного вдосконалення методів розрахунку та технологій їх конструювання. Найпоширенішим процесом виробництва виробів із полімерних матеріалів є екструзія. Аналіз сучасного стану галузі, розробки методів математичного моделювання процесів плавлення, змішування та гомогенізації в'язких і в'язкопластичних середовищ у каналах технологічного обладнання показав недостатній ступінь вивченості цього питання. Засновані на відомих математичних моделях існуючі методики розрахунку мають обмежений характер і не завжди зручні в інженерній практиці.

Отже, створення наукових засад математичного моделювання обладнання та процесів екструзійного перероблення полімерних матеріалів є актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» на кафедрі хімічного, полімерного і силікатного машинобудування відповідно до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки в Україні (Постанова Кабінету Міністрів (КМ) України від 24.12.2001 р., № 1716), Державної програми розвитку промисловості на 2003–2011 роки (Постанова КМ України від 28.07.2003 р., № 1174), а також відповідно до тематики держбюджетних науково-дослідних робіт КПІ ім. Ігоря Сікорського: «Дослідження процесів екструзійного формування виробів з полімерних композиційних матеріалів з застосуванням методів комп'ютерного моделювання» (№ 2759-ф, 2004–2006 рр.; № держреєстрації 0104U000344; замовник – МОН України; автор – виконавець теми); «Розроблення наукових основ моделювання процесів формування погонажних виробів складної геометрії з врахуванням нерівномірності температурних полів і залишкових напружень» (№2918-ф; 2006–2008; замовник – МОН України; № держреєстрації 0106U002131; автор – виконавець теми); «Комп'ютерне моделювання неізотермічних процесів переробки вторинних термопластів з урахуванням пристінних ефектів» (тема №2031-п, 2008–2009 рр.; замовник – МОН України; № держреєстрації 0107U002496; автор – відповідальний виконавець теми); «Створення узагальненої дискретної моделі процесів формування полімерних виробів з урахуванням напружено-деформованого стану конструктивних елементів машин при складному термосиловому навантаженні» (№2222-ф; 2009–2011 рр.; № держреєстрації 0198U000331; замовник – МОНмолодьспорт України; автор – виконавець теми); «Розроблення дискретизованих математичних моделей процесів змішування та формування при приготуванні нових полімерних композицій» (№2353-п; 2010–2011 рр.; замовник – МОНмолодьспорт України; № держреєстрації 0110U002273, автор – виконавець теми); «Науково-технічні засади проектування

обладнання для формування виробів з полімерних композицій із врахуванням їх в'язкопружних властивостей» (№2824-п; 2015–2015 рр.; № держреєстрації 0115U000178; замовник – МОН України; автор – відповідальний виконавець теми).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є створення наукових засад математичного моделювання обладнання та процесів екструзійного перероблення термопластичних полімерних матеріалів на всіх стадіях технологічного процесу з урахуванням зміни властивостей зазначених матеріалів під дією зовнішніх і внутрішніх чинників.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання:

1. Розробити математичну модель неізотермічної течії обмежено стисливих реологічних середовищ у робочих каналах екструдера та формувального устаткування з урахуванням пружного деформування конструктивних елементів, залишкових напружень, законів стану речовини, внутрішніх дисипативних ефектів і теплообмінних процесів.

2. Розробити уточнену фізичну та математичну моделі плавлення термопластичних полімерів у робочих каналах екструдерів з урахуванням несучільності та багатокомпонентності зазначених матеріалів.

3. Провести числові та експериментальні дослідження закономірностей процесу плавлення термопластичних полімерів у робочих каналах екструдерів.

4. Провести числові та експериментальні дослідження закономірностей процесів змішування полімерів між собою і з дисперсними наповнювачами та гомогенізації в каналах екструдерів.

5. Розробити методику експериментального визначення в'язкопружних властивостей розплавів термопластів.

6. Провести числові та експериментальні дослідження процесів формування полімерних виробів з урахуванням їхніх в'язкопружних властивостей.

7. Розробити методику автоматизованого розрахунку необхідної конфігурації каналів головки з урахуванням в'язкопружного деформування екструдату.

8. Розробити методики моделювання постекструзійних процесів охолодження полімерних виробів з метою мінімізації в них технологічних і залишкових напружень.

9. Розробити рекомендації з впровадження методик розрахунків ефективних обладнання і процесів перероблення полімерних матеріалів методом екструзії.

Об'єкт дослідження – обладнання та процеси екструзійного перероблення термопластичних полімерних матеріалів.

Предмет дослідження – параметри обладнання та процесів екструзійного перероблення термопластичних полімерних матеріалів, у тому числі й композиційних.

Методи дослідження. Дослідження ґрунтуються на методах математичного моделювання із застосуванням положень теорії суцільного середовища, достовірних гіпотез і адекватних математичних моделей. Застосування апробованих математичних апаратів, числових методів розв'язання рівнянь математичної фізики, розроблених числових методик, алгоритмів і програмного забезпечення. Достовірність результатів досліджень підтверджується аналітичними та експериментальними методами, а також їх практичною реалізацією.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у створенні наукових засад розробки і вдосконалення обладнання та процесів для перероблення термопластичних матеріалів методом екструзії, що забезпечують можливість визначення раціональних конструктивних параметрів обладнання та режимів його роботи.

Уперше отримані такі наукові результати:

1. Узагальнено математичні моделі течії реологічно складних речовин з урахуванням деформації конструктивних елементів формувального обладнання в процесах формування безперервних і погонажних виробів, що базуються на фундаментальних законах збереження енергії, маси, імпульсу та законів стану речовини. Це дало змогу розглядати всі технологічні стадії та конструктивне оформлення процесу екструзії в комплексі та у взаємозв'язку.

2. Проведено тривимірне моделювання неізотермічних багатофазних процесів екструзійного перероблення полімерних матеріалів та встановлено конструктивні й технологічні чинники, які впливають на них.

3. Запропоновано дискретну математичну модель та методику числових розрахунків, які дають можливість аналізувати особливості течії полімерних матеріалів у формувальних каналах полімерного устаткування з деформівними стінками. Отримані дані дають змогу прогнозувати величину й характер деформації формувальних елементів та врахувати її вплив на відхилення конфігурації одержуваної продукції від заданої.

4. У результаті обробки даних числових експериментів встановлено аналітичні залежності відхилення форми типових перерізів екструдату з в'язкопружними властивостями від заданої форми залежно від режиму перероблення.

5. Запропоновано математичну модель та методику моделювання, яка дає змогу визначати необхідну конфігурацію екструзійної головки для забезпечення заданої форми перерізу екструдату з урахуванням його в'язкопружного розширення.

6. Досліджено взаємозв'язок властивостей полімерних композицій і технологічних режимів їх перероблення з конструктивними параметрами технологічного обладнання, що дасть змогу створювати нові композиційні матеріали, обґрунтовувати технологічні процеси переробки та проєктувати змішувально-формувальне устаткування.

Дістали подальший розвиток:

1. Вдосконалена фізична та математична моделі плавлення полімеру в черв'ячному каналі, які дають змогу більш достовірно розраховувати кінетику процесу й необхідну довжину зони плавлення.

2. Вплив різних чинників на динаміку плавлення полімерів у черв'ячному каналі, що підвищує ефективність проєктування й модернізації екструдерів.

3. Методика проведення уточнених експериментальних досліджень процесу плавлення гранульованих полімерів.

4. Вплив закономірностей процесів змішування та гомогенізації полімерних композицій на раціональні конструктивні й технологічні параметри змішувальних елементів.

5. Вплив розподілу технологічних напружень по довжині труби на вибір раціональної технологічної схеми її охолодження з точки зору «інтенсивність охолодження – технологічні напруження».

Практичне значення одержаних результатів.

Результати досліджень впливу конструктивних особливостей обладнання для перероблення термопластичних матеріалів методом екструзії, режимів його експлуатації, а також властивостей зазначених матеріалів на параметри процесів перероблення стали основою розробки та впровадження методик і рекомендацій щодо науково обґрунтованого проектування, модернізації і вибору обладнання, а також визначення раціональних режимів його експлуатації, зокрема:

1. Методики, аналітичні залежності та конструктивні рекомендації дають змогу значно знизити собівартість проектно-конструкторських робіт і витрати на виготовлення екструзійного устаткування, розробляти нове ефективне обладнання, знизити матеріало- та енергоємність процесів і устаткування з одночасним підвищенням якості виробів.

2. Методика визначення якості суміші, яка полягає в безпосередньому використанні рівнянь масопереносу. Встановлено доцільні схеми та конструктивні параметри змішувального устаткування.

3. Алгоритми та методика зв'язаних числових розрахунків течії полімеру та жорсткості устаткування, які дають можливість прогнозувати величину й характер деформації формувальних елементів та врахувати її вплив на зміни форми одержуваної продукції.

4. Методики числового моделювання, які дають змогу уточненого розрахунку та оптимізації основних параметрів технологічних процесів та устаткування для екструзійного формування полімерних виробів з урахуванням різних чинників.

5. Методика моделювання й проектування екструзійних головок, яка дає змогу визначати необхідну конфігурацію екструзійної головки для забезпечення заданої форми перерізу профільного виробу.

6. Отриманий розподіл технологічних напружень по довжині екструдованої полімерної труби в процесі охолодження дав змогу визначити його раціональні схеми та режими.

7. Методика автоматизованого проектування та 3D-моделей обладнання для виготовлення полімерних і гумотехнічних виробів, що виготовляє ПАТ «НВП «Більшовик», м. Київ.

8. Технічні рекомендації з конструктивного оформлення та уточненого розрахунку змішувальної зони екструдера. Було підтверджено підвищення якості та однорідності властивостей екструдованих виробів за умов зниження енергоємності процесів їх виробництва на 15–20 % порівняно з традиційною двостадійною технологією, використовуваною на ТОВ «Енергія-2000», м. Київ.

9. Методика автоматизованого проектування та 3D-моделі формувального устаткування для виготовлення співекструзійних полімерних виробів. Використання запропонованої методики автоматизованого проектування і конструктивних пропозицій дало змогу вдосконалити обладнання та режими його роботи, за яких забезпечуються підвищена продуктивність та якість виробів, а також зниження ресурсоємності процесів їх виробництва на ТОВ «Водостічні системи», м. Боярка Київської обл.

10. Технічні рекомендації щодо конструктивного оформлення та уточненого параметричного розрахунку екструзійного формуючого полімерного устаткування. Використання розробленої методики і конструктивних пропозицій дає змогу

вдосконалення технологічних параметрів переробки та конструкції робочих органів формувального обладнання, яке виготовляє ТОВ «НВП «Інкос», м. Чернігів, за яких забезпечується підвищена розмірна точність виробів.

11. Методики і комп'ютерні розрахунки процесу охолодження екструдованих полімерних труб, які впроваджено в практику проектування й модернізації обладнання, яке виготовляє ТОВ «Гамапласт Україна», м. Бориспіль Київської обл.

12. Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри хімічного, полімерного і силікатного машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського під час проведення лекційних, практичних та індивідуальних занять, виконання курсових проєктів і робіт з дисциплін «Формуючий інструмент», «Технологічне обладнання виробництва будівельних та полімерних виробів», «Модернізація технологічного обладнання», а також під час дипломного проектування. Впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес забезпечується: навчальним посібником (Основи проектування одночерв'ячних екструдерів : навч. посіб. / І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, Л. Б. Радченко. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 200 с.); навчальним посібником (Сокольський О. Л., Сівецький В. І., Мікульонок І. О. Проектування формуючих пристроїв обладнання для переробки пластмас : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 148 с.); термінологічним словником (Мікульонок І. О., Сокольський О. Л. Полімерні матеріали і вироби з них (одержання, перероблення, властивості) : термін. словник. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 104 с.) та методичними вказівками.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем сформульовано мету й постановку завдань досліджень, розроблено методи та способи досягнення поставленої мети, виконано математичні постановки задач, розроблено методики їх числового розв'язання, математичні моделі, проведено узагальнення отриманих результатів, встановлено закономірності фізичних процесів. Здобувачем особисто здійснено наукове обґрунтування дослідження реологічних, теплових процесів і механічного стану екструзійного обладнання, що дає змогу розробляти й вдосконалювати конструктивні рішення й технологічні режими.

Основні результати теоретичних і практичних досліджень, які представлені в дисертаційній роботі, висвітлено в наукових працях, наведених у списку публікацій автореферату [1–59]. Зокрема автором дисертації було особисто:

– розроблено уточнені математичні моделі та методики моделювання неізо-термічного тривимірного руху реологічно складних середовищ у каналах довільної форми з деформівними стінками, а також проектування на їх основі технологічного обладнання [3, 5, 6, 10, 13, 14, 24, 25, 26, 27, 30, 31, 37, 53, 54, 56];

– розроблено уточнену фізичну та математичну моделі плавлення термопластів та виявлені основні чинники, що суттєво впливають на процес [4, 28, 58];

– розроблено методики експериментальних досліджень процесів живлення, плавлення та формування і виконано обробку результатів [15, 35, 38, 57, 59];

– виконано числові експерименти з моделювання процесів плавлення та змішування, виявлено особливості розподілу температурного поля, поля швидкостей і в'язкостей, встановлено раціональні схеми та конструктивні параметри устаткування [8, 9, 11, 19, 20, 22, 48, 49, 50];

– здійснено числові експерименти з моделювання процесів формування з

урахуванням нелінійних ефектів та деформації конструктивних елементів [1, 2, 12, 16, 17, 18, 34, 36, 51, 52];

– розроблено оригінальні конструкторські рішення із вдосконалення елементів обладнання для здійснення екструзійних процесів [39 – 47].

Експериментальні дослідження триботехнічних властивостей полімерів у зоні живлення [38, 57, 59] виконувались разом із аспірантом Витвицьким В. М.

Розроблення математичних моделей змішування та методики визначення якості суміші з безпосереднім використанням рівнянь масопереносу [7, 21, 23] здійснювалось разом із д.т.н., проф. Сахаровим О. С.

Моделювання процесів формування з урахуванням розширення екструдату і експериментальне встановлення в'язкопружних властивостей полімерів [6, 10, 14, 25, 26, 27, 30] здійснювалось разом із аспіранткою Коваленко К. Г.

Моделювання процесів та розроблення устаткування охолодження виробів з урахуванням залишкових напружень, встановлення доцільних режимів та схем охолодження [30, 32, 33, 55] здійснювалось разом із д.т.н., проф. Мікульонком І. О.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і отримали позитивну оцінку на: XI міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка і технологія» (м. Київ, 2010); VI Міжнародній науково-технічній WEB-конференції «Композиційні матеріали» (м. Київ, 2012); Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та науковців «Ресурсоенергоєфективні процеси, технології та обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» (м. Київ, 2012, 2013); IX międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami-2013» (Przemyśl, 2013); Modern Scientific Research and their Practical application (Odessa, 2014); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки» (м. Київ, 2015); XI International scientific and practical conference «Modern scientific potential - 2015», (Great Britain, Sheffield, 2015); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (м. Дніпропетровськ, 2015, 2018); XI Всеукраїнській науково-практичній конференції з питань пакувальної індустрії (м. Київ, 2016); Aktuelle Themen im Kontext der Entwicklung der modernen Wissenschaften: der Sammlung wissenschaftlicher Arbeiten «ΛΟΓΟΣ» zu den Materialien der internationalen wissenschaftlich-praktischen Konferenz (Dresden, 2019) та ін.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 59 наукових праць, у тому числі 7 монографій, 28 статей у наукових фахових виданнях (з них 11 у виданнях іноземних держав, 3 – у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 3 статті в інших виданнях, 9 патентів України на корисні моделі, а також 12 доповідей у збірниках і матеріалах праць конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (208 найменувань на 20 сторінках) і 3 додатків (на 26 сторінках), 11 таблиць, 183 рисунки (з них 12 рисунків повністю займають площу 8 сторінок). Обсяг основного тексту становить 288 сторінок. Загальний обсяг роботи складає 370 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету досліджень, визначено основні завдання і методи їх розв'язання, викладено наукову новизну та практичне значення результатів роботи, наведено особистий внесок здобувача, інформацію про основні публікації.

У першому розділі наведено аналітичний огляд стану проблеми та обґрунтування напрямку роботи. Проаналізовано основні види полімерних термопластичних матеріалів, відповідні фізичні й технологічні властивості. Розглянуто конструктивні, геометричні та енергетичні параметри екструзійного обладнання, механічні й фізичні процеси, які відбуваються в ньому на різних стадіях технологічного процесу, та їх взаємний вплив. Проаналізовано математичні моделі, методики розрахунків обладнання та процесів щодо визначення властивостей перероблюваних матеріалів, вказано переваги та недоліки.

Обґрунтовано доцільність розроблення наукових положень, удосконалених та узагальнених математичних моделей для адекватного моделювання послідовних процесів, пошуку раціональних режимів та конструктивних рішень у проектуванні робочих органів обладнання з використанням єдиних позицій механіки суцільних середовищ. Показано актуальність, можливості застосування та ефективність використання сучасної обчислювальної техніки і методів обчислювального експерименту для вдосконалення технологічних процесів і основних робочих органів екструзійного обладнання для підвищення енергетичної ефективності, продуктивності та покращення споживчої якості полімерної продукції, зокрема показників однорідності, стабільності, точності розмірів та форми.

Велику увагу вивченню процесу екструзійного перероблення полімерних виробів та його моделюванню приділяли такі вчені як Бартенев Г. М., Бернхард Е., Брагінський В. А., Кім В. С., Мак-Келві Д. М., Мор В. Д., Раувендааль К., Тадмор Е., Торнер Р. В., Уілкінсон У. Л., вітчизняні вчені Жданов Ю. А., Литвинов В. Г., Лукач Ю. Ю., Радченко Л. Б., Мікульонок І. О., Петухов А. Д., Яхно О. М.

За результатами аналізу науково-технічних джерел інформації сформульовано основні напрямки та завдання досліджень.

У другому розділі розроблено узагальнені математичні моделі руху одно- та багатокомпонентних середовищ у різних станах, відповідним окремим стадіям технологічного процесу екструзії. Показано, що їх можна представити окремими випадками узагальненої моделі в межах уявлень механіки суцільного середовища. У багатьох випадках врахування взаємодії перероблюваних матеріалів з робочими органами машин та апаратів є необхідною умовою під час розроблення технологічних процесів і проектуванні обладнання полімерних виробництв. Відповідні задачі потребують одночасного розрахунку поведінки твердих тіл, рідин і газів, які взаємодіють між собою та термосиловими полями. Для адекватного математичного опису взаємодії середовищ і тіл у різних станах використовуються загальні співвідношення нелінійної механіки суцільних середовищ (МСС).

Для багатокомпонентного середовища:

– рівняння дифузії

$$\varphi \nabla^2 C = \vec{v} \cdot \vec{\nabla} C, \quad (1)$$

де C – концентрація обраного компонента; φ – коефіцієнт дифузії; \vec{v} – швидкість руху;
– рівняння нерозривності (відповідно для твердої, рідкої та газової фази):

$$\frac{d\rho_1^*}{dt} + \rho_1^* \vec{\nabla} \cdot \vec{v}_1 + \kappa_{12} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_2^*}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho_2^* \vec{v}_2 - \kappa_{12} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_3^*}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho_3^* \vec{v}_3 = 0, \quad (4)$$

де ρ_α – густина матеріалу α -ї компоненти суміші; n_α – об'ємна концентрація α -ї компоненти; $\rho_\alpha^* = \rho_\alpha n_\alpha$ – приведена парціальна густина α -ї компоненти; $\kappa_{\alpha\beta}$ – швидкість переходу маси фази α , що міститься в одиниці об'єму суміші в фазу β ; \vec{v}_α – швидкість руху фази α ;

– рівняння руху

$$\rho_1^* \frac{d\vec{v}_1}{dt} + \rho_2^* \frac{d\vec{v}_2}{dt} + \rho_3^* \frac{d\vec{v}_3}{dt} = \kappa_{12} (\vec{v}_1 - \vec{v}_2) + \vec{\nabla} \cdot \hat{\sigma} + \vec{P}, \quad (5)$$

– рівняння збереження енергії

$$\begin{aligned} \rho_1^* \frac{d}{dt} i_1 + \rho_2^* \frac{d}{dt} i_2 + \rho_3^* \frac{d}{dt} i_3 = \frac{d}{dt} p^* + \frac{1}{2} \kappa_{12} (\vec{v}_{12} - \vec{v}_2)^2 - \\ - \kappa_{12} (i_2 - i_1) - \frac{1}{2} \kappa_{12} (\vec{v}_1 - \vec{v}_{12})^2 + (n_1 \hat{\sigma}_1 + \alpha_2 \hat{\sigma}_2 - \alpha_3 p_3 \hat{g}) \cdot \hat{\epsilon}_1 + \\ + (n_2 \hat{\sigma}_2 - \alpha_2 \hat{\sigma}_2) \cdot \hat{\epsilon}_2 + (\alpha_3 p_3 - n_3 p_3) \vec{\nabla} \cdot \vec{v}_3 + \\ + \vec{\nabla} \cdot (\lambda_1 \vec{\nabla} T_1) + \vec{\nabla} \cdot (\lambda_2 \vec{\nabla} T_2) + \vec{\nabla} \cdot (\lambda_3 \vec{\nabla} T_3) + Q_{1V} + Q_{2V} + Q_{3V}, \end{aligned} \quad (6)$$

де i_α – ентальпія; $\hat{\epsilon}_\alpha = \frac{1}{2} (\vec{\nabla} \vec{v}_\alpha + \vec{\nabla} \vec{v}_\alpha^T)$ – тензор швидкостей деформацій; $\hat{\sigma}_\alpha$ – тензор напружень; λ_α – коефіцієнт теплопровідності; T – температура; $Q_{\alpha V}$ – кількість теплоти, що підводиться за одиницю часу до одиниці об'єму відповідної фази ззовні.

Відповідні рівняння в зоні живлення:

$$\frac{\partial \rho_\alpha^*}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho_\alpha^* \vec{v} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_\alpha, \quad (7)$$

$$\rho_\alpha^* \frac{d\vec{v}_\alpha}{dt} = -\vec{\nabla} n_2 p - n_\alpha K_\alpha (\vec{v}_\alpha - \vec{v}) + \vec{P}_\alpha^*, \quad (8)$$

де $\vec{J}_\alpha = \rho_\alpha^* (\vec{v}_\alpha - \vec{v})$ – вектор потоку дифузії α -компоненти, який у загальному випадку характеризує перенесення маси за рахунок концентраційної (молекулярної) дифузії, бародифузії (фільтраційної дифузії) та термодифузії:

$$\vec{J}_\alpha = -k_C \vec{\nabla} \rho_\alpha^* - k_f \vec{\nabla} p - k_T \vec{\nabla} T, \quad (9)$$

$p = -\frac{1}{3} \hat{\sigma} \cdot \hat{g}$ – гідростатичний тиск в основній компоненті, K_α – коефіцієнт опору відносному руху згідно із законом Стокса. При цьому вважається, що температура в даній зоні змінюється незначно і рівняння теплообміну не складається.

Геометричні рівняння Коші

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left(\vec{\nabla} \vec{u} + (\vec{\nabla} \vec{u})^T \right), \quad \hat{\zeta} = \frac{1}{2} \left(\vec{\nabla} \vec{v} + (\vec{\nabla} \vec{v})^T \right), \quad (10)$$

які пов'язують тензор деформацій $\hat{\varepsilon}$ з вектором переміщень \vec{u} та тензор швидкостей деформацій $\hat{\zeta}$ з вектором швидкостей \vec{v} . Для замикання вказаної системи рівнянь до неї треба додати рівняння стану

$$\hat{\phi}(\hat{\sigma}, \hat{\varepsilon}, \hat{\zeta}, T) = 0, \quad (11)$$

які дають змогу описати фізичні властивості матеріалів реальних тіл.

На першому етапі стиснення твердої фази рівняння стану з достатньою точністю описується залежністю для ізотропного пружного тіла

$$\hat{\sigma} = 2\mu \hat{\varepsilon} + \lambda \hat{g} \hat{g} \cdot \hat{\varepsilon}, \quad (12)$$

де μ , λ – модулі пружності Ляме, які залежать від пористості й температури.

При підігріві відбувається перехід полімеру до пружно-пластичного стану, який можна представити співвідношеннями деформаційної теорії пластичності при відомій для матеріалу залежності між інтенсивністю дотичних напружень T_σ , інтенсивністю деформацій зсуву Γ та температурою T :

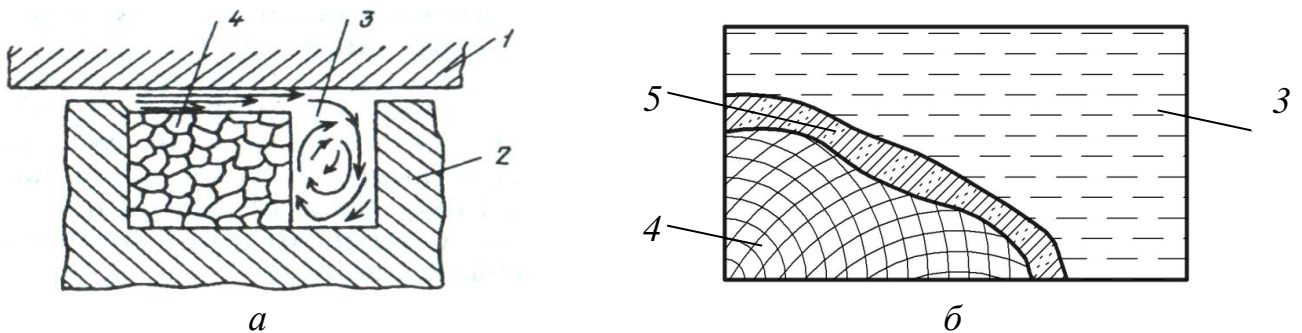
$$\hat{S} = \mu_\Gamma \hat{D}, \quad \hat{\sigma}_s = k \hat{\varepsilon}_s, \quad \mu_\Gamma = \frac{T_\sigma(\Gamma, T)}{\Gamma}, \quad (13)$$

де \hat{D} – девіатор тензора деформацій, k – модуль об'ємного стиснення, який залежить тільки від температури, $\hat{\varepsilon}_s$ – сферичний тензор деформацій.

Граничною умовою в цій зоні є функціональна залежність коефіцієнта тертя матеріалу по стінках обладнання від температури, тиску та швидкості

$$F = f(T, P, v). \quad (14)$$

Розроблені принципово нові фізичні й математичні моделі плавлення полімеру в каналі екструдера, сутність яких полягає в тому, що процес плавлення проходить у межах суміші твердої й рідкої фаз, де розплав є диспергувальним, а тверді залишки гранул і газ – диспергованими середовищами (рис. 1). Спочатку за рахунок бародифузії розплаву руйнується поверхневий шар твердої пробки, який переходить у шар текучої суміші з твердої й рідкої фаз, а потім під дією дисипативного тепла відбувається плавлення твердої частини в об'ємі суміші. Теплова енергія, що підводиться до поверхні розділу суміші і пробки, витрачається на руйнування пробки через механізм бародифузії.



1 – стінка корпуса; 2 – черв'як; 3 – розплавлений полімер; 4 – пробка; 5 – суміш
(а – традиційний підхід; б – запропонований підхід)

Рисунок 1 – Схема плавлення пробки в черв'ячному каналі

При цьому вводяться такі припущення:

– термопласт є матеріалом аморфним і перехід від твердого стану до розплаву відбувається поступово з неперервною зміною фізико-механічних і теплофізичних властивостей;

– існує поверхня поділу між твердою пористою пробкою і розплавом у вигляді плівки, яка перешкоджає руху розплаву до пор;

– у зоні плавлення взаємодіють три фази – тверде пористе тіло (пробка); суміш розплаву, твердих залишків гранул та газу; повністю розплавлений матеріал.

Тоді розв'язуюча система рівнянь набуває вигляду:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0, \quad (15)$$

$$\rho_1^* \frac{d\vec{v}_1}{dt} + \rho_2^* \frac{d\vec{v}_2}{dt} = \kappa_{12}(\vec{v}_1 - \vec{v}_2) + \vec{\nabla} \cdot \hat{\sigma}_2 + \vec{P}_1^* + \vec{P}_2^{**} \quad (16)$$

$$c_1 \rho_1^* \frac{dT_1}{dt} + c_2 \rho_2^{**} \frac{dT_2}{dt} = -\frac{1}{2} \kappa_{12}(\vec{v}_1 - \vec{v}_2)^2 + \frac{1}{2} \kappa_{12}(\vec{v}_2 - \vec{v}_1)^2 + \kappa_{12}(c_1 T_1 - c_2 T_2)$$

$$+ n_1 \hat{\sigma}_2 \cdot \vec{\nabla} \vec{v}_1 + (n_2 - n_1) \hat{\sigma}_2 \cdot \vec{\nabla} \vec{v}_2 + \vec{\nabla} \cdot (\lambda_2 \vec{\nabla} T_2) + Q_{1V} + Q_{2V}. \quad (17)$$

Під час нагрівання та ущільнення полімеру за високого рівня в'язкості, коли стан середовища близький до твердого, фізичні рівняння доцільно записати через деформації у вигляді

$$\hat{\sigma} = \hat{E} \cdot (\hat{\epsilon} - \hat{\epsilon}^p) - \sigma^T, \quad (18)$$

де \hat{E} – тензор пружності; $\hat{\epsilon}$ – повна деформація; $\hat{\epsilon}^p$ – пластична деформація; σ^T – тензор теплових напружень.

Рідинну фазу розглядатимемо як неньютонівську рідину, в'язкість якої визначається на основі відомих для матеріалу залежностей, де девіатор тензора напружень і сферичний тензор напружень виражені відповідно як

$$\hat{S} = \eta_d \hat{D}, \quad \hat{\sigma}_s = \chi \hat{\epsilon}_s, \quad (19)$$

де \hat{D} – девіатор тензора швидкості деформацій, $\eta_d(\dot{\Gamma}, T)$ – коефіцієнт динамічної в'язкості, χ – коефіцієнт в'язкості об'ємної деформації, $\hat{\epsilon}_s$ – сферичний тензор швидкості деформацій.

При цьому фізико-механічні й теплофізичні величини залежать від температури та концентрації фаз.

Створена математична модель дає змогу моделювати процеси змішування в'язких рідин з іншими компонентами та між собою з позицій МСС, тобто застосовуючи ту ж саму математичну базу, що й для інших процесів екструзії.

Процеси змішування відбуваються тільки завдяки конвективним складовим руху компонент суміші. Для двофазної суміші доцільно користуватись рівняннями для суміші в цілому і рівняннями для компоненти, яка є домінуючою:

$$\vec{\nabla} \cdot \rho \vec{v} = 0, \quad (20)$$

$$\frac{\partial \rho_2^{**}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho_2^{**} \vec{v} - \kappa_{21} = 0, \quad (21)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \hat{\sigma}_2 + \vec{P} = 0, \quad (22)$$

$$\vec{\nabla} \cdot n_2 \hat{\sigma}_2 + \vec{P}_2^{**} = 0, \quad (23)$$

$$c\vec{v} \cdot \nabla T = \kappa_{12}(c_1 - c_2)T + n_2 \hat{\sigma}_2 \cdot \hat{\epsilon} + Q_{1V} + Q_{2V}. \quad (24)$$

Стан твердої фази, яка складається з частинок полімеру, що перебуває у високоеластичному стані, визначається формулою

$$\hat{D} = \frac{1}{\eta} \hat{S} + \frac{1}{\mu} \hat{S}, \quad (25)$$

де $\mu(T_\sigma, \Gamma, T)$ – модуль Ляме високоеластичної складової, $\eta(T_\sigma, \dot{\Gamma}, T)$ – динамічна в'язкість.

Стан рідкої фази описується так само, як і в попередньому випадку.

Наприкінці етапу пластикації матеріал перебуває в рідкому стані з невеликою кількістю нерозплавлених частинок, які не впливають на поведінку суміші. Процес переробки переходить у стадію гомогенізації, головним призначенням котрого є досягнення максимальної однорідності суміші.

Система рівнянь зводиться до виду:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0, \quad (26)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \hat{\sigma} + \vec{P} = 0, \quad (27)$$

$$c\vec{v} \cdot \nabla T = \kappa_{12}(c_1 - c_2)T + \hat{\sigma} \cdot \hat{\epsilon} + Q_V, \quad (28)$$

$$\vec{\nabla} \cdot n_\alpha \vec{v} = \frac{\kappa_{\alpha\beta}^s}{\rho_\alpha}, \quad (29)$$

де $\kappa_{\alpha\beta}^s$ – швидкість структурного фазового переходу α -компоненти в β -компоненту.

Попередні дослідження показали, що при комп'ютерному моделюванні слабостисливих середовищ традиційні схеми методу скінченних елементів (МСЕ) призводять до значних похибок, які виникають через некоректну апроксимацію об'ємних деформацій та деформацій зсуву. Тому для дискретизації вище наведених рівнянь використано моментну схему МСЕ, яка дає змогу позбавитися негативних властивостей традиційних схем шляхом поєднання варіаційного методу з методом моментів. Автором пропонується узагальнення описаного підходу для побудови єдиних співвідношень МСЕ на базі шестигранного криволінійного скінченного елемента (СЕ) у змішаному варіанті, запропонованому проф. О. С. Сахаровим, незалежно від стисливості матеріалів зі збереженням переваг моментної схеми.

Вектори переміщень u_m ($m=1, 2, 3$) точок СЕ і швидкості переміщень v_m розглядаються як полілінійні функції локальних координат

$$\{u\} = [N]\{U\}, \quad \{v\} = [N]\{V\}, \quad (30)$$

де $\{u\}$ – вектор переміщень довільної точки СЕ; $\{v\} = \{v_1 \ v_2 \ v_3\}^T$ – вектор швидкостей переміщень довільної точки СЕ; $[N]$ – матриця функцій форми; $\{U\}$ – вектор вузлових швидкостей СЕ; $\{V\}$ – вектор вузлових переміщень СЕ.

Для складання лінеаризованих рівнянь МСЕ в переміщеннях або швидкостях переміщень зазвичай застосовується метод Ритця. Так, для отримання матриці жорсткості пружного тіла можна використати вираз для роботи внутрішніх сил СЕ на можливих переміщеннях:

$$\delta W_{CE} = \frac{1}{2} \delta \int_{V_{CE}} \{\boldsymbol{\varepsilon}\}^T \{\boldsymbol{\sigma}\} dV = \int_{V_{CE}} \delta \{\boldsymbol{\varepsilon}\}^T \{\boldsymbol{\sigma}\} dV, \quad (31)$$

де $\{\boldsymbol{\sigma}\} = [\sigma^{11} \ \sigma^{22} \ \sigma^{33} \ \sigma^{12} \ \sigma^{13} \ \sigma^{23}]^T$ – вектор напружень, який визначається через вектор деформацій $\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = [\varepsilon^{11} \ \varepsilon^{22} \ \varepsilon^{33} \ 2\varepsilon^{12} \ 2\varepsilon^{13} \ 2\varepsilon^{23}]^T$ і матрицю $[E]$ параметрів пружності матеріалів: $\{\boldsymbol{\sigma}\} = [E]\{\boldsymbol{\varepsilon}\}$. Вектор деформацій залежить від вузлових переміщень як $\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = [B]\{U\}$.

В остаточному вигляді

$$\delta W_{CE} = \int_{V_{CE}} \delta \{\boldsymbol{\varepsilon}\}^T [E]\{\boldsymbol{\varepsilon}\} dV = \delta \{U\}^T [B]^T [E][B]\{U\} = \delta \{U\}^T [K^e]\{U\}, \quad (32)$$

де $[K^e] = [B]^T [E][B]$ – матриця жорсткості CE, $\delta \{U\}$ – вектор можливих вузлових переміщень.

У разі розгляду в'язкотекучих матеріалів визначається матриця в'язкості CE. Для цього використовується варіаційний вираз потужності роботи внутрішніх сил:

$$\delta \dot{W}_{CE} = \frac{1}{2} \delta \int_{V_{CE}} \{\boldsymbol{\zeta}\}^T \{\boldsymbol{\sigma}\} dV = \int_{V_{CE}} \delta \{\boldsymbol{\zeta}\}^T \{\boldsymbol{\sigma}\} dV, \quad (33)$$

де $\{\boldsymbol{\sigma}\}$ – вектор напружень, пов'язаний з вектором швидкостей деформацій матричним співвідношенням $\{\boldsymbol{\sigma}\} = [M]\{\boldsymbol{\zeta}\}$, $[M]$ – матриця в'язкості; $\{\boldsymbol{\zeta}\} = [B]\{V\}$ – вектор деформацій.

Потужність роботи внутрішніх сил можна остаточно подати у вигляді

$$\delta \dot{W}_{CE} = \int_{V_{CE}} \delta \{\boldsymbol{\zeta}\}^T [M]\{\boldsymbol{\zeta}\} dV = \delta \{V\}^T [B]^T [M][B]\{V\} = \delta \{V\}^T [K^V]\{V\}, \quad (34)$$

де $[K^V] = [B]^T [M][B]$ – матриця в'язкості CE.

У разі формування системи рівнянь МСЕ змішаного типу, коли крім переміщень невідомими є також напруження, використовуються узагальнені варіаційні принципи.

При розгляді полілінійного CE з позицій моментної схеми МСЕ формулюється змішана матриця для пружного CE, яка дорівнює

$$[\tilde{H}^e] = \begin{bmatrix} [\tilde{K}^e] & \{N\} \\ \{N\}^T & -(\eta^e V_{CE}) \end{bmatrix}, \quad (35)$$

$[\tilde{K}^e]$ – матриця жорсткості CE відносно зміни його форми, $\{N\}$ – вектор впливу вузлових переміщень на об'ємну деформацію CE, η^e – коефіцієнт об'ємної стисливості, який прямує до нуля, V_{CE} – об'єм CE.

Аналогічно для в'язкого CE:

$$[\tilde{H}^V] = \begin{bmatrix} [\tilde{K}^V] & \{N\} \\ \{N\}^T & -(\eta^V V_{CE}) \end{bmatrix}, \quad (36)$$

де $[\tilde{K}^V]$ – матриця в'язкості CE, коефіцієнт стисливості η^V є змінною величиною, яка на початку при нульовому тиску приймається $\eta^V = 0$ (умова нестисливості).

Важливим застосуванням матриць CE змішаного методу є моделювання слабо

стисливих і нестисливих середовищ, коли в процесі перероблення їхні властивості змінюються в широкому діапазоні, включаючи перехід від стисливого до нестисливого стану і навпаки. Це характерно для процесів екструзії полімерів.

Більшість екструзійних процесів є неізотермічними і супроводжуються явищами теплопереносу. Математичне моделювання здійснюється спільним розв'язанням рівнянь руху та збереження енергії, яке з точки зору застосування МСЕ доцільно записати у вигляді варіаційного рівняння

$$\int_V \lambda_T \vec{\nabla} T \cdot \vec{\nabla}(\delta T) dV + \int_V c_T \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T \delta T dV - \int_V D_T \delta T dV + \int_S \alpha_T (T - T_c) \delta T dV = 0, \quad (37)$$

де $D_T = \hat{\sigma} \cdot \hat{\xi} + Q_{(v)}$ – швидкість надходження тепла до одиниці об'єму тіла за рахунок дисипації енергії руху та зовнішнього джерела тепла, α_T – коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні тіла, T_c – температура зовнішнього середовища.

Рівняння МСЕ для теплопередачі будуються на основі матриць СЕ, що характеризують перенесення теплоти за рахунок дифузії і руху середовища. Розподіл температури T у межах СЕ приймаємо на базі полілінійних функцій форми $N_{(i)}$:

$$\{T\} = [L] \{T^{(i)}\}, \quad (38)$$

$$[L] = [N_{(1)} \quad N_{(2)} \quad N_{(3)} \quad N_{(4)} \quad N_{(5)} \quad N_{(6)} \quad N_{(7)} \quad N_{(8)}]. \quad (39)$$

Вектор-градієнт температури визначається формулами:

$$\{\nabla T\} = [\nabla] [L] \{T^{(i)}\} = [G] \{T^{(i)}\}, \quad (40)$$

$$[\nabla] = \left[\frac{\partial}{\partial \xi^{1'}} \quad \frac{\partial}{\partial \xi^{2'}} \quad \frac{\partial}{\partial \xi^{3'}} \right]^T, \quad (41)$$

$$[G] = [\nabla] [L]. \quad (42)$$

Матриця теплопередачі СЕ $[K_T]$ дорівнює сумі двох матриць $[K_T] = [\Pi_T] + [\Xi_T]$: матриці теплопровідності $[\Pi_T]$ та конвекції $[\Xi_T]$, які представляються матричними виразами:

$$[\Pi_T] = \int_{V_{CE}} [G]^T [g^*] [G] \lambda_T dV = \int_{-0.5}^{0.5} [G]^T [g^*] [G] \lambda_T \sqrt{g} d\xi^1 d\xi^2 d\xi^3, \quad (43)$$

$$[\Xi_T] = \int_{V_{CE}} [L]^T [J^*]^T \{v\}^T [G] c_T dV = \int_{-0.5}^{0.5} [L]^T [J^*]^T \{V\}^T [N]^T [G] c_T \sqrt{g} d\xi^1 d\xi^2 d\xi^3, \quad (44)$$

де $[g^*]$ – матриця контраваріантних компонент метричного тензора, $[J^*] = [J]^{-1}$ – обернена матриця Якобі, $\{V\}$ – вектор вузлових швидкостей СЕ.

Отримані на основі моментної схеми матриці СЕ є універсальними з точки зору їх ефективного застосування для розв'язання задач термопружності і тепломасопереносу як твердих тіл, так рідин і газів. Це дає змогу виконувати аналіз процесів формування полімерних матеріалів у виробі з врахуванням їхніх реальних властивостей і особливостей взаємодії з елементами обладнання та здійснювати розрахунки міцності й жорсткості конструкцій при термосилових навантаженнях.

Розроблено дискретні математичні моделі змішування розплавів полімерних композицій з урахуванням взаємозалежності реологічних, теплофізичних властивостей композицій з тепловими ефектами, інтенсивністю деформування та геометрією

робочих каналів. Рівняння МСЕ для масопередачі будуються на основі матриць СЕ, що характеризують перенесення речовини за рахунок дифузії і руху середовища. Розподіл концентрацій обраного компонента C у межах СЕ беремо на базі полілінійних функцій форми $N_{(i)}$:

$$\{C\} = [L] \{C^{(i)}\}, \quad (45)$$

$$[L] = [N_{(1)} \quad N_{(2)} \quad N_{(3)} \quad N_{(4)} \quad N_{(5)} \quad N_{(6)} \quad N_{(7)} \quad N_{(8)}]. \quad (46)$$

Вектор-градієнт концентрацій визначається формулами:

$$\{\nabla C\} = [\nabla] [L] \{C^{(i)}\} = [G] \{C^{(i)}\}, \quad (47)$$

$$[\nabla] = \left[\frac{\partial}{\partial \xi^{1'}} \quad \frac{\partial}{\partial \xi^{2'}} \quad \frac{\partial}{\partial \xi^{3'}} \right]^T, \quad (48)$$

$$[G] = [\nabla] [L]. \quad (49)$$

Матриця масопередачі СЕ $[K_C]$ дорівнює сумі двох матриць $[K_C] = [\Pi_C] + [\Xi_C]$: матриці дифузії $[\Pi_C]$ та конвекції $[\Xi_C]$, які представляються матричними виразами:

$$[\Pi_C] = \int_{V_{CE}} [G]^T [g^*] [G] \phi dV = \int_{-0.5}^{0.5} [G]^T [g^*] [G] \phi \sqrt{g} d\xi^1 d\xi^2 d\xi^3, \quad (50)$$

$$[\Xi_C] = \int_{V_{CE}} [L]^T [J^*]^T \{v\}^T [G] c dV = \int_{-0.5}^{0.5} [L]^T [J^*]^T \{v\}^T [N]^T [G] c \sqrt{g} d\xi^1 d\xi^2 d\xi^3. \quad (51)$$

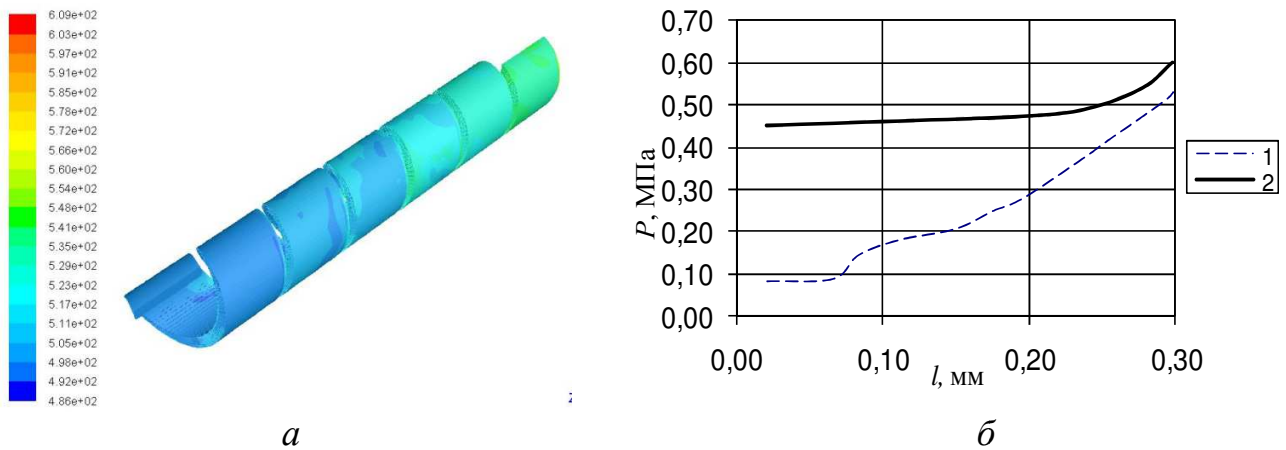
У разі моделювання процесів змішування розплавів одних полімерів з іншими, з дисперсними компонентами, або дисперсних матеріалів між собою дифузія відіграє незначну роль і їй можна знехтувати, тобто $[\Pi_C] \rightarrow 0$.

Отримані на основі моментної схеми матриці СЕ є універсальними для розв'язання задач термопружності і тепломасопереносу як твердих тіл, так рідин та газів. Це дає змогу в рамках САПР виконувати аналіз процесів перероблення полімерних матеріалів у виробі та здійснювати розрахунки міцності й жорсткості конструкцій при термосилових навантаженнях.

У третьому розділі наведено результати моделювання різних функціональних зон черв'ячних екструзійних машин.

У зону живлення черв'ячних екструдерів полімер найчастіше надходить у вигляді гранул, які можуть проковзувати між собою, перекочуватись одна по одній, деформуватися тощо, що впливає на властивості та рух матеріалу відносно робочих органів. Експериментальні дослідження коефіцієнта зовнішнього тертя гранульованих полімерів по різних поверхнях та коефіцієнта бічного тиску для найбільш вживаних видів полімерів дозволили отримати їх різні залежності від температури, навантаження і швидкості руху, а також від товщини шару гранул.

Було проведено моделювання руху матеріалу в системі Ansys Fluent з урахуванням отриманих залежностей коефіцієнта тертя. На рис. 2 наведено приклад для таких умов: діаметр черв'яка 63 мм, перероблюваний матеріал – поліетилен низької густини. Значення тиску на виході із зони задавалось рівним 0,5 МПа, продуктивність $G=150$ кг/год, частота обертання черв'яка $n=150$ хв⁻¹. Результати моделювання наближаються до попередніх розрахункових лише в кінці зони живлення.



a – об’ємне поле розподілу тиску; *б* – графік тиску по довжині

1 – за попередніми розрахунковими даними; 2 – за результатами даної роботи

Рисунок 2 – Результати моделювання тиску в зоні живлення

Проведені дослідження показали, що поведінку гранульованих матеріалів у багатьох випадках не може бути описано закономірностями для суцільних середовищ. Тому в разі проведення моделювань на математичній базі для суцільних середовищ результати можуть бути некоректними.

Виконано серію числових експериментів процесу плавлення полімеру в черв’ячному каналі постійної геометрії: внутрішній діаметр корпуса екструдера в зоні плавлення – 90 мм, діаметр осердя черв’яка – 63 мм. У ході числових розрахунків виявлено, що основні процеси плавлення для робочого каналу заданої геометрії та фізико-механічних і теплофізичних характеристик матеріалу відбуваються в межах шести витків гвинтової нарізки. Систему координат зв’язано з черв’яком, навколо нього задано обертання циліндричного корпуса зі швидкістю $n = 60$ об/хв. Об’ємна витрата матеріалу задана $V = 0,3$ м³/год.

Розподіл температури у вигляді ізополів у поздовжніх перерізах каналу зони плавлення екструдера наведено на рис. 3.

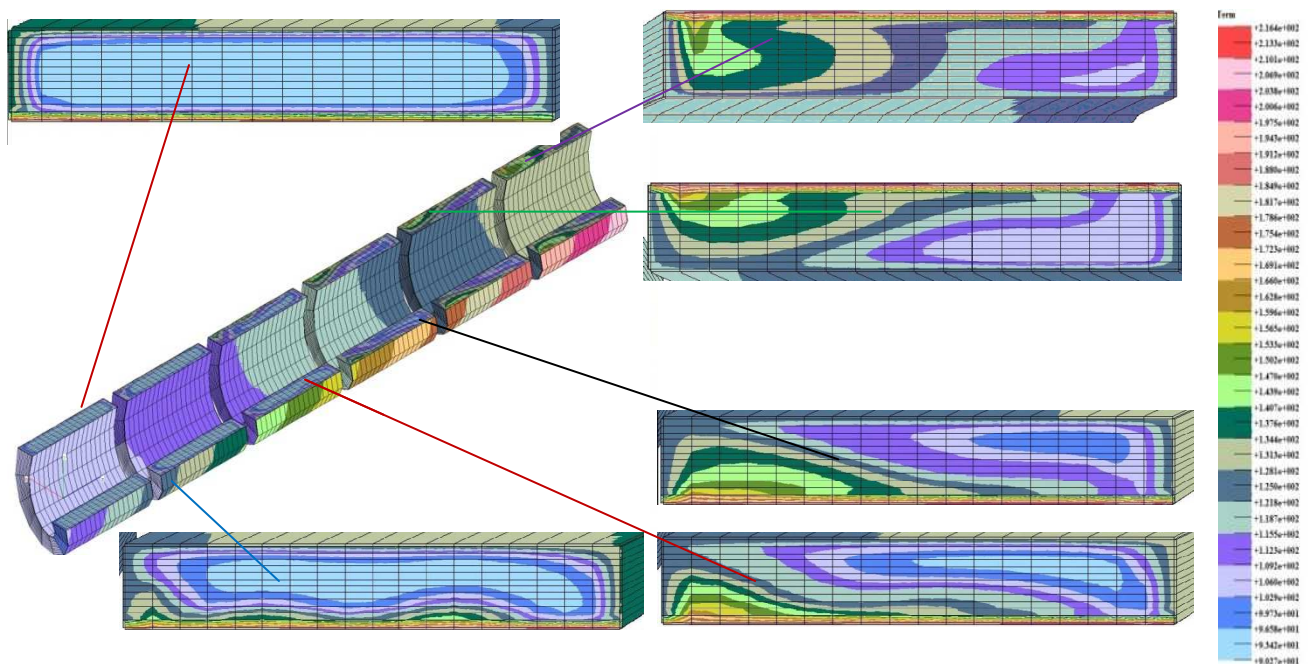
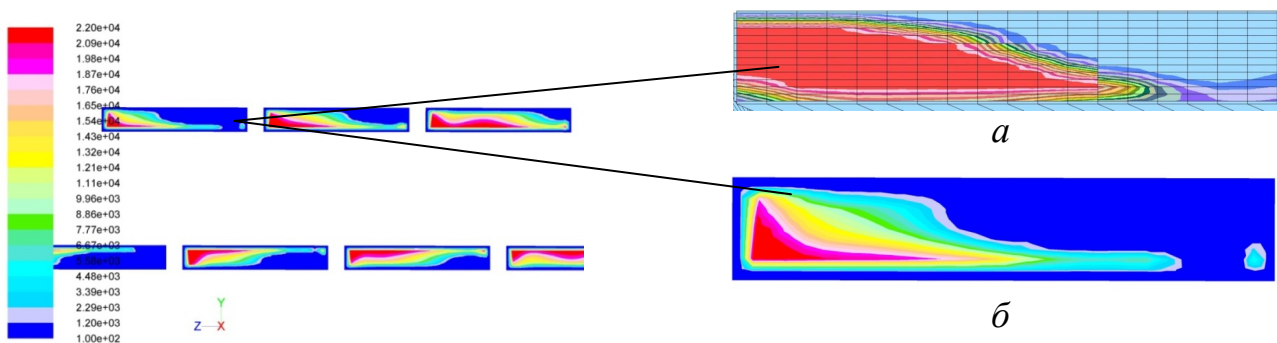


Рисунок 3 – Розподіл температур в перерізах каналу екструдера

На початку зони плавлення температура змінюється повільно і в передусім біля зовнішньої поверхні каналу. Теплообмін переважно здійснюється за рахунок теплопровідності, яка для полімерів є низькою. Результати числових експериментів показують, що головну роль у розподілі температури в полімері відіграє теплота, обумовлена його тертям об стінки обладнання та енергією дисипації в'язкої деформації. У поздовжньому русі матеріалу спостерігається суттєва нерівномірність розподілу швидкостей у перерізах. Це спричиняє конвективний теплообмін вздовж каналу черв'яка. Таке явище не враховується більшістю існуючих моделей процесу плавлення полімерів, проте також впливає на розподіл температури.

Моделювання плавлення полімеру за розподілом в'язкості було здійснене в системі VESNA, розробленій та реалізованій на кафедрі ХПСМ КПІ ім. Ігоря Сікорського. На початку зони плавлення величина в'язкості по всьому перерізу відповідає твердій фракції. Із зростанням температури по довжині каналу шари полімеру біля поверхні корпусу починають плавитись (рис. 4). Далі пробка полімеру в області штовхальної поверхні гребеня нарізки черв'яка розм'якшується, руйнується і відповідно до значень в'язкості переходить до шару суміші залишків гранул та розплаву. Переріз пробки при цьому набуває клиноподібної форми, на відміну від класичної гіпотези. На завершальному етапі залишки твердої фази з усіх боків змочуються розплавом, руйнуються і перетворюються на текучу суміш. Отримані методом оцінки в'язкості форми пробки подібні тим, які отримані методом оцінки температур.



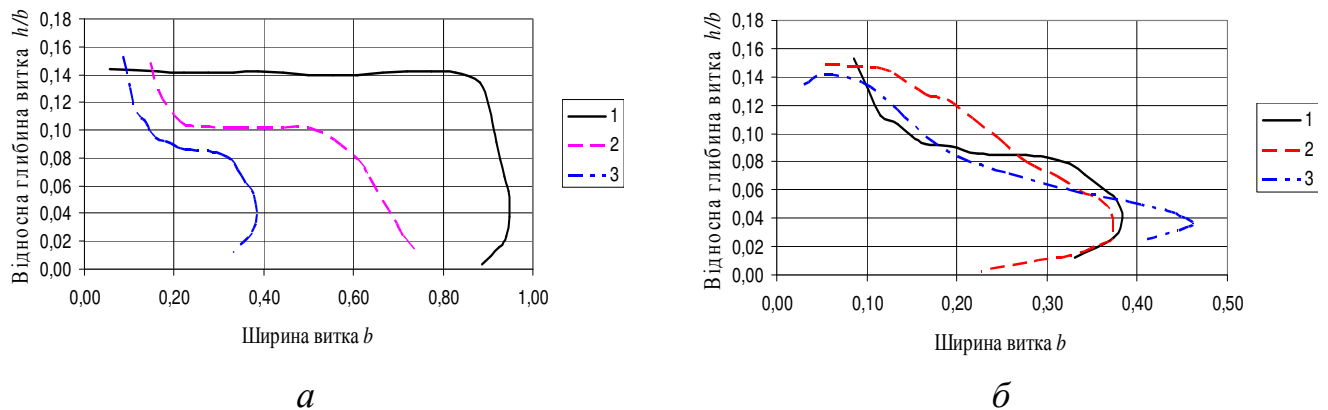
за результатами, отриманими в системі: *a* – Vesna; *b* – Ansys Fluent

Рисунок 4 – Розподіл в'язкостей у перерізі черв'ячного каналу в зоні плавлення

Аналогічні дослідження було виконано в програмному комплексі Ansys Fluent. Оскільки він призначений для моделювання лише рідких середовищ, нерозплавлена маса полімеру імітувалась рідиною з в'язкістю, більшою на два порядки від в'язкості розплаву. З рис. 4 видно наявність перехідної зони між пробкою та розплавом у вигляді суміші нерозплавлених частинок з розплавом, що характеризується приведеною в'язкістю. В останньому витку зони плавлення знаходиться майже розплавлена маса полімеру, а біля пасивного гребеня залишилось 5–10 % твердої маси, що свідчить про те, що в розглянутих умовах достатньо зони плавлення довжиною 6–8 витків.

Форми пробки на різних дистанціях від початку зони плавлення, проведені по межах ізоліній температури текучості полімеру, показані на рис. 5, *a*, а порівняння форми перерізу пробки наприкінці зони плавлення, отримані за різними показниками в різних програмних середовищах, наведено на рис. 5, *б*. Як видно з рис. 5, *a*, форми перерізів пробки за результатами моделювання значно відрізняються від прямокутних уже після 2-го витка. Порівняння форми перерізу пробки

наприкінці 6-го витка, отриманого за запропонованою методикою, доводить подібність результатів за результатами аналізу температур і в'язкостей (рис. 5,б).

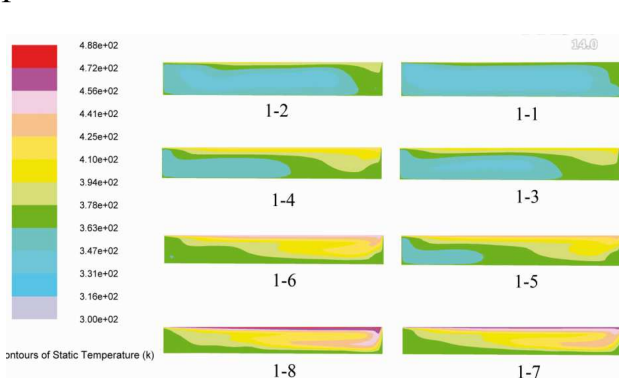


a – форма перерізу пробки на різних відстанях від початку зони плавлення: 1 – кінець 2-го витка; 2 – кінець 4-го витка; 3 – кінець 6-го витка; *б* – порівняння форми перерізу пробки: 1 – за результатами аналізу температур у середовищі VESNA; 2, 3 – за результатами аналізу в'язкості в середовищі VESNA та Ansys Fluent
Рисунок 5 – Порівняння форми пробки в різних перерізах та різними методами

Зауважимо, що форма пробки, отримана моделюванням у середовищі VESNA, більш відповідає експериментальним даним, за якими гострого виступу в нижній частині не спостерігалось. Тобто запропонований універсальний підхід до моделювання середовищ у різному стані можна вважати більш точним.

Основним чинником надходження теплоти до пробки є тертя полімеру по нагрітій поверхні циліндра. Зазвичай для забезпечення контакту пробки з циліндром під час її плавлення черв'як у цій зоні виготовляється з конічним осердям, яке поступово розширюється. Виконано серію числових розрахунків процесу плавлення полімеру в черв'ячному каналі кінчної геометрії. Для прикладу як перероблюваний матеріал взято поліетилен низької густини. Зовнішній діаметр черв'яка приймаємо рівним 63 мм, кут конусності осердя черв'яка $\varphi=15^\circ$. Черв'як обертається з швидкістю $n = 60$ об/хв. На вхідному перерізі каналу задавали витрату матеріалу. Числові дослідження проводились за допомогою програмного пакету Ansys Fluent.

Розподіл температур полімеру в поперечних перерізах каналу наведено на рис. 6.



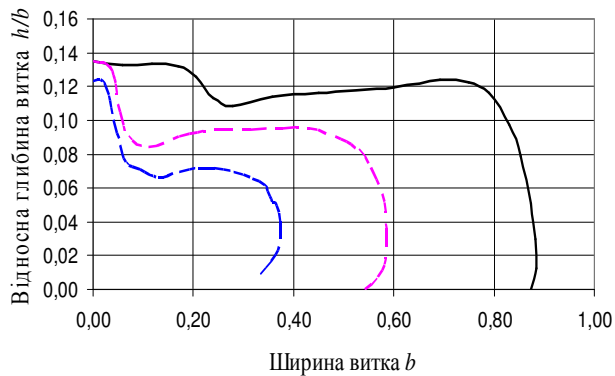
1-1 – 1-8 – перерізи каналу по довжині зони плавлення
Рисунок 6 – Загальний вигляд розподілу температур у кінчному каналі

На початку зони плавлення температура змінюється досить повільно і лише поблизу поверхні циліндра і штовхальної поверхні гребеня черв'яка починає стрімко зростати.

Це зумовлено виділенням теплоти дисипації від тертя полімерної пробки по металевих поверхнях. При наближенні шарів пробки до температури плавлення вони розм'якшуються і частково перетворюються на розплав, внаслідок чого

температура полімеру зростає. Через зрізання півки розплаву гребенем у зоні його штовхальної поверхні, градієнти температури максимальні. В кінці зони плавлення, коли пробка майже повністю розплавлена, градієнти температури зменшуються, а температура підвищується до 430–435 К.

Форми пробки на різних дистанціях від початку зони плавлення, проведені по ізолініям температури текучості полімеру, наведено на рис. 7.



Після 6-го витка пробка як єдине ціле вже не існує, а розбивається на окремі тверді рештки, оточені розплавом.

1 – у перерізі 1-2 (кінець 2-го витка);

2 – у перерізі 1-4 (кінець 4-го витка);

3 – у перерізі 1-5 (кінець 5-го витка)

Рисунок 7 – Форма перерізу пробки на різних відстанях від початку зони плавлення

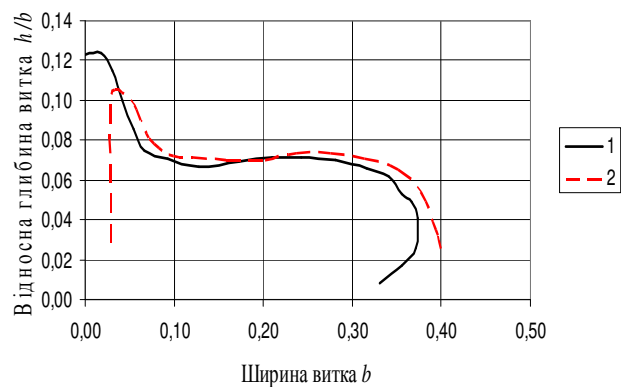
Кінетику плавлення моделювали також по зміні в'язкості. Стан полімеру в твердому стані імітувався заданням значень в'язкості, більших від в'язкості його розплаву в 100 разів. Із зростанням температури по довжині каналу в'язкість полімеру суттєво зменшується біля поверхні циліндра, тобто шар полімеру біля нього починає плавитись. У міру руху полімеру зона розплаву розширюється в області штовхальної стінки черв'яка, і за розрахованими значеннями в'язкості, переходить в шар рідинної суміші залишків гранул і розплаву. Процес переходу полімеру в текучий стан далі зміщується в бік пасивної стінки черв'яка, тверда частина пробки набуває клиноподібної форми, суттєво відрізняючись від прямокутного перерізу, як і в експериментальних дослідженнях, на відміну від класичної гіпотези.

Порівняння форми перерізу пробки наприкінці 5-го витка, отриманого за запропонованою методологією, показує подібність форми пробки за результатами аналізу температури і в'язкості (рис. 8).

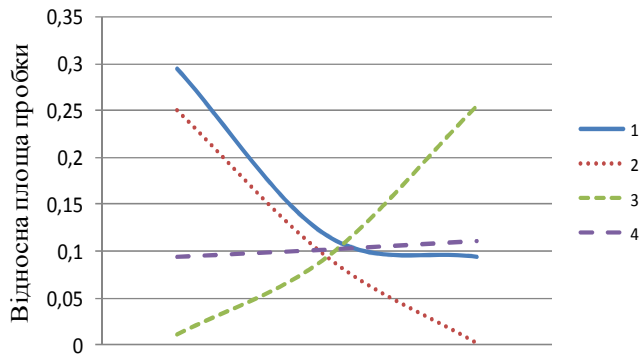
1 – за результатами аналізу температур;

2 – за результатами аналізу в'язкостей

Рисунок 8 – Порівняння форми перерізу пробки за результатами аналізу температури і в'язкості



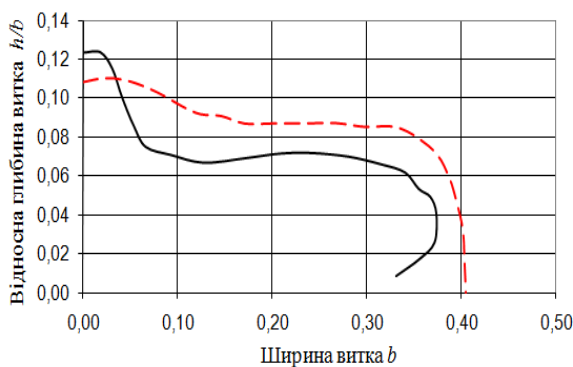
Числовим моделюванням досліджено вплив різних технологічних чинників на відносну площу пробки (рис. 9). Головним чином на процес плавлення впливає дисипація енергії за рахунок підвищення швидкості обертання черв'яка. Натомість попередній підігрів твердої пробки до температур 60–90 °С відчутно не призводить до більш інтенсивного плавлення. Збільшення температури корпусу сприяє плавленню до певної межі, після якої підвищення температури розплаву на границі з корпусом компенсується зниженням в'язкості та відповідним зниженням теплоти дисипації. У разі зменшення продуктивності швидкість плавлення також збільшується, проте це пояснюється більшим часом перебування полімеру в каналі черв'яка.



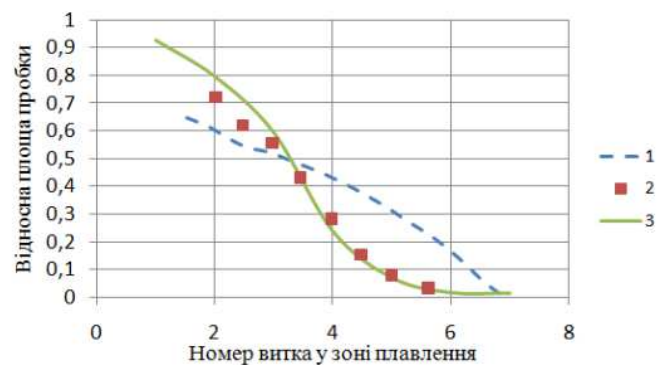
1 – від температури корпусу по довжині (60-180 °С – 90-215 °С); 2 – від швидкості обертання черв'яка (60–90 об/хв); 3 – від швидкості матеріалу на вході (0,08–0,22 м/с); 4 – від вхідної температури (60–90 °С)

Рисунок 9 – Залежність розподілу відносної площі пробки наприкінці зони плавлення від дії різних чинників

З метою порівняння результатів, отриманих за розробленою моделлю, з даними аналогічних досліджень, було проведено моделювання за умов, проведених іншими дослідниками. Результати порівняння результатів наведено на рис. 10, 11.



1 – за даними даної роботи;
2 – за моделлю Труфанової
Рисунок 10 – Порівняння форми перерізу пробки наприкінці 5-го витка



1 – за моделлю Труфанової;
2 – за експериментальними даними;
3 – за даними даної роботи
Рисунок 11 – Розподіл відносної площі пробки вздовж каналу екструдера

Результати моделювання показали суттєве наближення отриманих результатів до експериментальних порівняно з попередніми числовими дослідженнями.

Аналіз отриманих результатів показав, що внаслідок розмивання розплавом поверхневих шарів гранул пробки та її руйнування в кінці зони плавлення утворюється суміш непроплавлених частинок полімеру, оточених розплавом. Для запобігання потраплянню подібних частинок у готовий виріб необхідно здійснювати змішування, температурну гомогенізацію та створювати бар'єр проникнення твердих частинок до каналів головки. Для цього використовуються змішувачі різних типів.

Метою математичного моделювання процесів змішування та гомогенізації в змішувальних пристроях є визначення залежності витратонапірних характеристик змішувальних елементів і показників якості підготовки розплаву від конструктивних параметрів робочих органів. Для розв'язання задач змішування й гомогенізації спочатку розв'язується задача розподілу швидкостей і стану рідини, а потім на її основі – задачі тепломасообміну.

Одним із розповсюджених варіантів конструкцій змішувачів є бар'єрний змішувач петлевого типу (рис. 12). Було проведено числове моделювання процесів змішування та температурної гомогенізації в ньому. Змішувач включає вхідний кільцевий канал 2, вхідне 3 і вихідне 5 поглиблення, розділені між собою бар'єрним

гребенем 4. При протіканні матеріалу із вхідного поглиблення у вихідне через бар'єрний гребень і зазор 6 розплав піддається зсувним деформаціям, за рахунок чого відбувається змішування. З вихідного поглиблення розплав потрапляє у вихідний циліндричний кільцевий канал 7 між черв'яком і корпусом 8.

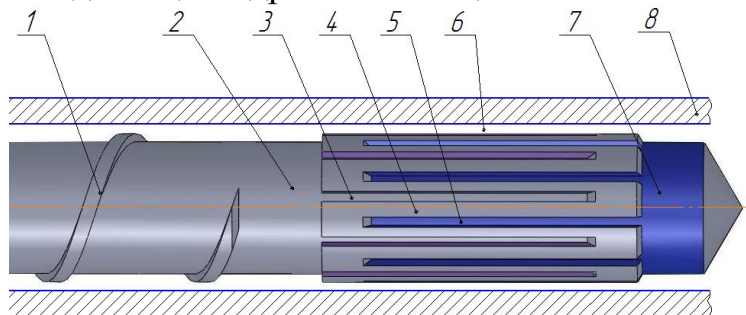
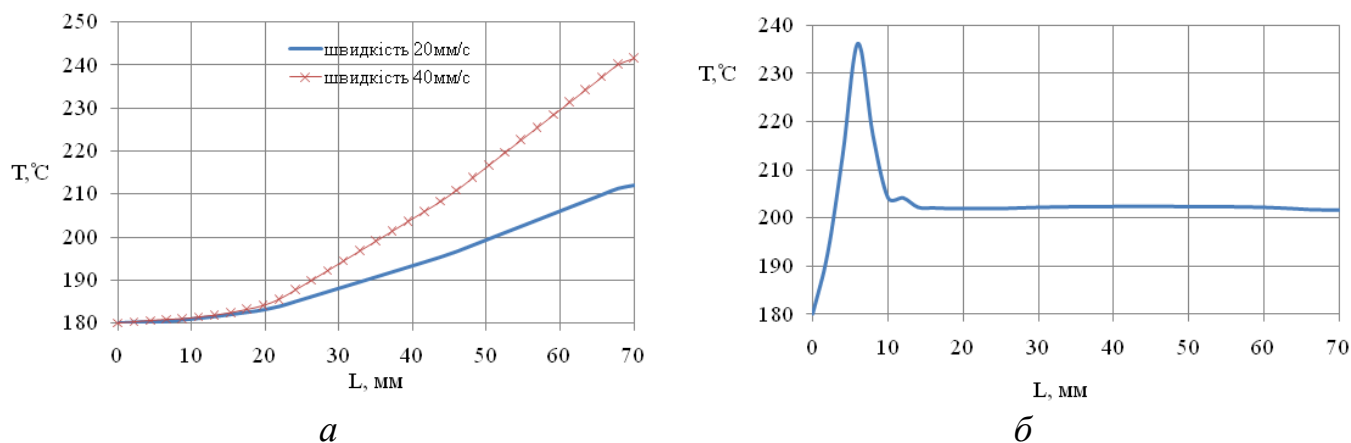


Рисунок 12 – Змішувач бар'єрного типу

На вхідній грані задавалось значення температури $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Дослідження розподілу температур проводили при двох умовах: адіабатичній та термостатування, коли температура стінок постійна і дорівнює $T_{36} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Значення обертової швидкості в п'ять разів перевищує значення поздовжньої швидкості полімеру.

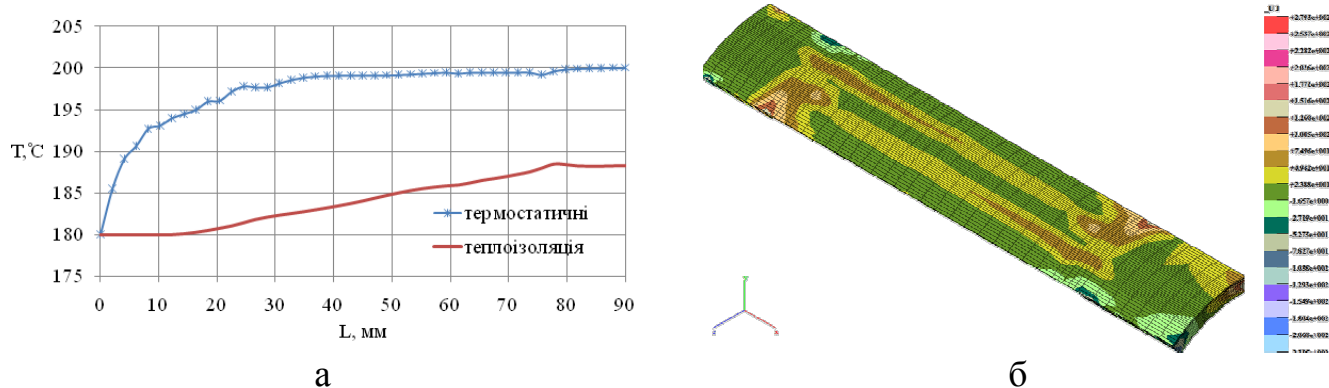
В адіабатичних умовах зі збільшенням поздовжньої швидкості течії полімеру підвищення температури вздовж осі відбувається інтенсивніше: на довжині 70 мм за швидкості 20 мм/с воно становить $31\text{ }^{\circ}\text{C}$, а за швидкості 40 мм/с – $62\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 13,а). За термостатичних умов температура на відстані 8 мм від входу перед зниженням висоти каналу з $h = 2,5\text{ мм}$ до $b = 1\text{ мм}$ різко підвищилась з $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $238\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 13,б). Це свідчить про те, що перед входом у зазор b утворюється застійна зона.



а – за адіабатичних умов; б – за термостатичних умов

Рисунок 13 – Розподіл температур у зазорах h і b

На рис. 14,а представлено порівняння розподілів температур по довжині змішувача посередині зазору b за термостатичних і адіабатичних умов. По довжині змішувача температура збільшується за рахунок виділення енергії дисипації і теплопередачі від зовнішньої поверхні. В зоні зменшення глибини каналу з h на b температура зростає інтенсивніше за рахунок збільшення деформації зсуву. На відміну від адіабатичних умов температура за умов термостатування на вхідному кільцевому зазорі змінюється інтенсивніше. Це пояснюється тим, що в малих зазорах тепло розподіляється здебільшого за рахунок теплопровідності, і температура розплаву стає майже рівною температурі стінок. Розподіл температур пов'язаний із перерізом каналів і розподілом швидкості в них (рис. 14,б): у поглибленнях полімер рухається швидше, ніж у зазорі. Значення максимальної швидкості в поглибленні складає 83 мм/с, а в зазорі 15 мм/с, тобто розплав рухається переважно в зазорах, які мають менший гідравлічний опір.

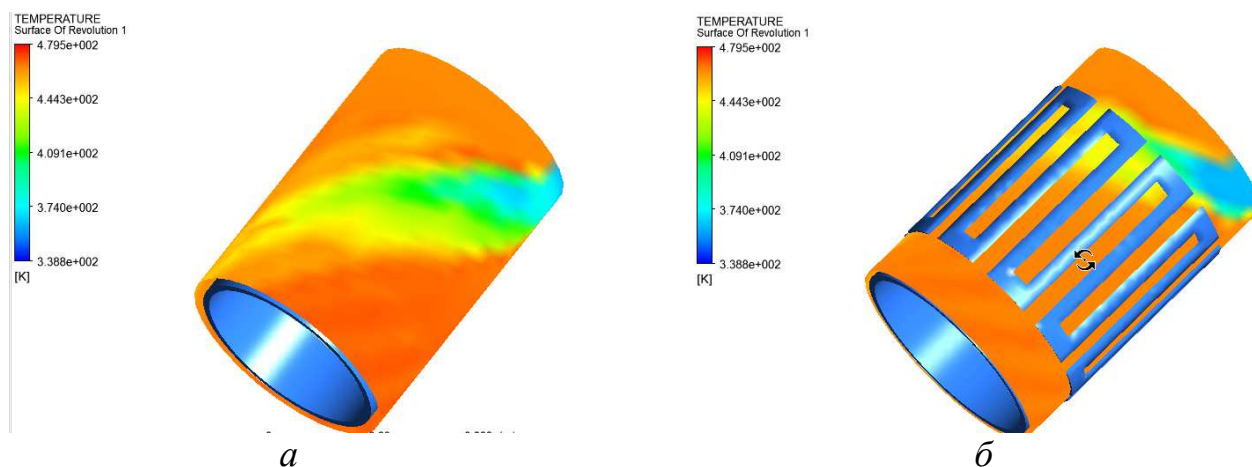


a – розподіл температур за різних граничних умов; *б* – розподіл швидкостей
Рисунок 14 – Розподіл температур та швидкостей у змішувачі

Аналіз розподілу швидкостей у змішувачі підтверджує, що збільшення швидкості деформацій зсуву під час руху розплаву полімеру в змішувачі спричиняє зростання значення енергії дисипації. Тому обов'язково необхідно контролювати температуру розплаву в зоні змішування та коригувати температуру стінок обладнання з можливістю їхнього охолодження.

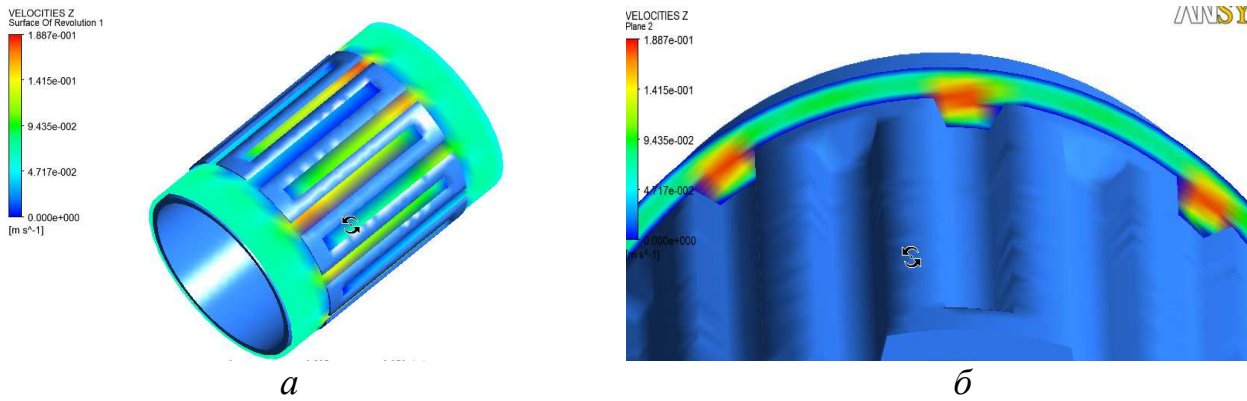
Для дослідження задачі розподілу швидкостей течії та температури в каналах бар'єрного змішувача в цілому проводилися серії числових експериментів. Розрахунки проведені для ПЕВГ марки 15803-020 та температури 463 К. В'язкість задавалась за законом Carreau-Yasuda. Температура диспергованого матеріалу та дисперсійного середовища: $t_1 = t_2 = 463 \text{ K}$; температура змішувача та корпусу: $t_{3M} = t_K = 463 \text{ K}$.

Для оцінки розподілу температурного поля в робочих зазорах змішувача дослідження проводили в різних площинах по висоті зазору між корпусом і гребнем, а також корпусом і ротором. На рис. 15 наведено результати досліджень розподілу температур суміші в площинах на відстанях 0,5 мм (рис. 15,*a*) і 2,5 мм (рис. 15,*б*) від внутрішньої поверхні корпусу за швидкості обертання 60 об/хв. Представлені результати числових досліджень свідчать про те, що при набіганні на бар'єри та в утворених ними каналах спостерігається інтенсивний перерозподіл температури диспергованого матеріалу.



a – на висоті 0,5 мм від внутрішньої поверхні корпусу;
б – на висоті 2,5 мм від внутрішньої поверхні корпусу;

Рисунок 15 – Розподіл температур суміші в перерізах робочого каналу змішувача

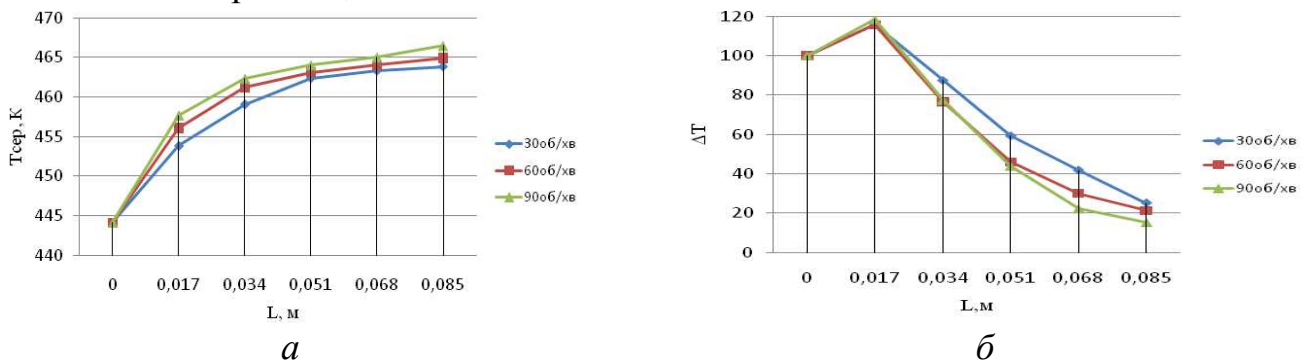


a – в площині на відстані 2,5 мм від внутрішньої поверхні корпусу;
б – у поперечному перерізі

Рисунок 16 – Розподіл повздовжніх швидкостей суміші в поздовжньому циліндричному та поперечному перерізах робочого каналу бар'єрного змішувача

Це спричинено зміною режиму течії матеріалу в каналах, утворених бар'єрними петлями (рис. 16,*a*), у зазорах над ними та за ними (рис. 16,*б*).

Графіки розподілу середньої температури в поперечних перерізах по довжині бар'єрного змішувача за різних швидкостей обертання наведено на рис. 17,*a*, а результати досліджень ефективності використання бар'єрного змішувача за умови прилипання – на рис. 17,*б*.



a – розподіл середньої температури в поперечних перерізах по довжині
б – розподіл різниці температур в поперечних перерізах по довжині

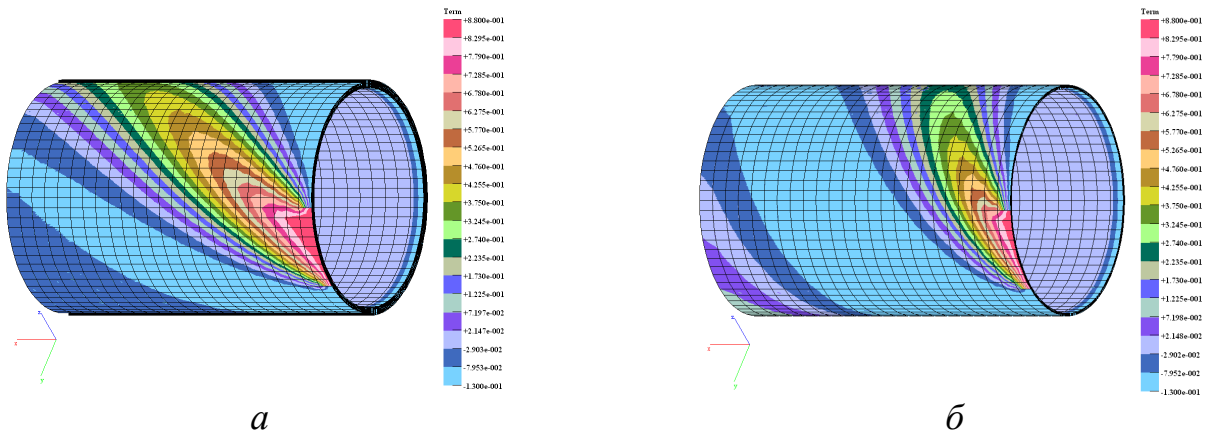
Рисунок 17 – Розподіл температур та їх найбільших різниць у перерізах змішувача

Як видно із рис. 17,*a*, зміна середньої температури по довжині змішувача на ділянці від 0 м до 0,04 м відбувається досить швидко. На вхідній зоні змішувача спостерігається підвищення різниці температур компонентів (рис. 17,*б*). Це зумовлено входом полімеру в бар'єрні зазори і повздовжні канали, в яких швидкості зсуву відрізняються на декілька порядків. Це зумовлює дисипацію енергії в зазорах між гребенями і корпусом і підвищення максимальної різниці температур у суміші зі 100 К до 118 К. При подальшому русі суміші в змішувачі різниця температур у його наступних перерізах зменшується. Якість отриманої суміші за співвідношенням початкової і кінцевої різниці температур у вхідному та вихідному перерізах за зміни чисел обертів від 30 об/хв до 90 об/хв збільшилась від 4 до 6,6 разів.

У більшості екструзійного та змішувального обладнання застосовуються динамічні змішувальні елементи з наявністю коаксіального зазору. Дослідження розподілу концентрації барвника в коаксіальному каналі проводилося на основі

запропонованого нового підходу визначення якості суміші, який полягає в безпосередньому використанні рівнянь тепломасопереносу, де за невідомі величини беруть значення концентрації барвника. Числове моделювання проводили за допомогою інтегрованого комплексу VESNA на основі методу скінченних елементів.

На рис. 18,*а* та 18,*б* наведено результати числового моделювання розподілу концентрації барвника в різних по висоті коаксіального зазору шарах полімерного матеріалу під час обертального руху внутрішнього циліндра. Потіки незабарвленого та забарвленого полімерів рухаються вздовж коаксіального зазору з однаковою швидкістю. При цьому концентрація барвника в забарвленому полімері, що подається в сегмент завширшки 1/4 кола, на вході в зазор приймається рівною 1, а в незабарвленому полімері – рівною 0.

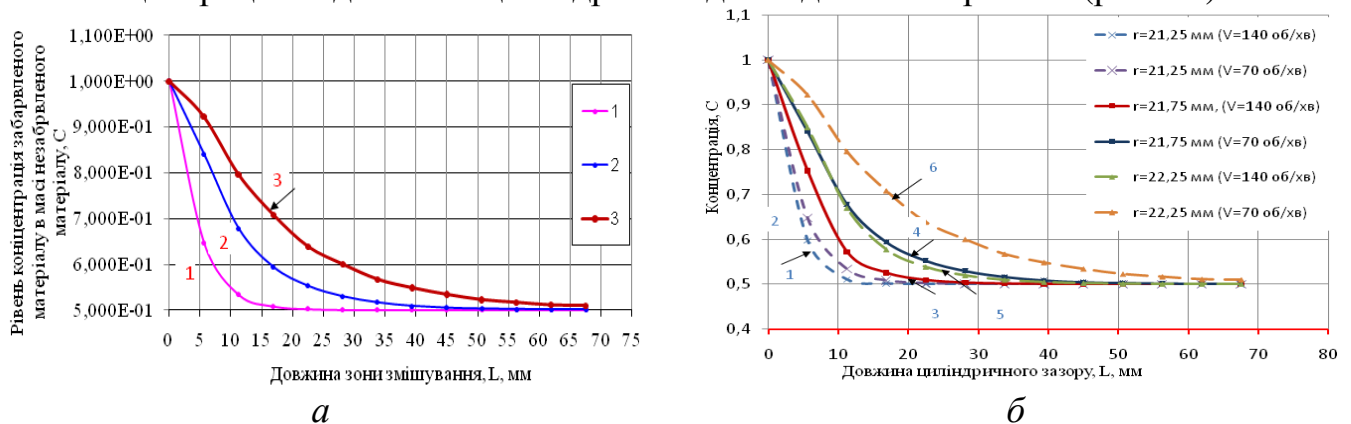


а – в середніх шарах; *б* – поблизу внутрішнього циліндра

Рисунок 18 – Розподіл концентрації барвника в коаксіальному зазорі

З порівняння спектрів розподілу барвника, наведених на рис. 18, видно, що процес змішування відбувається інтенсивніше у внутрішніх шарах полімеру поблизу внутрішнього обертального циліндра, оскільки деформація зсуву в цих шарах полімеру більша, що узгоджується з теоретичними та експериментальними даними.

Для аналізу процесу розподілу барвника в полімері досліджено залежність його концентрації по довжині циліндра та від швидкості обертання (рис. 19).



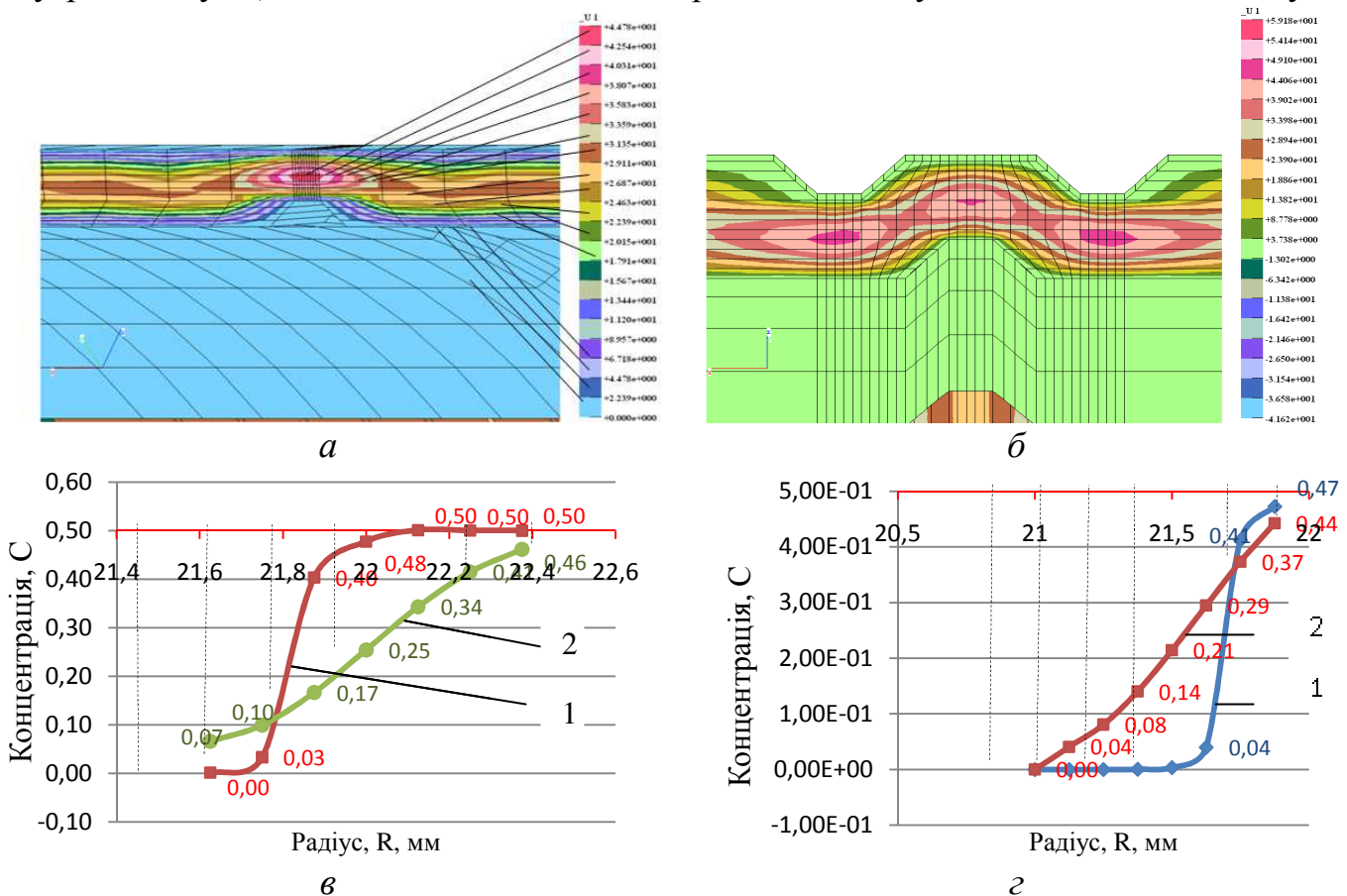
а – від довжини циліндра; *б* – по довжині за різної швидкості обертання

1 – біля рухомого циліндра; 2 – у середніх шарах; 3 – біля нерухомого циліндра

Рисунок 19 – Залежність розподілу концентрації барвника від довжини циліндра та по довжині коаксіального зазору за різної швидкості обертання

З результатів досліджень випливає, що перерозподіл компонентів суміші відбувається більш інтенсивно в тих шарах полімеру, де спостерігається більша деформація зсуву. У процесі руху полімерного розплаву вздовж коаксіального зазору змішування відбувається нерівномірно по радіусу і краще змішуються шари полімеру біля рухомої поверхні зони змішування. Результати доводять, що при збільшенні лінійної швидкості обертання вдвічі, концентрація суміші вирівнюється на такій довжині зони змішування, яка не є вдвічі меншою від довжини зони змішування. Тому під час проектування динамічних змішувачів доцільніше виконувати довшу зону змішування, ніж підвищувати швидкості обертального руху ротора.

Змішувальна ефективність різних конструктивних зон полімерного обладнання визначається динамікою потоків в них. На рис. 20 у спектральному та графічному вигляді зображено розподіл поступальної швидкості полімерного матеріалу при проходженні одного та трьох радіальних бар'єрів у коаксіальному зазорі. Отже, для покращення процесу змішування в каналі необхідні радіальні конструктивні елементи, які збуджують потік у радіальному напрямку, утворюючи циркуляційні зони, що призводить до інтенсифікації змішування шарів полімерного матеріалу по товщині каналу. За відсутності таких конструктивних елементів змішування відбувається лише в коловому напрямку за рахунок деформації зсуву. Якість змішування по товщині зазору вища при використанні конструкції з двома радіальними бар'єрами на зовнішньому циліндрі та одним радіальним бар'єром на внутрішньому. Це доводить доцільність використання змішувальних зон такого типу.



a, в – з одним бар'єром; *б, г* – з трьома бар'єрами; 1 – до бар'єра; 2 – після бар'єрів
Рисунок 20 – Розподіл швидкостей полімеру (*a, б*) і концентрацій барвника (*в, г*) у коаксіальному зазорі з бар'єрами

Для встановлення закономірностей взаємодії розплавів термопластів з різними фізичними властивостями в коаксіальному зазорі проведено числові експерименти, в яких на основі фундаментальних фізичних законів моделювався процес розподілу одного з полімерів в іншому. Властивості матеріалу: залежність в'язкості від концентрації задається за лінійним законом

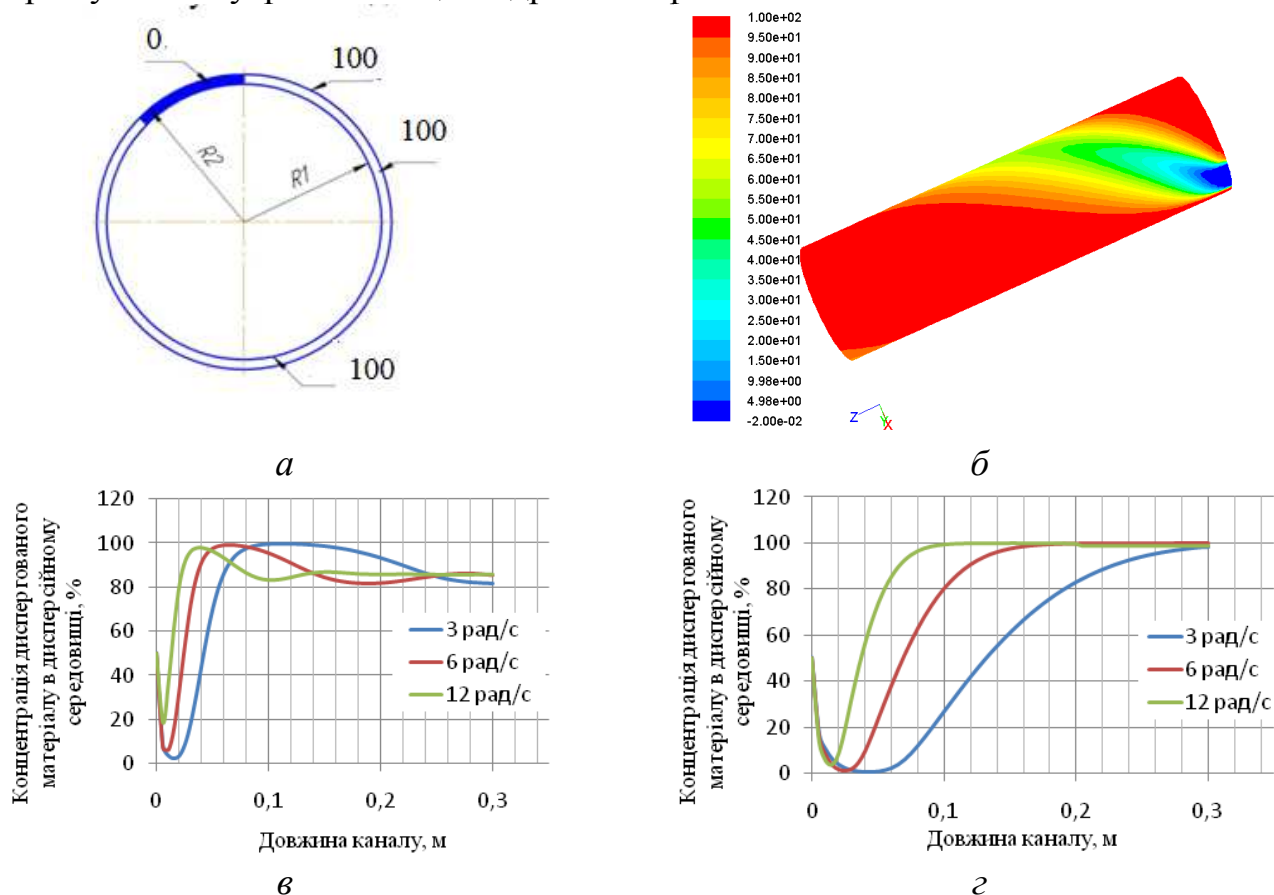
$$\frac{1}{\mu_{\text{сум.}}} = \frac{1}{\mu_1} + \frac{(1-\alpha)}{\mu_2}, \quad (52)$$

де $\mu_{\text{сум.}}$ – в'язкість суміші; μ_1, μ_2 – відповідно в'язкості першого та другого полімеру; α – концентрація від 0 до 1.

Проаналізовано результати моделювання процесу змішування двох полімерів у коаксіальному зазорі з різними величинами обертових швидкостей (рис. 21).

З наведених результатів видно, що найефективніше змішування за умови обертання внутрішнього циліндра, при цьому швидкість усереднення концентрації майже пропорційна швидкості обертання.

Досліджено процес змішування двох полімерів у коаксіальному зазорі між обертовим та нерухомим циліндрами за різних витрат і значень концентрацій полімерних рідин при течії вздовж зазору. У результаті досліджень встановлено, що суміш швидше наближається до ідеального стану в разі введення диспергованого матеріалу біля внутрішнього циліндра та обертанні зовнішнього.

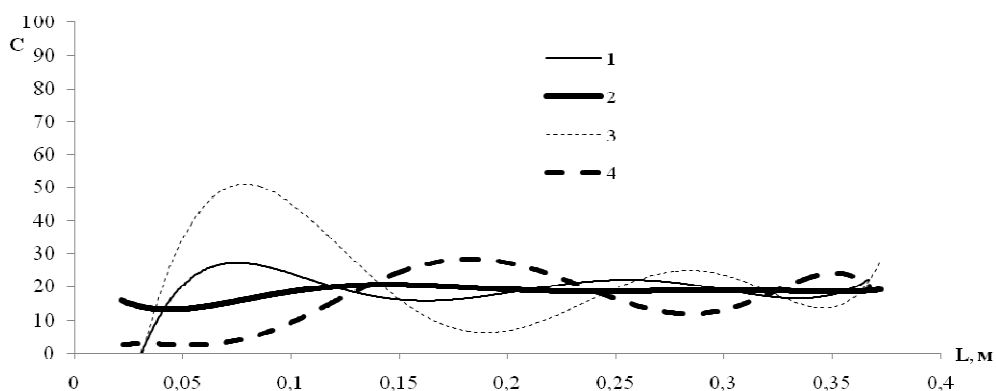


a – схема введення полімерів; *б* – поле розподілу концентрацій; *в* – обертання на внутрішньому циліндрі; *г* – обертання на зовнішньому циліндрі

Рисунок 21 – Результати досліджень зміни концентрації по зовнішній поверхні зазору за різних обертових швидкостей

Також виконано числове дослідження процесу змішування двох полімерів у коаксіальному зазорі залежно від співвідношення їхніх в'язкостей. Встановлено, що найбільш ефективним є змішування за співвідношення в'язкостей компонентів, рівного співвідношенню їхньої кількості. Для кращого змішування в разі, коли диспергований матеріал більш в'язкий, його потрібно вводити біля обертової поверхні. За умови, коли диспергований матеріал менш в'язкий – то біля нерухомої поверхні. У варіанті введення біля обертової поверхні, змішування відбувається кращим чином за умови, що диспергований матеріал більш в'язкий за дисперсійне середовище. Відповідно до цих даних рекомендується введення диспергованого матеріалу залежно від співвідношення в'язкостей.

Здійснено числові експерименти щодо дослідження процесу змішування полімерів у черв'ячному каналі. Результати моделювання доводять, що змішування ефективніше за умови обертового черв'яка із в'язкістю диспергованого матеріалу, більшою в 50–100 разів від дисперсійного (рис. 22).



1 – обертовий циліндр, співвідношення в'язкостей 1:100; 2 – обертовий черв'як, співвідношення в'язкостей 1:100; 3 – обертовий зовнішній циліндр, співвідношення в'язкостей 1:1; 4 – обертовий черв'як, співвідношення в'язкостей 1:1

Рисунок 22 – Розподіл концентрації по довжині зони змішування за різних співвідношень в'язкостей і за різних умов обертання циліндра та черв'яка

В усіх випадках змішування відбувається активніше за умови введення диспергованого матеріалу біля осердя черв'яка.

Таким чином, досліджено закономірності розподілу концентрації диспергованого матеріалу в дисперсійному середовищі за різних чинників. Встановлено ефективні схеми та конструктивні параметри змішувального устаткування.

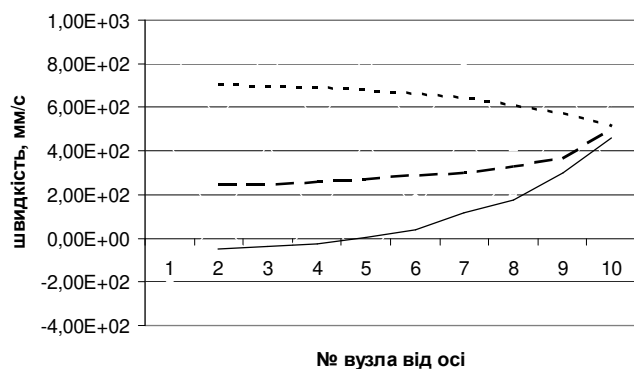
У четвертому розділі наведено результати моделювання формувальних каналів полімерного устаткування з урахуванням деформації його конструктивних елементів і в'язкопружних властивостей полімерів.

Проведено моделювання процесу формування в міжвалковому зазорі черв'ячно-валкового агрегату (ЧВА). Тривимірною моделлю течії гумової суміші 2Р-581 у формувальній зоні черв'ячно-валкового агрегату представляє собою перехід від циліндричного каналу черв'ячної машини до міжвалкового зазору формувальної головки з валками, які обертаються назустріч один одному.

У ході числового моделювання досліджувались просторові поля розподілу тиску і швидкостей течії перероблюваного матеріалу в формувальній зоні з

урахуванням зміни його реологічних властивостей у взаємозалежності з прогином валків. Конфігурація перехідної формувальної зони ЧВА відрізняється від аналогічної інших валкових машин, тому якісна картина процесу формування та прогину валків у ЧВА відрізняється від каландрів і вальців.

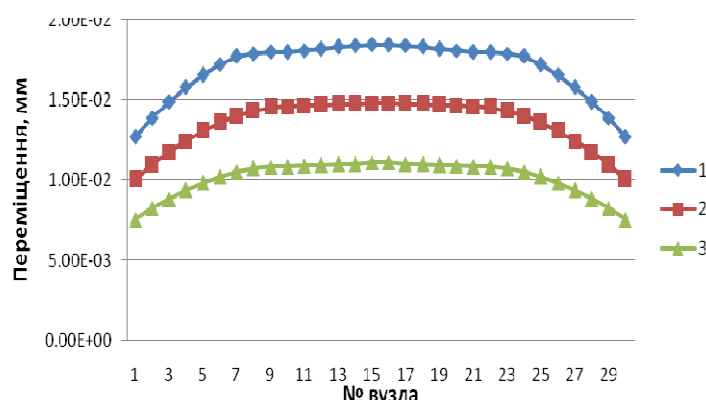
Як приклад, на рис. 23 наведено графіки, які дають змогу проаналізувати розподіл швидкостей течії матеріалу по висоті зазору і з яких можна дослідити розподіл швидкостей по зонах, з початку виникнення протитечії (від'ємні швидкості), а потім швидкості розподіляються в напрямку обертів валків.



1 – зона входу матеріалу;
2 – середній переріз; 3 – при мінімальной висоті зазору

Рисунок 23 – Розподіл швидкостей матеріалу по висоті міжвалкового зазору

Дослідження вказує на те, що початкова температура полімеру мінімально впливає, порядку 5 %, на розподіл швидкостей по висоті зазору.



Водночас, зі зменшенням температури формування величина прогину валків зростає і для даних умов сягає 0,02 мм (рис. 24), що у свою чергу впливає на рівнотовщинність вихідного продукту. Розподіл прогину по довжині відрізняється від каландрів і вальців, що показує необхідність інших засобів компенсації.

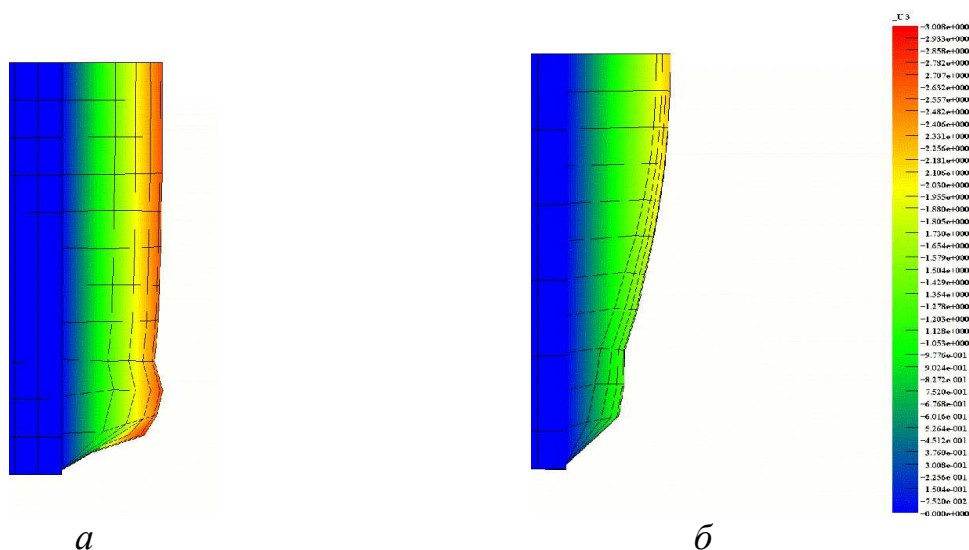
1 – 40 °С ; 2 – 60 °С ; 3 – 80 °С

Рисунок 24 – Прогин робочої частини валка за різних температур гумової суміші в формувальній зоні

Для уточненого моделювання пружної деформації конструктивних елементів устаткування та процесу формування виробів слід враховувати їх взаємний вплив. Графік на рис. 24 вказує на необхідність компенсації прогину валків за початкової температури полімеру 40–60 °С при отриманні плівки товщиною меншою 0,3 мм, щоб різнотовщинність не перевищувала 10 %. Із результатів моделювання випливає, що температуру матеріалу можна підтримувати мінімально необхідною для пластикації та дозування. Це дозволить зменшити енергоємність процесу екструзії. Водночас зі зниженням температури матеріалу в зоні формування тиск підвищується, що збільшує деформацію валків і збільшує різнотовщинність листового виробу.

Дослідження взаємного впливу пружної деформації конструктивних елементів формувального устаткування та параметрів течії полімерного матеріалу в його каналах проводилося на модельній конструкції плоскощільної головки. На рис. 25

показано відмінність між розподілами швидкостей руху поліетилену високої густини на виході з формувальної щілини плоскощільної головки без урахування і з урахуванням пружної деформації її корпусу (показано половину ширини).

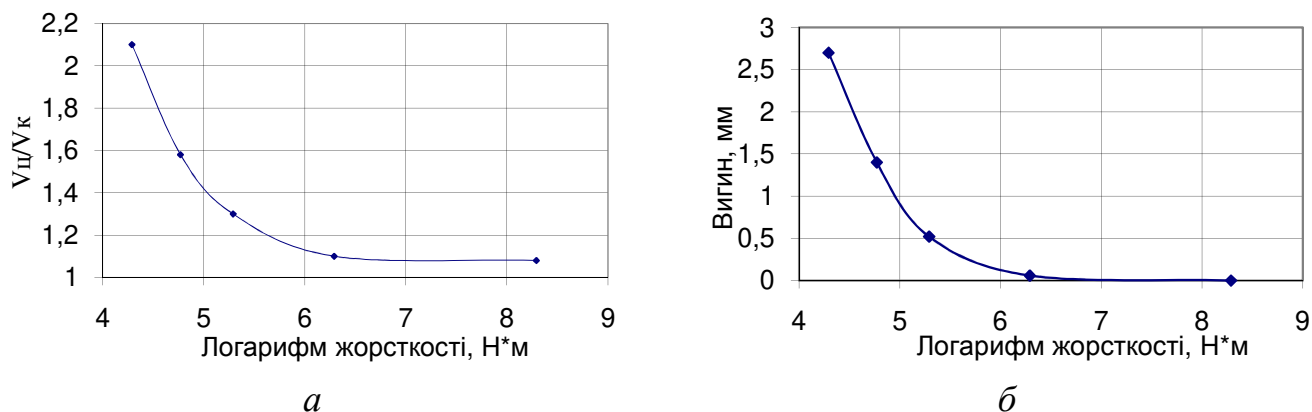


a – без урахування деформації корпусу; *б* – з урахуванням деформації корпусу
Рисунок 25 – Розподіл швидкостей розплаву на виході з головки

Моделювання течії полімеру на виході з головки, в якій формувальні канали спрофільовані без урахування пружної деформації конструктивних елементів, показує майже рівномірний розподіл швидкостей по ширині з невеликим збільшенням по краях. Водночас, моделювання процесу формування з урахуванням деформації головки демонструє, що висота формувальної щілини в центральній зоні збільшується, і як наслідок витрата розплаву в цій зоні перевищує витрати біля країв щілини.

Для дослідження впливу жорсткості конструктивних елементів головки виконано числове моделювання залежності розподілу швидкостей руху розплаву полімеру на виході з формувального каналу від циліндричної жорсткості головки.

Графік співвідношення швидкостей розплаву по центру та біля країв формувальної щілини головки залежно від величини циліндричної жорсткості стінки корпусу головки наведено на рис. 26,*a*, а залежність величини найбільшого прогину стінки головки від її циліндричної жорсткості – на рис. 26,*б*.



a – залежність співвідношення швидкостей розплаву на виході з головки;
б – найбільшого прогину головки

Рисунок 26 – Залежності параметрів головки від циліндричної жорсткості її стінок

Залежності на рис. 26 мають нелінійний характер, оскільки із збільшенням деформації стінок головки відбуваються локальні зміни швидкостей, в'язкостей, тиску і т.д. Після досягнення значення жорсткості понад 6 Н·м величина прогину формувальних конструктивних елементів плоскощільної головки стає незначною і вже майже не впливає на розподіл швидкостей полімеру в каналах.

Запропоновані алгоритми та методика числових розрахунків дають можливість аналізувати параметри течії полімерних матеріалів у формувальних каналах полімерного устаткування з деформівними стінками.

У п'ятому розділі наведено результати моделювання постекструзійних процесів, зокрема в'язкопружної поведінки екструдату після виходу із екструзійної головки з розв'язанням зворотної задачі – коригування геометрії каналів головки, а також охолодження виробів з урахуванням залишкових напружень.

Зазвичай довжину формувальної ділянки головок виконують такою, щоб мінімізувати величину ступеня розбухання і стабілізувати поперечний розмір. Урахування величини та характеру розбухання дозволить скоротити довжину формувальної ділянки та потужності екструдера зі збереженням заданої продуктивності.

Наявні експериментальні дані течії розплавів полімеру в каналах формувальних інструментів вказують на необхідність врахування в'язкопружних властивостей. Однією із реологічних моделей, що добре описує течію полімерів, для яких характерна наявність в'язкопружної поведінки, є модель Фан-Тьєн – Таннера (ФТТ).

Для в'язкопружної моделі ФТТ, тензор екстра-напружень в'язко-пружної компоненти τ_1 обчислюється із співвідношення

$$\exp\left[\frac{\varepsilon\lambda}{\eta_1}\tau_1\right]\tau_1 + \lambda\left[\left(1 - \frac{\xi}{2}\right)\overset{\nabla}{\tau}_1 + \frac{\xi}{2}\overset{\Delta}{\tau}_1\right] = 2\eta_1\mathbf{D} \quad (53)$$

де ξ і ε – матеріальні параметри, які визначають зсувну в'язкість і розширювальну здатність розплаву, відповідно; τ_1 – напруження зсуву; λ – час релаксації; η_1 – динамічна в'язкість; $\overset{\nabla}{\tau}_1$ та $\overset{\Delta}{\tau}_1$ – верхня та нижня конвективні похідні в'язкопружного екстра-напруження за часом відповідно; \mathbf{D} – тензор швидкості деформації. Час релаксації знаходиться з експериментально визначеного часу, за який екструдат набуває 2/3 своєї кінцевої форми після виходу з головки, а параметр ε – з встановлення форми екструдату числовими експериментами до збігу з експериментально визначеною формою стабілізації перерізу потоку екструдату.

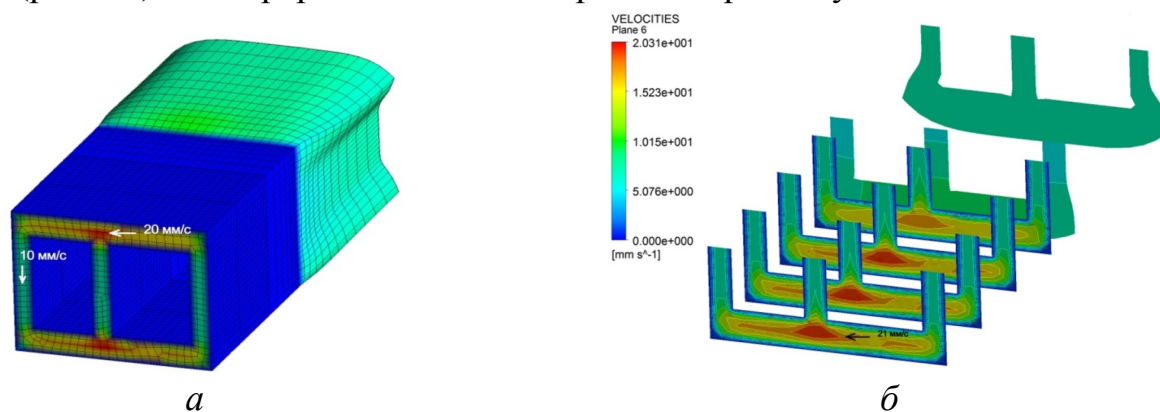
Числовий аналіз напружено-деформованого стану потоку в'язкопружної рідини на виході з формувального отвору проводиться за таких граничних умов:

- 1) на вході в канал задається витрата розплаву;
- 2) на виході екструдату із формувального отвору приймається нульовий градієнт тиску;
- 3) на вільній поверхні екструдату задаються умови рівноваги і нульове значення швидкості розбухання.

З метою встановлення закономірностей в'язкопружного розширення екструдату (відношення його поперечного розміру після стабілізації до розміру формувального каналу) було проведено числове моделювання течії полімеру на виході із формувальних каналів різного характерного перерізу. Як аргумент використовується число Дебори (De), яке являє собою відношення часу релаксації полімеру до

часу проходження ним ділянки формування. Числові дослідження проводились у системі ANSYS Polyflow із експериментально встановленими матеріальними параметрами моделі ФТТ. Були змодельовані профілі наступної геометрії: трубчастий, суцільний круглий, порожнистий квадратний, прямокутний. Як перероблюваний матеріал приймалась композиція полівінілхлориду марки SorVyl (Німеччина).

Були проведені числові дослідження екструзії реального двокамерного порожнистого профілю прямокутного перерізу 40×50 мм з внутрішнім ребром завтовшки 5 мм. Оскільки головка симетрична, моделюється лише половина формувального каналу (рис. 27). Як перероблюваний матеріал використовується поліетилен.



a – конфігурація формувального каналу та форма екструдату; *б* – розподіл швидкостей в різних перерізах формувального каналу і вільної ділянки екструдату
Рисунок 27 – Розподіл швидкостей та форми екструдату

У результаті моделювання отримано наведену на рис. 27,*a* конфігурацію порожнистого профілю. Неправильна форма отриманого виробу обумовлена утворенням локальних ділянок непостійного тиску і швидкості течії потоку на виході із формувального каналу головки. Різниця локальної товщини обумовлена неоднорідністю витрат потоку полімеру по товщині перерізу (до 20 мм/с), після виходу із каналу, що показано на рис. 27,*б*.

Для усунення вказаних спотворень форми розроблено методику та алгоритм модифікування форми каналу, який дає змогу проводити коригування геометрії формувальних каналів головок по заданих розмірах зекструдованих виробів. Цільовий профіль задається як форма екструдату в напрямку течії. Завдання розрахунку полягає у визначенні необхідної геометрії формувального каналу головки на виході, яка визначає вирівнювання швидкостей розплаву в області вільної поверхні і задану форму перерізу полімерного профілю.

Для застосування алгоритму задача полягає в зведенні до мінімуму функції

$$\Phi(X) = F(X) + f(X) \quad (54)$$

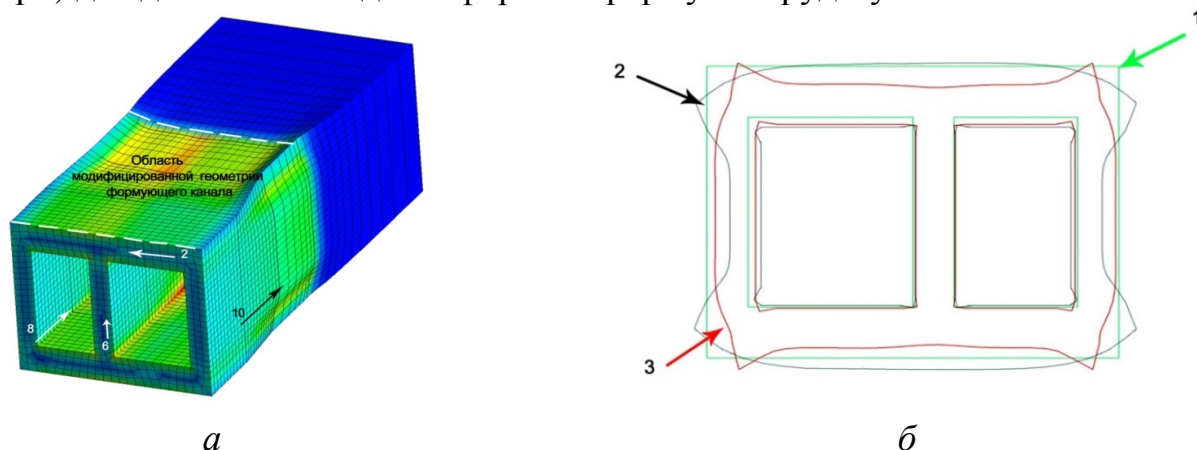
де $\Phi(X)$ – псевдо-цільова функція геометрії цільового профілю, $F(X)$ – геометричні параметри, які не підлягають змінню, $f(X)$ – штрафна функція відхилення геометрії профілю від заданого, X – набір геометричних параметрів головки.

Штрафна функція $f(X)$ розраховується з використанням ітераційного методу збільшення множників Лагранжа. Для обчислення оберненої задачі проектування каналів головки реалізовано алгоритм Флетчера-Рівса (ФР), який є ітераційним процесом визначення геометрії каналів головки X для забезпечення заданої форми

зекструдованого профілю $\Phi(X)$ шляхом мінімізації функції $f(X)$.

Для того, щоб отримати задану остаточну форму екструдату, програма дає змогу методом ітерацій змінювати геометрію формувального каналу. Результати такого моделювання наведено на рис. 28.

Запропонована методика моделювання й проєктування дає змогу визначати необхідну конфігурацію екструзійної головки і зокрема її випускного отвору (фільтери) для досягнення заданої форми перерізу екструдату після його стабілізації.



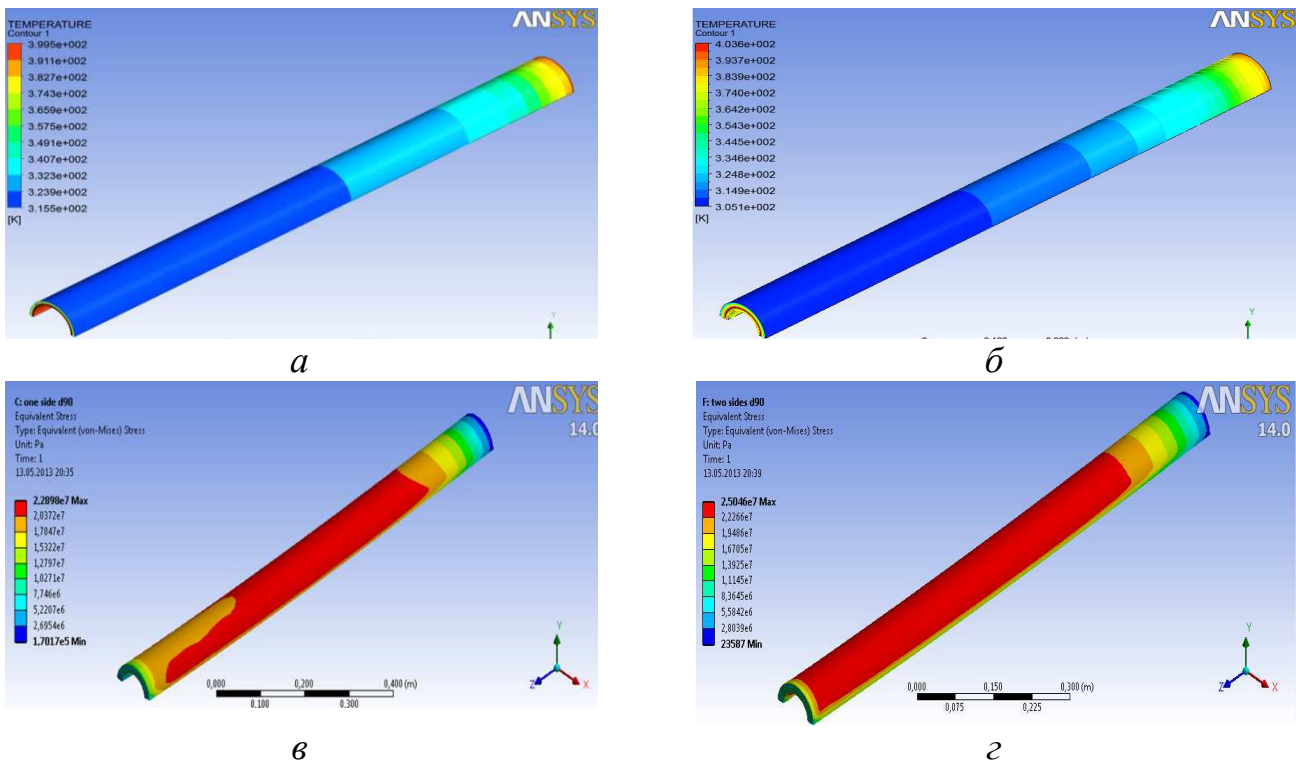
a – конфігурація формувального каналу та форма екструдату; *б* – поперечні перерізи формувального каналу головки неоптимізованої та оптимізованої форми
 1 – задана цільова форма перерізу профілю; 2 – некоригована форма перерізу профілю кінцевого виробу; 3 – необхідна конфігурація перерізу фільтери
 Рисунок 28 – Розподіл локальної швидкості зсуву і швидкості екструдату з оптимізованою геометрією каналу

Здійснено моделювання напружено-деформованого стану зекструдованих полімерних труб. Полімерна труба формується з розплаву, який проходить крізь формувальну головку з подальшим охолодженням у водяних ваннах. Ефективність охолодження оцінюється по температурі зовнішньої поверхні стінки труби після охолоджувальної ванни і розподілу технологічних напружень. Для визначення найбільш ефективного способу охолодження було проведено низку розрахунків. При односторонньому охолодженні водою розподіл температур був нерівномірний і час охолодження був великий. При двосторонньому охолодженні час скорочувався майже вдвічі, але при цьому виникали великі технологічні напруження (рис. 29).

Більш ефективним способом двостороннього охолодження труб малого діаметра (до 90 мм включно) є комбіноване (зовнішнє водяне і внутрішнє повітряне) охолодження. Також встановлено, що застосування двостороннього охолодження дає змогу поліпшити якість внутрішньої поверхні труб.

Отримані дані дають змогу прогнозувати величину й характер деформації формувальних елементів та врахувати її вплив на деформування виробу, що виготовляється. Запропонована методика проєктування, яка дає змогу визначати необхідну конфігурацію екструзійної головки для досягнення заданої форми екструдату.

Отриманий розподіл технологічних напружень по довжині труби за різних режимів охолодження обґрунтовує встановлення найбільш ефективною схеми процесу.



a – розподіл температур, одностороннє охолодження; *б* – розподіл температур, комбіноване охолодження; *в* – розподіл напружень, одностороннє охолодження; *г* – розподіл напружень, комбіноване охолодження

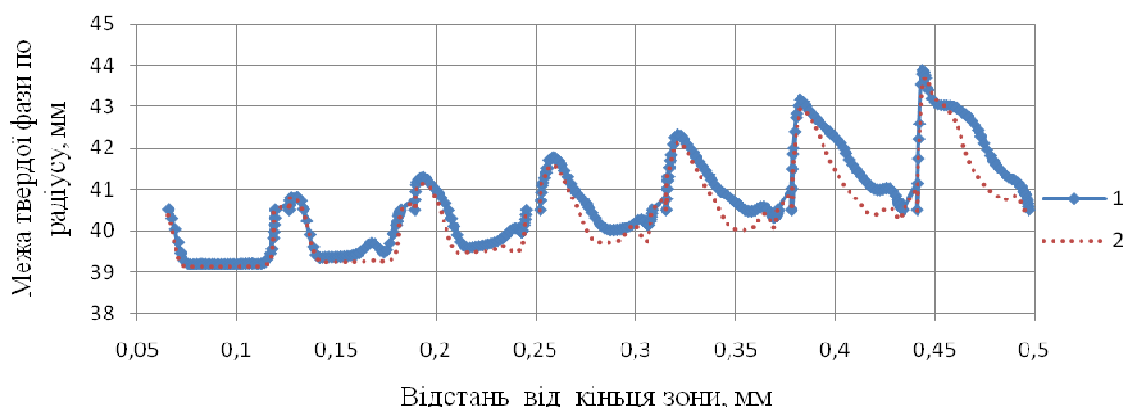
Рисунок 29 – Розподіл температур і напружень по довжині труби

Шостий розділ присвячений експериментальним дослідженням процесу плавлення гранульованих термопластів і формування екструдованих виробів.

Для дослідження динаміки процесу плавлення була зібрана експериментальна установка на базі віскозиметра типу «конус–площина». Під час проведення експерименту нагрівалася ємність, у яку завантажувались гранули полімеру, після чого ємність стискалася із постійним зусиллям, а полімер піддавався певній швидкості зсуву за допомогою ротора. При цьому фіксувалися такі параметри: зміна об'єму гранульованого полімеру, швидкість обертання ротора, та споживана потужність. Експерименти показали, що за виключенням початкового періоду об'єм гранул різних полімерів з часом зменшується майже лінійно.

Також для підтвердження розроблених моделей проведено експериментальні дослідження процесу плавлення термопластів у черв'ячному каналі екструдера. Попередньо перероблюваний гранульований полімер опудрювався пігментом контрастного до нього кольору. Екструдер виводився на стаціонарний режим роботи, після цього зупинявся, головка швидко знімалася, а черв'як виймався. Гранули, що не розплавившись, при цьому осипались, а на черв'яку залишався лише той матеріал, що піддався плавленню. Після зняття полімерної спіралі з черв'яка, від неї на кожному витку вирізався тонкий зразок. Полімер, що повністю перейшов у фазу розплаву, змішувався з пігментом. Відповідно, полімер, що лише почав плавитись, відрізнявся від розплаву більш інтенсивним кольором пігменту, оскільки він залишався на поверхні гранул. У результаті описаних операцій фіксувалась форма та площа перерізу полімерної пробки й перехідної області розм'якшених гранул, а також довжина зони плавлення. Так, на рис. 30 показано порівняння експеримен-

тально визначених та промодельованих конфігурацій твердої пробки на різних відстані від кінця зони плавлення.



1 – розрахункова конфігурація; 2 – експериментальна конфігурація
Рисунок 30 – конфігурація пробки на різних відстанях від кінця зони плавлення

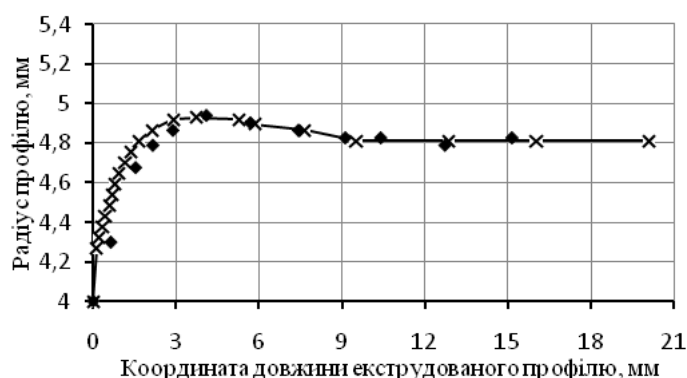
З показаного графіку видно, що відмінності між експериментально визначеними та промодельованими конфігураціями пробки незначні, особливо в кінці зони плавлення, що дає можливість встановити довжину зони плавлення, тобто координату закінчення процесу плавлення та переходу до зони гомогенізації.

Для проведення експериментів з дослідження параметрів в'язкопружної моделі ФТТ було розроблено схему експерименту, вдосконалено експериментальну установку і розроблено методику проведення експерименту на основі фотофіксації форми ділянки екструдату, що виходить із формувального пристрою. У результаті експериментів встановлено параметри ξ і ϵ моделі ФТТ для різних полімерів.

Дослідження реологічних параметрів проводилось для таких матеріалів:

- поліетилен низької густини (ПЕНГ) марки 15803-020 (ГОСТ 16337);
- полістирол (ПС) марки ПС-115 (ГОСТ 20282);
- композиція полівінілхлориду (ПВХ) марки SorVyl (Німеччина).

Приклад відповідності результатів числового моделювання отриманим експериментальним даним ПВХ марки SorVyl за швидкості екструзії $V = 0,066$ м/с наведено на рис. 31.



◆ – експериментальні дані; × – результат числового моделювання
Рисунок 31 – Залежність зміни радіуса екструдату круглого перерізу ПВХ марки SorVyl на виході з формувального каналу

Розмір перерізу на виході співпадає з розрахунковим у межах 1 %.

Результати експериментальних досліджень дозволили встановити в'язкопружні параметри полімерів та підтвердити результати моделювання.

У цьому розділі наведено результати впроваджень і технічних рекомендацій до реалізації в промисловості та проектуванні екструзійного обладнання,

новизну і промислову придатність яких підтверджено патентними документами.

Розроблено та виготовлено установки для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя та коефіцієнта бічного тиску сипкого матеріалу. Установки впроваджено в навчальний процес кафедри ХПСМ. Відповідні технічні рішення захищено патентами України на корисну модель № 107473 та № 124170.

На виробничій базі ТОВ «Науково-виробниче підприємство «Енергія-2000» (м. Київ) здійснено дослідно-промислове впровадження технічних рекомендацій з конструктивного оформлення та уточненого розрахунку змішувального пристрою, на який оформлено патент України на корисну модель № 93215.

Коливання швидкості та перерізу екструдату, які спричинені в'язкопружними властивостями полімеру, є поширеною проблемою процесу екструзії. Для усунення цих явищ було запропоновано та запатентовано черв'як екструдера, в якому забезпечується ефективна компенсація коливань тиску та швидкості розплаву. Технічне рішення захищено патентом України на корисну модель № 93385.

В запропонованих конструкціях екструзійних головок за патентами України на корисну модель № 31538, № 82157 та № 82205 вдосконалення забезпечує вирівнювання гідравлічного опору та умов течії полімерного матеріалу по всьому перерізу.

У додатках наведено розрахунки похибок експериментальних досліджень та акти впровадження.

ВИСНОВКИ

Головний результат дисертації – вирішення важливої науково-технічної проблеми створення наукових засад розробки та вдосконалення обладнання і процесів комплексного екструзійного перероблення термопластичних матеріалів, які забезпечують визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів ліній на базі черв'ячних екструдерів, що сприятиме заощадженню енергетичних і матеріальних ресурсів та одержанню продукції високої якості.

1. Розроблено уточнені математичні моделі неізотермічного тривимірного руху реологічно складних середовищ у каналах довільної форми з рухомими й нерухомими елементами із врахуванням пристінних ефектів.

2. Реалізація розробленої фізичної моделі на базі систем гідродинамічного моделювання показала можливість коректного завдання розрахункової схеми та інтерпретації отриманих результатів засобами цих систем і дала змогу отримати науково обґрунтовані параметри процесу плавлення полімеру в черв'ячному каналі і конструктивних параметрів зони плавлення. При цьому отримано пояснення відомих на практиці ефектів, що не вкладаються в рамки моделей, запропонованих іншими дослідниками.

3. Розроблені принципово нові фізичні і математичні моделі плавлення полімеру в каналі екструдера, сутність яких полягає в тому, що процес плавлення поділяється на два етапи: спочатку, за рахунок бародифузії розплаву, руйнується поверхневий шар твердої пробки, який переходить у шар текучої суміші з твердої й рідкої фаз, а потім під дією дисипативного тепла відбувається плавлення твердої частини в об'ємі суміші. Вказані моделі дають змогу точніше прогнозувати кінетику плавлення та обґрунтовувати конструктивні параметри зони плавлення.

4. Проведена адаптація розроблених моделей для уточненого визначення полів

розподілу швидкості, температури, тиску, деформації та інших параметрів у процесах підготовки та формування полімерних виробів з урахуванням пристінних ефектів зміни в'язкості, проковзування, дисипації тощо. Це дає змогу розраховувати та оптимізувати основні параметри технологічних процесів формування полімерних виробів.

5. На основі розроблених моделей виконано розрахунки зони плавлення екструдера і виявлено особливості температурного поля, поля швидкостей, розподілу величини в'язкості і процесу плавлення твердої пробки полімеру. Досліджено еволюцію процесів руйнування та плавлення пробки гранул і виявлено основні чинники, що суттєво впливають на ці процеси. Встановлено ефекти, що не враховується багатьма існуючими моделями процесу плавлення полімерів.

6. Розроблено методику визначення якості суміші, яка полягає в безпосередньому використанні рівнянь масопереносу. Це дає можливість моделювання процесу змішування на тій самій математичній базі, що й інші процеси екструзії.

8. Досліджено закономірності розподілу концентрації диспергованого матеріалу в дисперсійному середовищі за різних чинників. Встановлено ефективні схеми та конструктивні параметри змішувального устаткування.

9. Запропоновано та апробовано алгоритми та методику числових розрахунків, які дають можливість аналізувати картини течії полімерних матеріалів у формувальних каналах полімерного устаткування з деформівними стінками.

10. Отримані дані дають змогу прогнозувати величину й характер деформації формувальних елементів та врахувати її вплив на спотворення форми виробу, що формується. Проведені уточнені числові експерименти дозволили сформулювати рекомендації для розробників та експлуатаційників полімерного обладнання.

11. Запропоновано методику моделювання й проектування екструзійних головок, яка дає змогу визначати необхідну конфігурацію екструзійної головки і зокрема її випускного отвору (фільери) для досягнення заданої форми перерізу екструдату після його стабілізації.

12. Отриманий розподіл технологічних напружень по довжині труби за різних режимів процесу охолодження дав змогу встановити, що найбільш ефективним з точки зору «інтенсивність охолодження – технологічні напруження» є двостороннє комбіноване охолодження (зовнішнє – вода, внутрішнє – повітря).

13. У результаті експериментальних досліджень, а також порівняння одержаних результатів з результатами інших дослідників отримано підтвердження адекватності розроблених математичних моделей. Відхилення результатів розрахунків та експериментів для різних процесів не перевищує 8–15 %.

14. Результати роботи впроваджені в практику проектування та експлуатації обладнання для екструзійного перероблення термопластичних матеріалів. У ряді організацій впроваджено методики з вдосконалення принципів схем, конструктивного оформлення, а також результати розрахунку параметрів зазначеного обладнання і режимів його роботи. Результати досліджень використано в навчальному процесі кафедри хімічного, полімерного і силікатного машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського.

ОСНОВНІ ОПУБЛІКОВАНІ ПРАЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Сівецький В. І., Сідоров Д. Е., **Сокольський О. Л.** Комп'ютерне моделювання та проектування екструзійного полімерного устаткування : монографія Київ : НТУУ "КПІ", 2006. 174 с. *(Здобувачем чисельно реалізовані математичні моделі формування виробів методом екструзії та визначення конструктивних параметрів обладнання)*
2. Моделювання задач гідропружності в процесах формування полімерних виробів : монографія / О. С. Сахаров, В. І. Сівецький, **О. Л. Сокольський**, І. О. Мікульонок. Київ : НТУУ "КПІ", 2009. 106 с. *(Здобувачем виконано числове моделювання тривимірної течії розплаву полімерів із врахуванням деформації формувальних конструктивних елементів, проведено аналіз та узагальнення результатів)*
3. Пристінні ефекти в процесах переробки полімерних матеріалів : монографія / В. І. Сівецький, О. С. Сахаров, **О. Л. Сокольський**, Д. Д. Рябінін. Київ : НТУУ КПІ, 2009. 140 с. *(Здобувачем запропоновано методикау врахування пристінної швидкості в процесах течії полімерів у робочих каналах, виконано аналіз результатів розрахунків)*
4. Сахаров О. С., Сівецький В. І., **Сокольський О. Л.** Моделювання процесів плавлення та гомогенізації полімерних композицій в черв'ячному устаткуванні : монографія. Київ : ВП «Едельвейс», 2012. 120 с. *(Здобувачем розроблено фізичну модель та чисельно реалізовані математичні моделі плавлення та гомогенізації полімерів)*
5. Пристінні ефекти в процесах течії полімерів у каналах переробного обладнання : монографія / І. І. Івницький, **О. Л. Сокольський**, І. О. Мікульонок. Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2016. 136 с. *(Здобувачем запропоновано методикау врахування різного походження пристінної швидкості в процесах течії полімерів у робочих каналах, сформульовано висновки)*
6. Коваленко К. Г., **Сокольський О. Л.**, Сівецький В. І. Екструзійне формування полімерних погонажних виробів з урахуванням в'язкопружних властивостей : монографія. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 108 с. *(Здобувачем запропоновано методикау врахування в'язкопружних властивостей полімерів на виході з екструзійної головки, виконано аналіз результатів розрахунків)*
7. **Sokolskiy O. L.**, Ivitskiy I. I. Analysis of approaches to simulation of mixing processes in equipment for polymer processing // General and complex problems of technical sciences: experience of EU countries and implementation in the practice of Ukraine : Collective monograph. Riga : Izdevnieciba "Baltija Publishing", 2019. P. 264 – 282 *(Здобувачем обґрунтовано ефективність застосування положень механіки суцільних середовищ у моделюванні процесів змішування)*

Статті в наукових фахових виданнях:

8. Modeling the mixing of polymeric composites in an extrusion drum mixer / A. S. Sakharov, A. E. Kolosov, **A. L. Sokolskii**, V. I. Sivetskii // Chemical and Petroleum Engineering. March 2012. Volume 47. No. 11–12. P. 799–805. DOI: 10.1007/s10556-012-9553-z (Іноземне видання, входить до наукометричних баз Scopus, Chemical Abstracts) *(Здобувачем чисельно реалізовано математичну модель змішування полімерів)*
9. Modeling of Polymer Melting Processes in Screw Extruder Channels / A. S. Sakharov, A. E. Kolosov, **A. L. Sokolskii**, V. I. Sivetskii // Chemical and Petroleum Engineering. September 2013. Vol. 49. Issue 5–6. P. 357–363. DOI: 10.1007/s10556-013-

9755-z (Іноземне видання, входить до наукометричних баз Scopus, Chemical Abstracts) *(Здобувачем чисельно реалізовано математичну модель плавлення полімерів)*

10. Design of an Extrusion Die for Plastic Profiles / K. G. Kovalenko, V. I. Sivetskii, **A. L. Sokol'skii** // Chemical and Petroleum Engineering. January 2014. Vol. 49. Issue 9. P. 675–678. DOI: 10.1007/s10556-014-9817-x. (Іноземне видання, входить до наукометричних баз Scopus, Chemical Abstracts). *(Здобувачем запропоновано методику визначення необхідної геометрії формуючого каналу головки для забезпечення цільової геометрії виробу)*

11. Modelling of polymer melting in screw extruder channels / M. S. Kushnir, V. I. Sivetskii, **A. L. Sokol'skii**, K. G. Kovalenko // Chemical and Petroleum Engineering. 2014. Vol. 49, Issue 11. P. 742–747. DOI: 10.1007/s10556-014-9828-7. (Іноземне видання, входить до наукометричних баз Scopus, Chemical Abstracts) *(Здобувачем чисельно реалізовано математичну модель плавлення полімерів)*

12. Improvement of the technology of thermal gluing by a melt of polymer additive material / **O. L. Sokolskyi**, A. Ya. Karvatskii, I. O. Mikulionok, Yu. Yu. Herasimenko // Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii. 2018. N. 5. P. 154–160. (Входить до наукометричної бази Scopus). *(Здобувачем сформульовано проблему, зазначену математичну модель розрахунку, сформульовано висновки)*

13. Ivitskiy I. I., **Sokolskii A. L.**, Mikulionok I. O. Influence of a lubricant on the flow parameters of a molten polymeric material in channels of forming devices // Chemical and Petroleum Engineering. May 2017. Vol. 53. N. 1–2. P. 84–88. DOI: 10.1007/s10556-017-0299-5. (Іноземне видання, входить до наукометричних баз Scopus, Chemical Abstracts). *(Здобувачем сформульовано проблему, зазначену математичну модель течії полімерів з урахуванням пристінного шару)*

14. Realization of the reverse problem of geometrical modeling in designing of die heads for the production of polymer products / **A. L. Sokolskii**, K. G. Kovalenko, V. I. Sivetskii, E. P. Kolosova // Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii. 2018. N 2. P. 109–114. (Входить до наукометричної бази Scopus). *(Здобувачем запропоновано математична модель визначення необхідної геометрії формуючого каналу головки для забезпечення цільової геометрії виробу)*

15. Pressure and temperature influence on the friction coefficient of granular polymeric materials on the metal surfaces / V. Vytvytskyi, I. Mikulionok, **O. Sokolskyi**, O. Gavva // Ukrainian Food Journal. 2017. Vol. 6. Issue 3. P. 543–552. (Входить до наукометричної бази Web of Science) *(Здобувачем запропоновано методику експериментальних досліджень, зроблено висновки)*

16. Sakharov A. S., Sivetskii V. I., **Sokolskii A. L.** Extrusion molding of polymers with allowance for near-wall slip // Chemical and Petroleum Engineering. July 2011. Vol. 47. N. 3–4. P. 231–237 (Іноземне видання) *(Здобувачем чисельно реалізовано математичну модель течії полімерів з урахуванням пристінного проковзування)*

17. Сахаров О. С., Сівецький В. І., **Сокольський О. Л.** Дискретні математичні моделі для розрахунку пружнов'язкопластичних середовищ із змінною стисливістю при термосилових навантаженнях // Наукові вісті КПІ. 2008. № 6. С. 74–82. *(Здобувачем чисельно реалізовано математичну модель формування полімерів при термосилових навантаженнях)*

18. Чисельне моделювання течії в'язкопластичних середовищ з урахуванням

пружності конструктивних елементів обладнання / О. С. Сахаров, В. І. Сівецький, **О. Л. Сокольський**, В. Ю. Щербина // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Машинобудування». 2009. № 55. С. 71–82. *(Здобувачем запропоновано критерії оцінювання жорсткості конструктивних елементів, зроблено висновки)*

19. Моделирование процесса смешения полимерных композиций в экструзионном смесителе барьерного типа / А. С. Сахаров, А. Е. Колосов, **А. Л. Сокольский**, В. И. Сивецкий // Химическое и нефтегазовое машиностроение (Москва). 2011. № 12. С. 3–7. (Іноземне видання) *(Здобувачем чисельно реалізовано математичну модель змішування полімерів)*

20. Моделювання плавлення полімеру в каналі черв'ячного екструдера / О. С. Сахаров, В. І. Сівецький, **О. Л. Сокольський**, М. С. Кушнір, І. І. Івіцький, В. О. Олексішен // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». № 1. 2012. С. 60–63. *(Здобувачем сформульовано проблему, розроблено математичну модель)*

21. Математичне моделювання процесу змішування в коаксіальному зазорі / О. С. Сахаров, В. І. Сівецький, **О. Л. Сокольський**, М. С. Кушнір, С. В. Бех // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. № 2/5 (56). С. 47–50. *(Здобувачем сформульовано проблему, розроблено математичну модель)*

22. Модели процессов плавления полимеров в каналах червячных машин / А. С. Сахаров, А. Е. Колосов, В. И. Сивецкий, **А. Л. Сокольский** // Химическое и нефтяное машиностроение (Москва). 2013. № 6. С. 3–7. (Іноземне видання) *(Здобувачем чисельно реалізовано математичну модель плавлення полімеру в каналі)*

23. Моделювання гідродинаміки та гомогенізації полімерних композицій в динамічному змішувачі екструдера / В. І. Сівецький, **О. Л. Сокольський**, М. С. Кушнір, О. В. Рослов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». 2013. № 26 (999). С. 88–92. *(Здобувачем сформульовано проблему, розроблено математичну модель гомогенізації)*

24. Числове моделювання впливу пристінного шару на процес течії полімеру в переробному обладнанні / **О. Л. Сокольський**, І. І. Івіцький, В. І. Сівецький, І. О. Мікульонюк // Хімічна промисловість України. 2013. № 6 (119). С. 34–37. *(Здобувачем сформульовано проблему, розроблено математичну модель, сформульовано висновки)*

25. Методика розв'язання оберненої задачі екструзійного формування термопластів / К. Г. Коваленко, В. І. Сівецький, **О. Л. Сокольський**, І. О. Мікульонюк // Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов. 2013. № 4 (37). С. 177–183. *(Здобувачем запропоновано методику визначення необхідної геометрії формуючого каналу головки для забезпечення цільової геометрії виробу)*

26. Коваленко К. Г., Сивецкий В. И., **Сокольский А. Л.** Проектирование экструзионного формующего инструмента для пластикового профиля // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2013. № 10. С. 25–27. (Іноземне видання) *(Здобувачем запропоновано методику визначення геометрії формуючого каналу головки, зроблені висновки)*

27. Моделирование процесса течения расплава полимера при выходе из формующего инструмента экструдера / К. Г. Коваленко, А. Е. Колосов, В. И. Сивецкий, **А. Л. Сокольский** // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2013. № 12. С. 15–19. (Іноземне видання) *(Здобувачем сформульовано проблему, розроблено математичну модель, сформульовано висновки)*

28. Моделирование процесса плавления полимеров в каналах червячных экструдеров / М. С. Кушнир, В. И. Сивецкий, **А. Л. Сокольский**, К. Г. Коваленко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2013. № 11. С. 29–33. (Іноземне видання) *(Здобувачем розроблено фізичну модель та чисельно реалізована математична модель плавлення полімерів)*

29. **Сокольський О. Л.** Вплив конструктивних і технологічних параметрів процесу формування термопластів на якість екструдованої продукції // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2014. № 1. С. 40–44.

30. Дослідження реологічних властивостей полімерних матеріалів у каналах екструзійної головки / К. Г. Коваленко, В. І. Сівецький, **О. Л. Сокольський**, І. О. Мікульонок // Хімічна промисловість України. 2014. № 3. С. 54–58. *(Здобувачем розроблено методику врахування впливу в'язкопружних параметрів полімерів і технологічних напружень на зміну заданої геометрії формуючих каналів)*

31. Визначення в'язкості пристінного шару у формуючих каналах обладнання для переробки полімерів / **О. Л. Сокольський**, І. І. Івіцький, В. І. Сівецький, І. О. Мікульонок // Наукові вісті КПП. 2014. № 2. С. 66–69. *(Здобувачем сформульовано проблему, розроблено математичну модель, сформульовано висновки)*

32. Мікульонок І. О., **Сокольський О. Л.**, Соколенко В. В. Інтенсифікація охолодження накладеної на жили кабельних виробів полімерної або гумової ізоляції // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2014. № 2 (13). С. 28–36. *(Здобувачем сформульовано проблему, запропоновано конструктивне рішення).*

33. Дослідження термомеханічного стану охолоджуваних полімерних труб / І. О. Крутась, І. О. Мікульонок, А. Д. Петухов, **О. Л. Сокольський** // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2013. № 1 (11). с. 35–40 *(Здобувачем чисельно реалізовано математичні моделі для визначення температури)*

34. Порівняльний аналіз ефективності стабілізації тиску із застосуванням регульованого і нерегульованого електропривода екструдера / О. М. Халімовський, **О. Л. Сокольський**, В. І. Сівецький, І. О. Мікульонок, А. А. Ніколаєв // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2016. № 2. С. 80–83. *(Здобувачем сформульовано проблему, запропоновано конструктивне рішення)*

35. Івіцький І. І., **Сокольський О. Л.** Експериментальні дослідження процесу плавлення полімеру // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 29 (68). № 3. 2018. С. 14–19 *(Здобувачем сформульовано проблему, розроблено методику та обладнання для проведення досліджень)*

Статті в інших виданнях:

36. Сахаров О. С., Сівецький В. І., **Сокольський О. Л.** Розроблення скінченно-елементної математичної моделі пружнов'язкопластичних середовищ із змінною стисливістю при термосилових навантаженнях. // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2008. № 2. С. 16–27. *(Здобувачем чисельно реалізовано математичну модель формування пружнов'язкопластичних полімерів)*

37. Формування полімерних матеріалів. Дослідження впливу геометричних параметрів каналів обладнання на величину пристінних ефектів / І.І. Івіцький, **О.Л. Сокольський**, І.О. Мікульонок, В.І. Сівецький // Хімічна промисловість України. 2015. № 4. С. 41–44. *(Здобувачем сформульована основна проблема, визначена методика для проведення досліджень)*

38. Мікульонок І. О., **Сокольський О. Л.**, Витвицький В. М. Гранульовані полімерні матеріали. Експериментальне дослідження коефіцієнта тертя по металевій поверхні // Хімічна промисловість України. 2016. № 2. С. 41–44. *(Здобувачем запропонована методика експериментальних досліджень, зроблено висновки)*

Патенти

39. Патент № 31538 Україна, МПК В29С 47/14. Плоскощільна екструзійна головка / Сівецький В. І., **Сокольський О. Л.**, Півненко С. В. – u№ 200714324; заявл. 19.12.2007, опубл. 10.04.08, Бюл. № 7. *(Здобувачем запропоновано конструкцію, виконано розрахунок, що підтверджує її дієздатність)*

40. Патент № 82157 Україна, МПК В29С 47/14. Головка екструзійна / Сівецький В. І., Рослов О. В., **Сокольський О. Л.**, Коваленко К. Г., Івіцький І. І. – u№ 201300518; заявл. 15.01.2013; опубл. 25.07.2013, Бюл. № 14. *(Здобувачем сформульовано проблему та запропоновано конструкцію)*

41. Патент № 82205 Україна, МПК В29С 47/14. Головка екструзійна / Сівецький В. І., Рослов О. В., **Сокольський О. Л.**, Коваленко К. Г., Івіцький І. І. – u№ 201300518; заявл. 15.01.2013; опубл. 25.07.2013, Бюл. № 14. *(Здобувачем сформульовано проблему та запропоновано конструкцію)*

42. Патент № 93215 Україна, МПК В29С 47/38. Змішувальна секція черв'ячного екструдера / Мікульонок І. О., **Сокольський О. Л.** – u№ 201403163; заявл. 28.03.2014, опубл. 25.09.2014, Бюл. № 18. *(Здобувачем сформульовано проблему та запропоновано конструктивну схему)*

43. Патент № 93385 Україна, МПК В29И 17/00. Черв'як екструдера / Мікульонок І. О., **Сокольський О. Л.**, Федченко Є. О. – u№ 201404917; заявл. 08.05.2014, опубл. 25.09.2014, Бюл. № 18. *(Здобувачем запропоновано конструктивну схему)*

44. Патент № 102908 Україна, МПК (2006.01) В29С 47/60. Черв'як екструдера / **Сокольський О. Л.**, Мікульонок І. О., Івіцький І. І. – u201504969, заявл. 21.05.2015; опубл. 25.11.2015, Бюл. № 22. *(Здобувачем запропоновано загальну ідею конструкції)*

45. Патент № 101451 Україна, МПК (2006.01) Н01В 13/14. Спосіб виготовлення кабельного виробу / Мікульонок І. О., **Сокольський О. Л.**, Соколенко В. В. – u201503098, заявл. 03.04.2015; опубл. 10.09.2015, Бюл. № 17. *(Здобувачем сформульовано проблему та розрахунками підтверджено працездатність)*

46. Патент № 107473 Україна, МПК (2006.01) G01N 19/02. Установка для

визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя кускового або сипучого матеріалу / **Сокольський О. Л.**, Мікульонок І. О., Швачко Д. Г., Витвицький В. М. – u201511736, заявл. 27.11.2015; опубл. 10.06.2016, Бюл. № 11. *(Здобувачем сформульовано проблему та запропоновано конструктивну схему)*

47. Патент № 124170 Україна, МПК (2006.01) G01N 19/02. Пристрій для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя сипкого матеріалу / Мікульонок І. О., **Сокольський О. Л.**, Витвицький В. М., Швачко Д. Г. – u201710073, заявл. 18.10.2017; опубл. 26.03.2018, Бюл. № 6. *(Здобувачем сформульовано проблему та запропоновано конструкцію вимірювальної частини)*

Тези доповідей

48. Математичне моделювання процесу змішування в коаксіальному зазорі / С. В. Бех, М. С. Кушнір, **О. Л. Сокольський**, О. С. Сахаров, В. І. Сівецький. Математичне моделювання процесу змішування в коаксіальному зазорі // Збірка матеріалів VI Міжнародної науково-технічної WEB-конференції «Композиційні матеріали». Київ : 2012. С. 158–159. *(Здобувачем чисельно реалізовано математичну модель змішування, виконано аналіз результатів)*

49. Численное моделирование влияния пристенного слоя на процесс течения полимера в перерабатывающем оборудовании / В. І. Сівецький, І. О. Мікульонок, **О. Л. Сокольський**, І. І. Івіцький. // Materiały IX międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami-2013», Vol. 31. Przemysł : Nauka i studia, 2013. P. 26–28. *(Здобувачем чисельно реалізовано математичну модель течії полімеру з проковзуванням по стінці)*

50. **Sokolskyi A. L.**, Ivitskyi I. I. Method of Accounting Wall Slip Polymer in Modeling Channel Processing Equipment // Modern Scientific Research and their Practical application. 2014. N 21410. P. 137–140. *(Здобувачем було створено методику врахування пристінних ефектів під час формування)*

51. Микулёнок И. О., **Сокольский А. Л.**, Соколенко В. В. Обобщённый подход к математическому моделированию непрерывных процессов переработки термопластов // Materials of the XI International scientific and practical conference «Modern scientific potential – 2015», 28.02.15–07.03.2015. Vol. 33. «Physics. Chemistry and chemical technology». Great Britain, Sheffield : Science and education LTD. P. 52–55 *(Здобувачем сформульовано проблему, розроблено математичну модель)*

52. Івіцький І. І., **Сокольський О. Л.**, Мікульонок І. О. Комп'ютерне моделювання течії розплаву полімерних матеріалів у програмному комплексі ANSYS POLYFLOW // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем : матеріали I Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Дніпропетровськ, 3–5 листопада 2015 р.). Дніпропетровськ : ДНВЗ УДХТУ, 2015. С. 79–81. *(Здобувачем розроблено математичну модель течії в адаптованому для числової реалізації вигляді)*

53. Експериментальні дослідження триботехнічних властивостей гранульованих полімерних матеріалів / В. М. Витвицький, С. В. Бардашевський, **О. Л. Сокольський**, І. О. Мікульонок // Aktuelle Themen im Kontext der Entwicklung der modernen Wissenschaften: der Sammlung wissenschaftlicher Arbeiten «ΛΟΓΟΣ» zu den Materialien der internationalen wissenschaftlich-praktischen Konferenz, Dresden, 23 Januar, 2019. Dresden : NGO «Europäische Wissenschaftsplattform», 2019. P. 58–60. *(Здобувачем розроблено методику виконання експериментальних досліджень)*

АНОТАЦІЯ

Сокольський О. Л. Наукові засади розроблення обладнання і процесів перероблення полімерних матеріалів методом екструзії. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.13 – Машини та апарати хімічних виробництв. – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" МОН України, Київ, 2020.

Дисертаційну роботу присвячено дослідженню особливостей обладнання та процесів для підготовки, змішування розплавів композицій та формування продукції за умов урахування нелінійної поведінки матеріалів, теплообміну, фазових переходів та інших особливостей технологічних процесів.

Розроблено принципово нові фізичні й математичні моделі плавлення полімеру в робочому каналі екструдера, які дають змогу виконувати аналіз процесів формування полімерних матеріалів і здійснювати розрахунки міцності й деформацій конструкцій під час дії термосилових навантажень.

Створено математичну модель, яка дозволяє моделювати процеси гомогенізації, змішування в'язких рідин з іншими компонентами та між собою. Досліджено закономірності розподілу концентрації барвника в змішувальних зонах. Розроблено математичну модель течії нелінійно в'язких рідин з урахуванням пружної деформації конструктивних елементів каналів технологічного обладнання.

Запропоновано методику моделювання та проектування екструзійних головок, яка дає змогу визначати потрібну конфігурацію екструзійної головки для забезпечення заданої форми перерізу екструдату.

Розроблено й запатентовано конструктивно-технологічні рішення перероблення полімерних матеріалів методом екструзії, а також методики їх проектування.

Ключові слова: полімер, черв'ячна екструзія, плавлення, змішування, формування, охолодження, моделювання.

ANNOTATION

Sokolskyi O. L. Scientific principles of development of the equipment and processes for polymeric materials processing by an extrusion method. – The manuscript.

Dissertation for Doctor of Science Degree in Specialty 05.05.13 – Machines and Apparatuses of Chemical Production. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", MES of Ukraine, Kyiv, 2020.

The thesis is devoted to research of features of equipment and processes for the preparation, mixing melt compositions based on the matrix of the first polymer with another polymer, liquid or disperse fillers and products formation for conditions including nonlinear behavior of materials, heat transfer, phase transitions and other features of technological processes.

Developed refined mathematical models of three-dimensional motion of non-isothermal rheological complex environments freeform channels taking into account the effects of wall and elastic deformation of structural elements.

Fundamentally new physical and mathematical models of polymer melting in the extruder channel have been developed. Implementation of the developed physical model

on the basis of modeling systems allowed to obtain scientifically valid parameters of the polymer melting process in the screw channel and the design parameters of the melting zone. On the basis of the developed models, the calculations of the melting zone of the extruder were performed and the features of the temperature field, velocity field, distribution of the viscosity value and the melting process of the solid polymer tube were revealed. In this case, explanations of well-known effects, which do not fit into the framework of previously created models, were obtained.

It has been found that the heat due to the friction of the material against the wall of the equipment and the viscous strain dissipation energy play a major role in the temperature distribution in the melting zone. There is a noticeable uneven distribution of speeds in sections along the channel. Thus, convective heat exchange occurs along the screw channel, which is not taken into account by many existing models of polymer melting process. Experimental and numerical studies show that with the destruction of residues of the melting tube does not end, there is a risk of removal of solid particles of polymer into the molding zone, which can lead to defects in the products.

A mathematical model of the process of temperature homogenization of a polymer melt is proposed on the basis of the relations of nonlinear mechanics of continuous mediums. Numerical simulations of the process of temperature homogenization in a barrier mixer were performed, the basic regularities were determined and its rational parameters were determined. The regularities of the distribution of the dye concentration in the mixing zones of different design are investigated.

The distribution of the dye concentration in the coaxial gap was investigated. To improve the mixing process in the channel, radial structural elements are required, which disrupt the flow in the radial direction, forming circulating zones. In the absence of such structural elements, mixing occurs only in the circumferential direction due to shear deformation. The dependence of mixing efficiency on the ratio of the viscosities of the dispersion medium to the dispersed material is investigated. For greater mixing efficiency, it is advisable to introduce the dispersed material into the coaxial mixing channel when rotating the outer cylinder.

Mixing of two polymers in the screw channel was investigated. It has been found that when the dispersed material is introduced into the dispersion medium at the core of the rotating screw, it is practically twice as fast as when the dispersed material is introduced near the outer radius of the rotating screw. Therefore, it is advisable to use the option of introducing the dispersed material into the dispersion medium at the core of the rotating screw.

Algorithms and methods of numerical calculations are proposed, which make it possible to analyze the flow distribution of polymeric materials in the molding channels of polymeric equipment with deformable walls.

The obtained data allow us to predict the magnitude and nature of deformation of the molding elements and to take into account its effect on the equality of the formed product. Conducted refined numerical experiments allowed us to formulate recommendations for developers and operators of polymer equipment.

A method of modeling and design of extrusion dies, which allows to determine the necessary configuration of the extrusion die and in particular its outlet to achieve the desired shape of the section of the extrudate after its stabilization is offered.

The distribution of technological stresses along the length of the pipe under different modes of the cooling process was obtained. The result of the calculations made it possible to establish that the highest stresses occur under the conditions of bilateral cooling of water, which can lead to a deterioration of the quality of the pipe.

Methods of experimental investigations of the regularities of the processes of feeding the extruder with a granular polymer, melting, extending the extrudate after its exit from the forming tool have been developed. Experimental settings have been created. Studies have been carried out to determine the physical properties of different polymeric materials at different stages of the extrusion process.

The developed and patented installations for the study of the coefficients of friction and lateral pressure of granular materials, the main structural elements of the extruders, design proposals for the improvement of the structures of the extrusion dies and methods of their design are presented.

Key words: polymer, screw extrusion, melting, mixing, forming, cooling, modeling.

АННОТАЦИЯ

Сокольский А. Л. Научные основы разработки оборудования и процессов переработки полимерных материалов методом экструзии. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.13 – Машины и аппараты химических производств. – Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" МОН Украины, Киев, 2020.

Диссертационная работа посвящена исследованию особенностей оборудования и процессов для подготовки, смешения расплавов композиций и формования продукции в условиях учета нелинейной поведения материалов, теплообмена, фазовых переходов и других особенностей технологических процессов.

Разработаны принципиально новые физические и математические модели плавления полимера в рабочем канале экструдера, которые позволяют выполнять анализ процессов формования полимерных материалов и осуществлять расчеты прочности и деформаций конструкций под действием термосиловых нагрузок.

Создана математическая модель, которая позволяет моделировать процессы гомогенизации, смешения вязких жидкостей с другими компонентами и между собой. Исследованы закономерности распределения концентрации красителя в смесительных зонах. Разработана математическая модель течения нелинейно вязких жидкостей с учетом упругой деформации конструктивных элементов каналов технологического оборудования.

Предложена методика моделирования и проектирования экструзионных головок, которая позволяет определять нужную конфигурацию экструзионной головки для обеспечения заданной формы сечения экструдата.

Разработаны и запатентованы конструктивно-технологические решения переработки полимерных материалов методом экструзии, а также методики их проектирования.

Ключевые слова: полимер, червячная экструзия, плавление, смешение, формование, охлаждение, моделирование.