

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



**КОВАЛЕНКО КСЕНІЯ ГЕННАДІЇВНА**

УДК 678.027.3(043.3)

**ЕКСТРУЗІЙНЕ ФОРМУВАННЯ ПОГОНАЖНИХ ВИРОБІВ З ПОЛІМЕРНИХ  
МАТЕРІАЛІВ З УРАХУВАННЯМ ЇХ В'ЯЗКОПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ**

05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис

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

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, професор  
**Сівецький Володимир Іванович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»,  
виконувач обов'язків завідувача кафедри  
хімічного, полімерного та силікатного  
машинобудування

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Савченко Богдан Михайлович**,  
Київський національний університет технологій  
та дизайну, професор кафедри прикладної  
екології, технології полімерів та хімічних волокон

кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Ведь Григорій Іванович**,  
пенсіонер

Захист відбудеться "27" лютого 2018 р. о 14<sup>30</sup> 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, пр. Перемоги, 37, корп. 19, аудиторія 201/1.

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

Автореферат розісланий "25" січня 2018 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.05



О. І. Іваненко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Профільні полімерні погонажні вироби різноманітного поперечного перерізу набули надзвичайно широкого розповсюдження в будівництві та інших галузях економіки. Внаслідок в'язкопружних властивостей розплавів полімерів при їх витіканні з формуючого каналу головки проявляються ефекти зміни конфігурації екструдованих профілів відносно геометрії формуючого каналу. Тому при проектуванні формуючих головок для виробництва профільних погонажних полімерних виробів необхідно враховувати закономірності розподілу швидкостей течії як в каналах головки, так і на виході з неї та прояву в'язкопружних властивостей розплавів полімерів, наявності ефектів їх проковзування по стінках формуючих каналів головки тощо.

Проектування екструзійних головок для отримання екструдованих полімерних профілів є складним завданням, оскільки остаточний розмір профілю екструдату залежить не тільки від геометрії формуючих каналів головок, а і від властивостей пластмас та технологічних параметрів процесу екструзії.

До цього часу метод спроб і помилок був основним при розробці конструкцій екструзійних головок, оскільки була відсутня методика, яка б враховувала всі вказані закономірності, характерні для процесу вільної екструзії полімерів, і особливо супроводжуючі його постекструзійні ефекти в області збіжних потоків. Тому актуальним є розробка і застосування методики профілювання формуючих каналів екструзійних головок, яка б враховувала в'язкопружні властивості течії полімерів і прояву постекструзійних ефектів з метою забезпечення розмірної точності та стабільності форми екструдованих виробів. При цьому значну роль відіграє числовий експеримент, який дозволяє в короткий термін і з мінімальними матеріальними витратами виконати оцінку впливу конструктивних й технологічних параметрів та реологічних властивостей полімерних матеріалів на якість екструдованих профільних погонажних виробів.

Ця робота присвячена дослідженню процесу та обладнання для виробництва погонажних виробів з полімерного розплаву методом вільного екструзійного формування з урахуванням в'язкопружних властивостей, вирішення проблеми неоднорідності форми поверхні і перетину екструдату шляхом оптимізації геометрії формуючого інструмента.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано на кафедрі хімічного, полімерного та силікатного машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» відповідно до пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2015 р. (постанова Кабінету Міністрів України від 07.09.2011 р., № 942); згідно з держбюджетною науково-дослідною роботою кафедри ХПСМ НТУУ «КПІ» «Науково-технічні засади проектування обладнання для формування виробів з полімерних композицій із врахуванням їх в'язкопружних властивостей» (№ 2824-п, 2015-2016 рр., № державної реєстрації 0115U000178; замовник – Міністерство освіти і науки України; автор – виконавець теми).

**Мета і завдання дослідження.** Метою даної роботи є моделювання процесу течії розплаву полімеру в формуючих каналах головок промислових екструдерів та в зоні вільної поверхні на виході з них і дослідження впливу в'язкопружних властивостей полімеру на геометричні параметри формуючих каналів при виробництві полімерних погонажних виробів.

Для досягнення зазначеної мети в дисертаційній роботі були поставлені такі завдання:

- обґрунтувати вибір математичної моделі стану в'язкопружних полімерних матеріалів: поліетилену високого тиску (ПЕВТ), полістиролу (ПС) та полівінілхлориду (ПВХ) при вільному екструзійному формуванні погонажних виробів;

- експериментально визначити коефіцієнти розбухання та час релаксації полімерних матеріалів в процесі вільної екструзії і на їх базі шляхом числового моделювання встановити параметри в'язкопружної реологічної моделі їх стану і розробити математичну модель цього процесу;

- оцінити достовірність отриманих параметрів математичної моделі шляхом порівняння результатів тестового числового моделювання та експериментальних досліджень на базі розробленої методики і визначених параметрів реологічної моделі;

- здійснити моделювання течії в'язкопружної рідини при виході з формуючого пристрою екструдера на основі встановлених параметрів математичної моделі з урахуванням впливу технологічних режимів, ефекту проковзування, конструктивних особливостей формуючих каналів головок на спотворення геометрії модельних екструдованих зразків;

- розробити експериментально-розрахункову методику розв'язання оберненої задачі з метою визначення необхідної геометрії формуючих каналів екструзійних головок;

- здійснити вдосконалення екструзійної головки з метою мінімізації явища розбухання і отримання полімерного виробу заданого профілю.

*Об'єктом дослідження* є процес формування профільних погонажних полімерних виробів методом вільної екструзії з урахуванням в'язкопружних властивостей полімерів.

*Предметом дослідження* є в'язкопружні властивості полімерних матеріалів та конструктивна реалізація процесу формування профільних погонажних виробів.

**Методи дослідження.** Поставлені в роботі завдання вирішувались на основі сучасних методів числового моделювання з використанням положень теорії суцільного середовища, ітераційних підходів та методу скінченних елементів на базі експериментально визначених в'язкопружних властивостей полімерних матеріалів. Експериментальне дослідження параметрів реологічної моделі, розробка уточненої математичної моделі та проведення числових експериментів і розв'язання оберненої задачі процесу профілювання формуючих каналів головок.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В дисертації вперше одержані такі нові наукові результати:

- обґрунтовано вибір рівняння в'язкопружного стану найбільш поширених полімерних матеріалів для екструзійного формування погонажних виробів;

- вперше визначені експериментальні параметри вибраної реологічної моделі Фан-Тьєн-Таннера (ФТТ) при екструзійному формуванні погонажних виробів, які описують стан в'язкопружної поведінки розплаву;
- шляхом числового моделювання на базі експериментально визначених коефіцієнтів розбухання та релаксації в процесі вільної екструзії встановлені параметри в'язкопружної реологічної моделі ФТТ стану полімерних матеріалів;
- встановлено і досліджено вплив геометрії формуючих каналів екструзійних головок на конфігурацію погонажних полімерних виробів із врахуванням їх в'язкопружних властивостей розплавів полімерів;
- науково обґрунтовано розв'язання оберненої задачі профілювання формуючих каналів екструзійних головок процесу вільної екструзії з урахуванням визначених коефіцієнтів реологічної моделі.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

- розроблено методику та технологічні рекомендації конструктивного профілювання формуючих каналів при вільному екструзійному формуванні, які забезпечують виготовлення полімерного профілю заданого поперечного перерізу, що дозволяє відмовитися від складних калібрувальних пристроїв;
- проведено експериментальні дослідження реологічних параметрів матеріалу і характеру ефекту розбухання полімерного матеріалу після його виходу з формуючого інструменту;
- запропоновано конструктивні засоби для поліпшення якості полімерних погонажних профільних виробів і скорочення часу розробки та оптимізації параметрів процесу екструзії, що приводить до зниження матеріальних витрат, підвищення якості продукції і продуктивності;
- розроблена методика оберненого моделювання, що дозволяє скоротити довжину формуючого каналу і знизити енергетичні витрати до 10 % чи збільшити продуктивність процесу формування до 14 %;
- результати дисертаційної роботи впроваджено у промислових зразках переробного обладнання у вигляді технологічних рекомендацій на ТОВ НВП «ІНКОС» м. Чернігів та ТОВ «Крок-95», що підтверджено актами впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи отримані та опубліковані автором самостійно [1-26]. В спільних працях автору належить таке: [1, 2, 8, 11, 12] – експериментальне дослідження коефіцієнтів розбухання, релаксації та констант реологічної моделі; [4, 6, 7, 9] – розробка методик розрахунків геометричних параметрів формуючих каналів; [3, 5, 10] – розроблення методик розрахунків та проведення натурних і числових експериментів, впровадження результатів роботи. Значний вклад внесено у розробку патентів на корисну модель [15-19]. За результатами роботи зроблено низку доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях [20-26].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень були представлені на: I міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 2011 р.); науково-практичній конференції «Ресурсоенергоєфективні процеси, технології та обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» (м. Київ,

2012-2013 рр.); XIV международной научно-технической конференции «Технология и инженерное образование» (м. Севастополь, 2013 р.); Всеукраїнській науковій конференції молодих учених та студентів «Сучасні технології одержання композиційних матеріалів, хімічних волокон і нанокомпозитів» (м. Київ, 2013 р.).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 26 друкованих праць, у тому числі 12 статей у наукових фахових виданнях, з яких 2 входять до наукометричних баз; 7 патентів України на корисну модель; 5 тез доповідей в збірниках матеріалів міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій; 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір.

**Обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел літератури (133 найменування на 14 сторінках) і трьох додатків на 20 сторінках. Обсяг основного тексту становить 146 сторінки тексту, з яких площа 9 сторінок повністю зайнята рисунками. Робота містить 106 рисунків і 9 таблиць. Загальний обсяг роботи складає 195 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету досліджень, визначено основні завдання і методи їх розв'язання, викладені наукова новизна та практичне значення результатів роботи. Наведено особистий внесок здобувача, інформацію про апробацію результатів дисертації та публікації по темі дисертаційної роботи.

У першому розділі виконано аналітичний огляд існуючих зарубіжних і вітчизняних публікацій по дослідженню течій високоеластичного розплаву полімеру в каналах, характерних для формуючих інструментів промислових екструдерів. Огляд показав недостатній рівень досліджень отримання однорідних за експлуатаційними властивостями полімерно-погонажних виробів та особливостей течії в'язкопружних рідин в зонах виходу профільованих виробів з формуючого інструменту та відсутність методик профілювання формуючого каналу, що забезпечує компенсацію ефекту розбухання екструдату. Вітчизняні інженери проектування головок для нового виробу здійснюють на основі попереднього досвіду і натурних експериментів.

Огляд математичних моделей розрахунку течії в'язкопружних рідин на вихідній ділянці формуючого інструменту, проведений на основі робіт таких відомих вчених та інженерів, як Хана і Кима, Фан-Тьена, Таннера, Мітсуліса, Торделла, Р. В. Торнера, З. Тадмора та інших, показав доцільність уточнення існуючих математичних моделей та дозволив обґрунтувати раціональність використання реологічної моделі ФТТ. Оскільки параметри цієї моделі для досліджуваних полімерів в літературі відсутні, то однією з задач даної роботи було їх експериментальне визначення.

Другий розділ присвячено проведенню експериментальних досліджень, числовому та математичному моделюванню процесу екструзії формування

профільних полімерних погонажних виробів. Описано експериментальні установки, методики експериментальних досліджень, викладено математичну модель течії полімеру у формуючих каналах та наведена перевірка її достовірності в умовах діючого виробництва при екструзії різних профілів, зокрема зубчатого, проведена оцінка похибки.

Для проведення експерименту з дослідження параметрів реологічного рівняння ФТТ для урахування в'язкопружних властивостей розплавів полімерів в процесі вільної екструзії крізь циліндричний канал використовувався черв'ячно-пластикаційний пристрій діаметром 36 мм з відношенням довжини до діаметру рівним 20, оснащений голівкою з довжиною формуючого каналу 40 мм та діаметром 8 мм. За сталого режиму екструзії розплаву полімеру з голівки через певний час екструдат відрізався по торцевій поверхні формуючого каналу. Час відсікання екструдату вибирався таким чином, щоб відсічений відрізок мав довжину від 50 до 100 мм (для зменшення помилки експерименту і полегшення подальших досліджень). Отримані зразки екструдату зважувалися на аналітичних вагах. Дослідження проводились за різних швидкостей екструзії  $V$ .

Довжина фотофіксації вільної ділянки екструдату не перевищувала 30 мм, так що провисання під дією сили тяжіння було незначним. Розмір екструдованого виробу був вимірюваний в напрямку відповідно до руху полімеру на виході з формуючого інструменту за допомогою фотооптичного пристрою. Методика дозволила визначити форму вільного потоку. Експериментальна установка показана на рисунку 1.

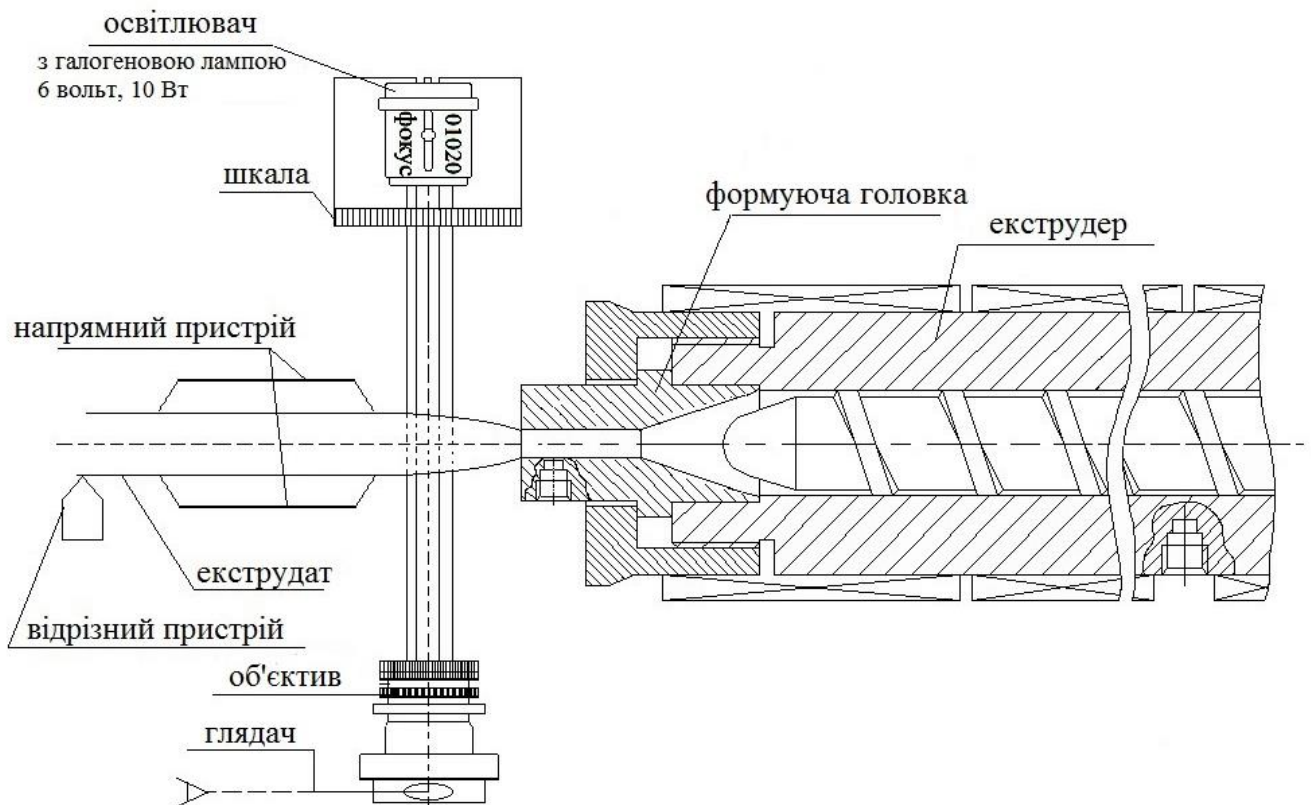


Рисунок 1 – Схема експериментальної фотооптичної установки вимірювання параметрів моделі ФТТ

Експериментальним шляхом були визначені коефіцієнти розбухання та час релаксації полімерів в процесі вільної екструзії і на їх базі були встановлені параметри в'язкопружної реологічної моделі.

Методика розрахунку часу релаксації  $\lambda$  та коефіцієнтів розбухання ПЕВТ, ПВХ, ПС включала в себе визначення: масової та об'ємної продуктивності; лінійної швидкості екструдату; довжини ділянки профілю екструдату  $l_\lambda$ , на якій досягається максимальне розбухання розплаву.

Після визначення матеріальних параметрів в'язкопружності розплаву і обробки експериментальних даних були побудовані графіки залежності зміни радіуса профілю вільної поверхні екструдату циліндричної форми у повздовжньому напрямі для досліджуваних полімерів (рисунки 2-4). Температури дослідження при проведенні експериментів для обраних полімерних матеріалів: ПЕВТ – 170° С, ПС – 180° С, ПВХ – 180° С.

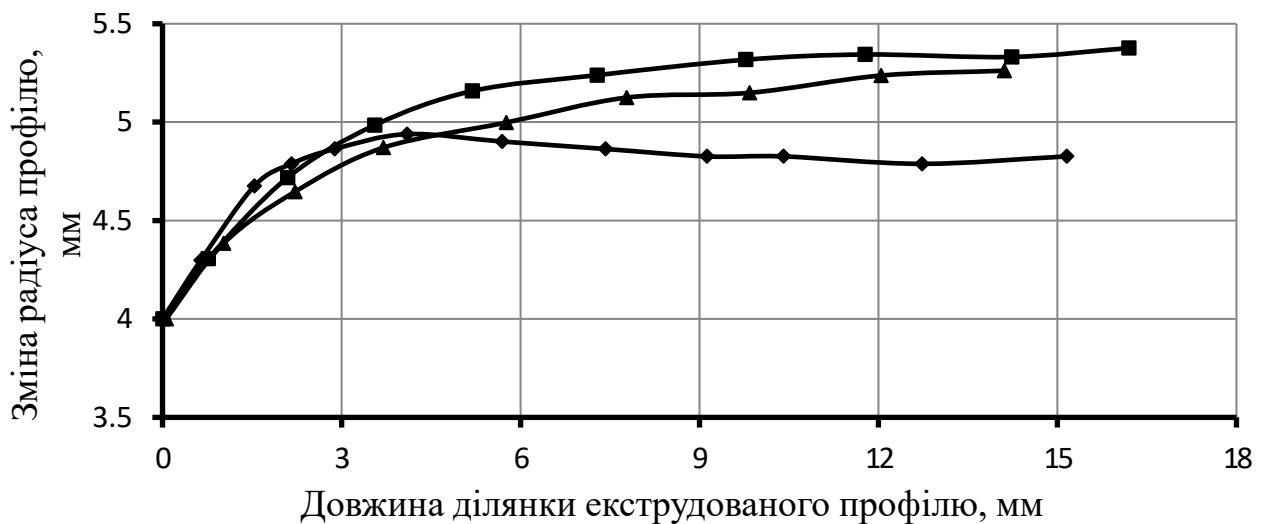


Рисунок 2 – Залежність зміни радіуса екструдату круглого поперечного перетину після виходу з формуючого інструменту ПВХ марки SorVyl (Німеччина)

▲ –  $V = 0,0591$  м/с; ■ –  $V = 0,0117$  м/с; ◆ –  $V = 0,0658$  м/с

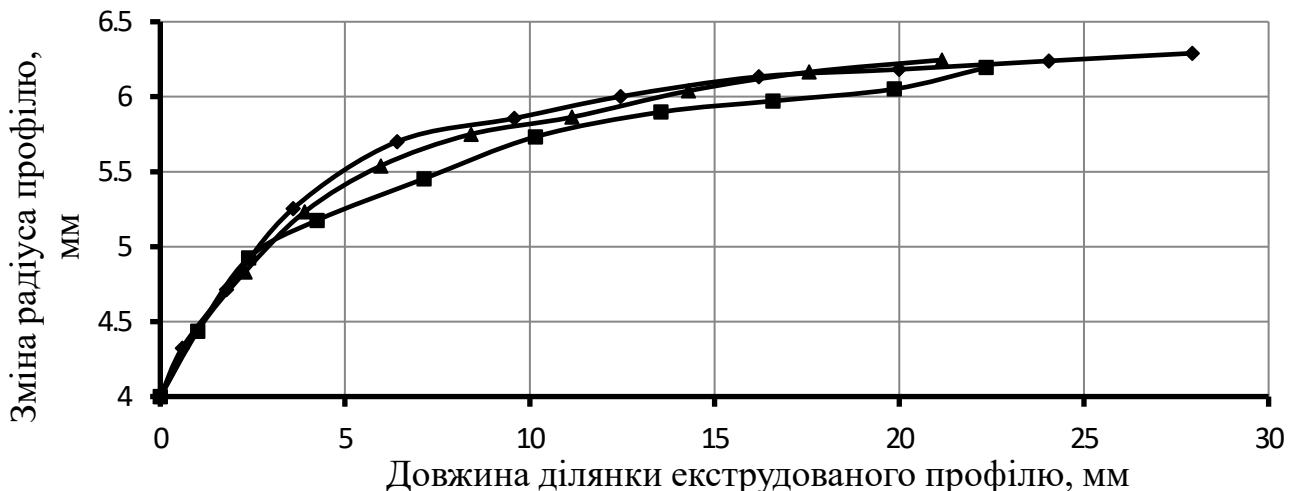


Рисунок 3 – Залежність зміни радіуса екструдату круглого поперечного перетину після виходу з формуючого інструменту ПЕВТ 15802-020 ГОСТ 16337-77

▲ –  $V = 0,0857$  м/с; ■ –  $V = 0,089$  м/с; ◆ –  $V = 0,0798$  м/с

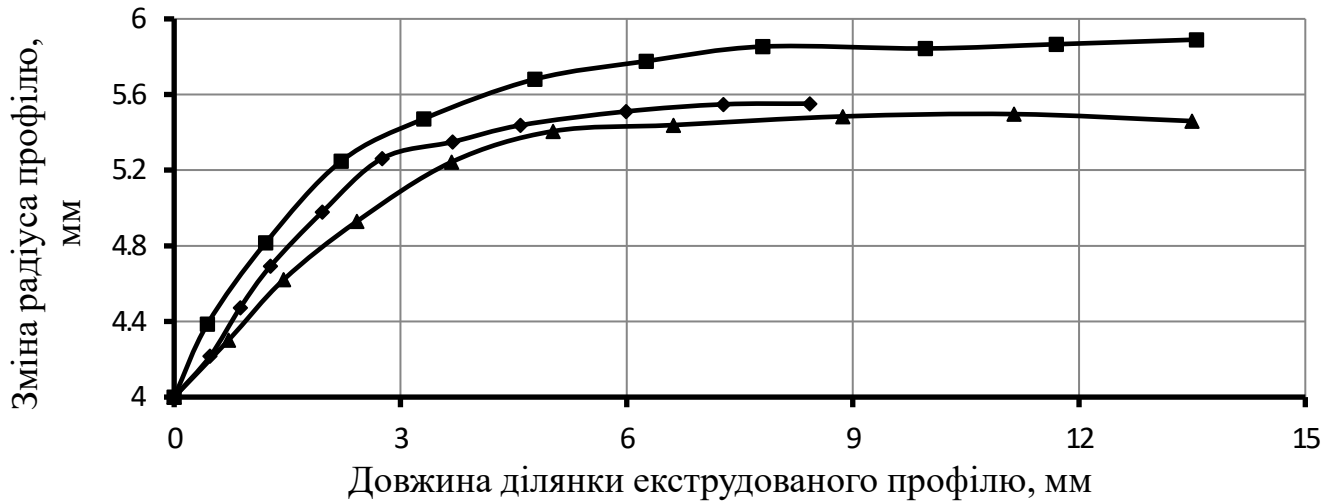


Рисунок 4 – Залежність зміни радіуса екструдату круглого поперечного перетину після виходу з формуючого інструменту ПС 115  
 ▲ –  $V = 0,1973$  м/с; ■ –  $V = 0,1551$  м/с; ◆ –  $V = 0,1704$  м/с

Визначені параметри процесу екструзії представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Експериментальні параметри процесу екструзії

	ПЕВТ 15802-020	ПС 115	Композиція ПВХ
Масова продуктивність, $G$ , г/с	1,593	3,43	2,07
Об'ємна продуктивність, $Q$ , м <sup>3</sup> /с	$1,68 \cdot 10^{-6}$	$3,34 \cdot 10^{-6}$	$1,29 \cdot 10^{-6}$
Лінійна швидкість екструдату, $U$ , м/с	0,0857	0,1704	0,0658
Час релаксації, $\lambda$ , с	0,31	0,03	0,23
Довжина ділянки стабільного перерізу, $l_{\lambda}$ , м	0,027	0,0055	0,01525
Коефіцієнт розбухання, $B$	1,41	1,35	1,2

Для визначення коефіцієнту розширювальної здатності розплаву моделі ФТТ необхідно розрахувати в'язкопружну компоненту загального тензора екстра-напруження.

Напруження, що накопичується в полімерному середовищі, представляється у вигляді суми двох компонент із в'язкопружної і пружної частин

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_1 + \boldsymbol{\tau}_2 \quad (1)$$

В якому в'язкопружна і пружна компоненти обчислюються з рівнянь:

$$\boldsymbol{\tau}_1 + \lambda_1 \overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}}_1 = 2\eta_1 \mathbf{D}; \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\tau}_2 = 2\eta_2 \mathbf{D}, \quad (3)$$

де  $\lambda_1$  – час релаксації, с<sup>-1</sup>;  $\mathbf{D} = \frac{1}{2}(\nabla \bar{v} + \bar{v} \nabla)$  – тензор швидкості деформації, с<sup>-1</sup>;  $\nabla$  – оператор Гамільтона, м<sup>-1</sup>;  $\bar{v}$  – вектор швидкості, м/с;  $\eta_1$  – динамічна

в'язкість, Па·с;  $\eta_2$  – об'ємна в'язкість, Па·с; пружна компонента  $\tau_2$  розраховується за помітних змін об'єму полімеру;  $\tau_1^\nabla$  – верхня конвективна похідна за часом в'язкопружного екстра-напруження.

В'язкопружна компонента  $\tau_1$  для моделі ФТТ обчислюється

$$\exp\left[\frac{\varepsilon\lambda}{\eta_1}\tau_1\right]\tau_1 + \lambda\left[\left(1 - \frac{\xi}{2}\right)\tau_1^\nabla + \frac{\xi}{2}\tau_1^\Delta\right] = 2\eta_1\dot{\mathbf{D}}, \quad (4)$$

де  $\varepsilon$  і  $\xi$  – це матеріальні коефіцієнти, які визначають розширювальну здатність розплаву і зсувну в'язкість, відповідно;  $\tau_1^\Delta$  – нижня конвективна похідна за часом в'язкопружного екстра-напруження; параметр  $\varepsilon$  знаходиться з числового встановлення форми екструдату до збігу з експериментально визначеною довжиною стабілізації перерізу екструдату.

Апроксимація закону в'язкості для розглянутих полімерів здійснювалась за експериментальними даними. Наприклад, коефіцієнт в'язкості ПВХ для в'язкопружної компоненти визначений по перехресному закону (CrossLaw)

$$\eta_1 = \frac{\eta_0}{1 + (\lambda \cdot \dot{\gamma})^m}, \quad (5)$$

де  $\eta_0$  – в'язкість за нульової швидкості зсуву, Па·с;  $m$  – показник;  $\dot{\gamma}$  – локальна швидкість зсуву:  $\dot{\gamma} = \sqrt{2(\dot{\mathbf{D}}:\dot{\mathbf{D}})}$ , с<sup>-1</sup>.

Тензор напружень доповнює математичну модель екструзії, яка зводиться до системи рівнянь нерозривності та руху:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{v} = 0; \\ \rho \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}, \end{cases} \quad (6)$$

де  $t$  – час, с;  $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  $p$  – зовнішній гідростатичний тиск, Па;  $\bar{\bar{\tau}} = 2\eta(\dot{\gamma})\dot{\mathbf{D}}$  – тензор в'язких напружень другого рангу, Па;  $\eta(\dot{\gamma})$  – в'язкість рідини як функція другого інваріанта  $\dot{\gamma}$  від  $\dot{\mathbf{D}}$ , Па·с.

Для дослідження умов розбухання потоку в'язкопружної полімерної рідини на виході з формуючого отвору проводиться аналіз напруженого стану екструдату в області виходу за наступних граничних умов:

- 1) на вході у формуючий канал задається витрата розплаву або нормальна швидкість

$$\mathbf{G} = \mathbf{G}_{\text{inlet}} \nabla \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = v_{\text{inlet}}, \quad (7)$$

де  $G = G_{inlet}$  – об’ємна витрата розплаву,  $m^3/c$ ;  $\mathbf{v} = v_{inlet}$  – швидкість полімеру на вході в головку,  $m/c$ ;  $\mathbf{n}$  – вектор нормалі до вільної поверхні;

2) на виході екструдату з формуючого каналу приймається нульовий тиск

$$\mathbf{n} \cdot \nabla p = 0; \quad (8)$$

3) на стінці каналу враховуються пристінні ефекти за законом Нав’є

$$\boldsymbol{\tau} = -F_{slip} |\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_w|^{e_{slip}}, \quad (9)$$

де  $v_s$  – тангенціальна компонента швидкості течії,  $m/c$ ;  $v_w$  – тангенціальна компонента швидкості стінки,  $m/c$ ;  $F_{slip}$  – коефіцієнт ковзання (тертя) на поверхні каналу,  $kg/(m^2 \cdot c)$ ;  $e_{slip}$  – параметр матеріалу;

4) на вільній поверхні екструдату задаються умови рівноваги і нульове значення швидкості розбухання:

$$\begin{cases} \tau_{ii} = (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n} = p - HS; \\ \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = 0, \end{cases} \quad (10)$$

де  $H$  – кривизна вільної поверхні,  $m^{-1}$ ;  $S$  – питома сила поверхневого натягу,  $N/m$ .

Схема екструзійної течії розплаву полімеру на виході з формуючого каналу головки з граничними умовами представлена на рисунку 5.

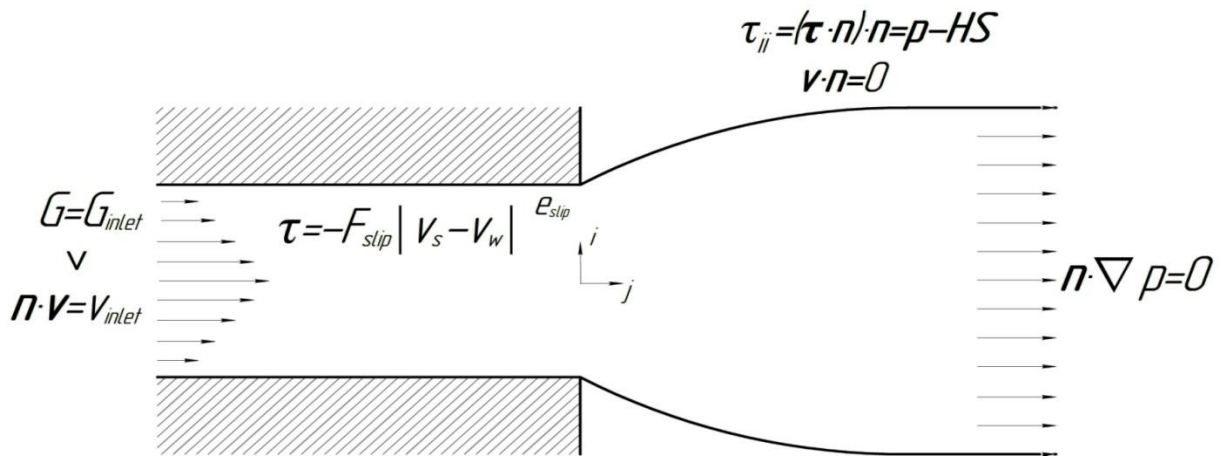


Рисунок 5 – Схема течії розплаву полімеру на виході з формуючого каналу головки з граничними умовами

Для перевірки достовірності вибору математичної моделі та отриманих результатів було проведено числове моделювання процесу екструзії через формуючий канал головки круглого поперечного перерізу та співставлення з результатами експериментальних досліджень.

Числове моделювання проводилося з метою встановлення реологічного параметру моделі ФТТ для даного полімеру в заданому температурному режимі, а саме коефіцієнту розширювальної здатності розплаву, який неможливо визначити експериментальним шляхом.

Результати числового моделювання і експериментальних даних зміни параметрів екструдованого циліндричного профілю представлені на рисунку 6 (за умов, відповідних до рисунку 2).

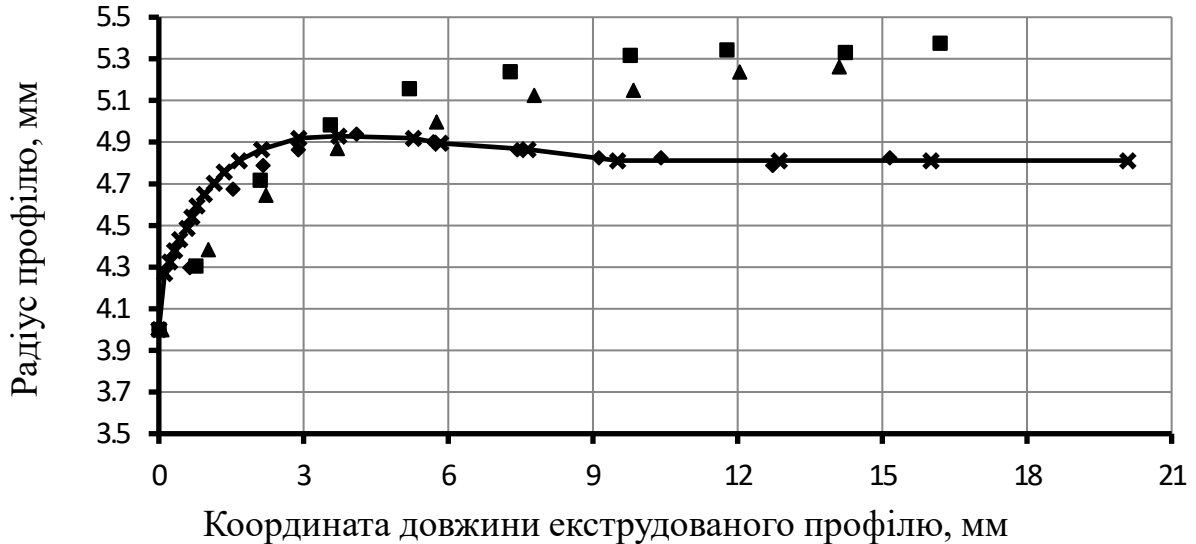


Рисунок 6 – Залежність зміни радіуса екструдату круглого поперечного перетину ПВХ марки SorVyl на виході з формуючого каналу експериментальні дані: ▲ –  $V = 0,0591$  м/с; ■ –  $V = 0,0117$  м/с; ◆ –  $V = 0,0658$  м/с; × – результат числового моделювання

Графік числового моделювання з встановленим коефіцієнтом розширювальної здатності розплаву збігається з одним із графіків експериментальних даних для швидкості 0,0658 м/с, що демонструє можливість використання матеріальних параметрів, отриманих експериментальним шляхом і параметру, встановленого шляхом числового моделювання для подальшого використання програмного комплексу для моделювання течії розплаву даного полімеру при формуванні різних погонажних профілів.

Дослідження достовірності використання скінченно-елементної математичної моделі течії ньютонівських рідин у каналах складної геометрії для нестисливих середовищ проводилося в умовах діючого виробництва при екструзії різних профілів, зокрема зубчатого.

На рисунку 7 представлено результат співставлення експерименту і числового моделювання за умов визначення реологічних параметрів течії в'язкопружного розплаву полімеру на прикладі екструзії зубчатого профілю типорозміром 30 мм × 4 мм та довжиною формуючого каналу 50 мм.

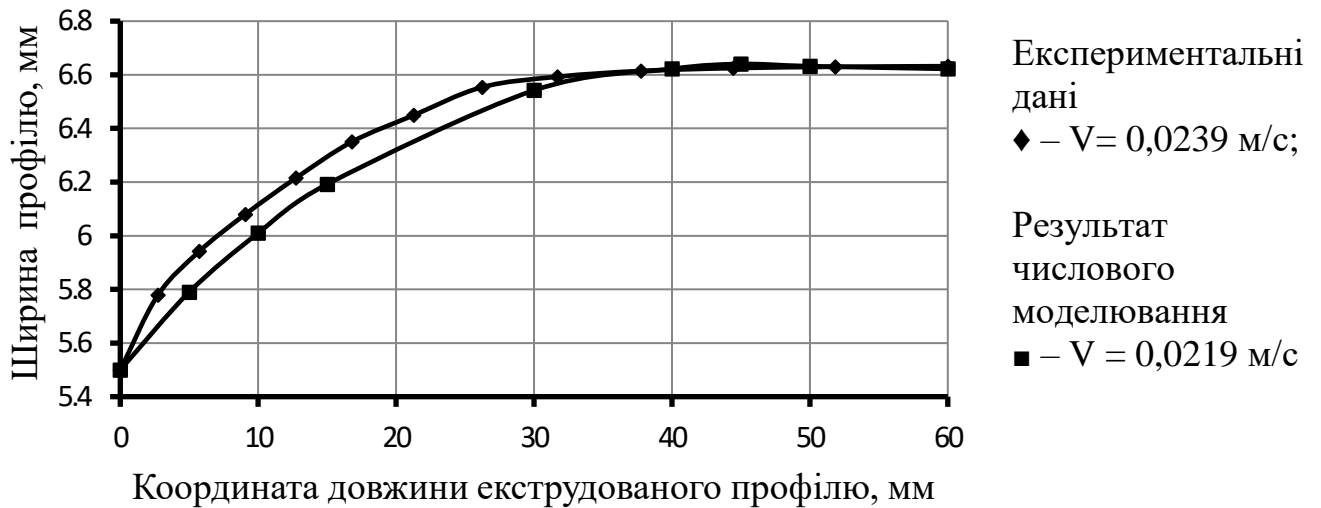


Рисунок 7 – Залежність зміни ширини екструдованого зубчатого профілю з ПВХ марки SorVyl на виході з формуючого інструменту

Представлені експериментальні дані та результати числового моделювання показали, що реологічна модель ФТТ дозволяє з високою точністю прогнозувати аномалію в'язкості розплаву полімеру, ефекту розбухання, добре описує течію полімерів, для яких характерна наявність в'язкопружної поведінки. Це підтверджує можливість використання отриманих числовим моделюванням матеріальних параметрів для подальшого використання гідродинамічного моделювання течії розплаву полімеру з використанням реологічної моделі ФТТ.

Аналіз експериментальних і числових результатів розрахунку течії досліджуваних полімерів на виході з формуючого каналу в системі "Polyflow" показав їх задовільну збіжність в межах до 16 %, що підтверджує адекватність обраної моделі та алгоритму проектного розрахунку.

**У третьому розділі** наведено результати експериментальних та числових досліджень і методику уточненого проектування геометрії формуючих каналів для виробництва різноманітних погонажних профільних виробів. Вона включає стадії попереднього моделювання процесу вільної екструзії та реалізацію алгоритму проектування формуючих каналів головки методом вирішення оберненої задачі профілювання. В даному розділі описується процес проведення натурального експерименту та його результати при виготовленні погонажних профільних виробів.

Попереднє проектування базується на математичній моделі, в якій відображені реологічна поведінка та властивості матеріалу, умови проковзування в формуючому каналі, умови утворення вільної поверхні без калібруючих пристроїв й умови зміни параметрів екструдованого профілю.

З метою перевірки збіжності математичної моделі проводились числові дослідження процесу формування полімерних погонажних виробів на екструзійній головці типу труба (течія через кільцевий циліндричний канал), суцільний круглий профіль, полий квадратний профіль (течія через квадратний канал), пластинка (прямокутний профіль, довжина якого значно більша за ширину).

Найбільшій витраті часу на розрахунок потребував спосіб з застосуванням схеми еволюції – додаткова числова схема, яка робить більш стійкою збіжність

параметрів потоку у складних умовах. Для даного дослідження схема еволюції застосована відносно коефіцієнта проковзування уздовж стінки формуючого каналу.

Всі змодельовані профілі складаються з двох частин: каналів головки та ділянки вільного екструдованого профілю на виході з головки. Зміна геометрії профілю моделюється для режиму вільної екструзії, тобто без тягнучого пристрою, що дозволяє екструдату релаксувати та проявити явище розбухання, з ПВХ марки SorVyl за постійної температури 180° С.

Для оцінки зміни форми вільної поверхні на виході з формуючого каналу головки показані на рисунку 8 результати досліджень зміни радіуса екструдованих профілів трубного і круглого поперечного перерізів по довжини вільної ділянки. В якості аргументу функції розбухання екструдату ( $\beta$ ) використовується число Дебори ( $De$ ), яке являє собою відношення часу релаксації полімеру до часу проходження ним формуючої ділянки. Узагальнена залежність величини розбухання  $\beta$  для п'яти значень числа  $De$  цих же профілів на виході з формуючого каналу представлена на рисунку 9.

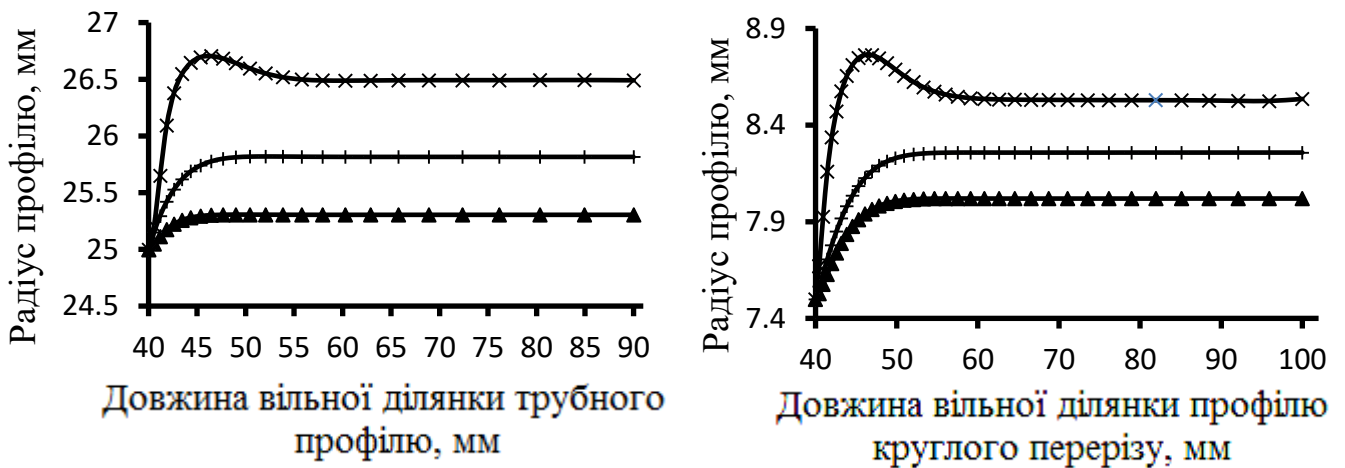


Рисунок 8 – Залежність зміни радіуса профілів трубного і круглого поперечного перерізу по довжині вільної ділянки екструдату  
 ▲ –  $De = 0$ ; + –  $De = 0,6$ ; × –  $De = 0,9$

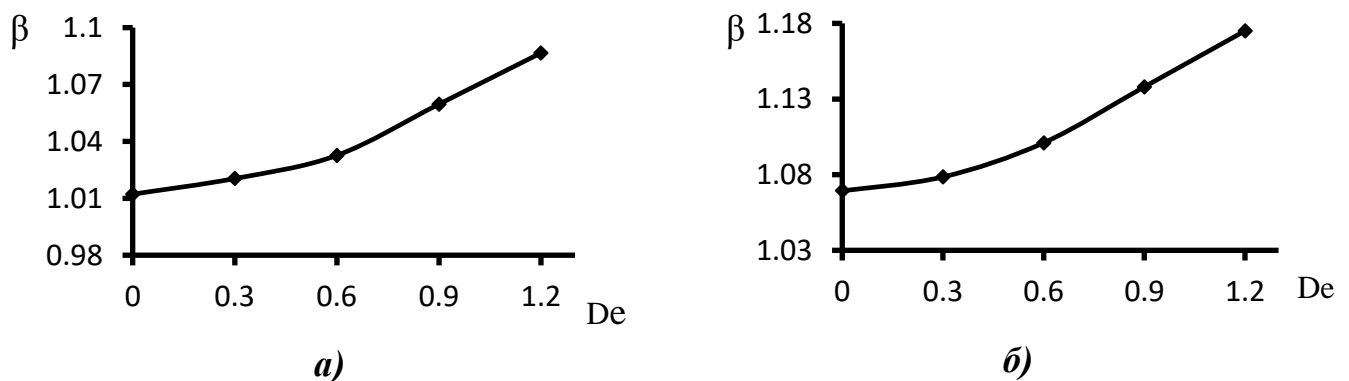


Рисунок 9 – Залежність величини розбухання  $\beta$  профілів трубного (а) і круглого (б) поперечного перерізу від числа  $De$

Ступінь розбухання розплаву  $\beta$  полімеру пояснюється тим, що перед виходом з формуючого інструмента екструдера неньютонівська рідина має розвинений

профіль зсувної течії, а на виході характер розподілу швидкості по перетину екструдату поступово вирівнюється і, в кінцевому результаті, екструдований профіль розбухає і рухається без зміни геометрії. З графіків залежності  $\beta - De$  видно, що зі збільшенням числа  $De$  розбухання розплаву збільшується.

Результати числових досліджень показують, що в разі виконання формуючих каналів з геометрією, яка відповідає заданому перерізу екструдованих профілів, дійсний переріз може значно відрізнятись від цільового. Запропоноване врахування пружних властивостей рідини при моделюванні течії з використанням моделі ФТТ дозволяє визначити межі області перебудови екструдованого профілю і здійснювати обґрунтований вибір параметрів формуючого інструменту.

На рисунку 10 представлені вихідні контури Ш-подібного формуючого каналу та змодельовані контури стабілізованих розмірів профілів, відформованих на головках з довжиною формуючого каналу 100 мм (рисунок 10а) та 50 мм (рисунок 10б). Контури формуючого каналу головки довжиною 50 мм та профілю за результатами розв'язання оберненої задачі екструзії показано на рисунку 10в.

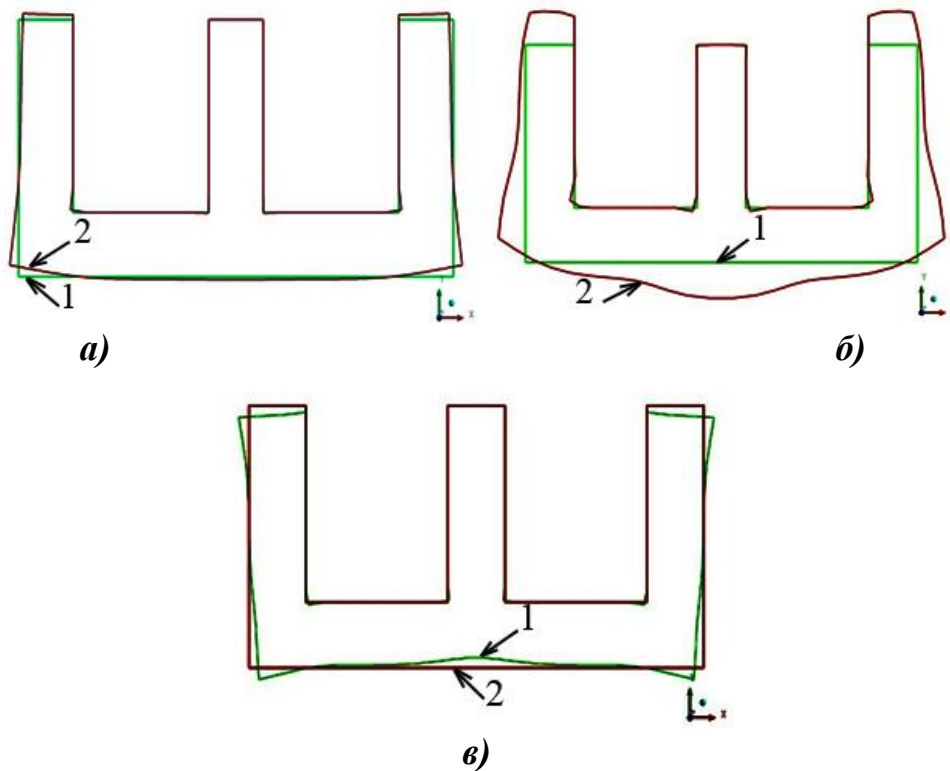


Рисунок 10 – Поперечні перерізи екструдату на виході з головки (1) і стабілізованих розмірів (2)

- а) довжина формуючого каналу 100 мм; б) довжина формуючого каналу 50 мм;
- в) з геометрією головки за результатами розв'язання оберненої задачі екструзії

З рисунку 10а видно, що при екструзії профілю крізь формуючий канал з рекомендованою довжиною вихідного формуючого каналу забезпечуються релаксації напружень та мінімізація ефекту розбухання. При цьому довжина каналу, а отже і гідравлічний опір є досить великими. Зі зменшенням довжини формуючих каналів (рисунок 10б) явище розбухання стає більш значним – форма екструдату спотворюється. Врахування умов в'язкопружних властивостей екструдату при

вирішенні оберненої задачі екструзії профільних виробів дозволяє зменшити довжину формуючих каналів за рахунок корегування його конфігурації (рисунок 10в). Це дозволить зменшити перепад тиску в головці на 10-12 %, а відповідно енергетичні витрати на процес формування профільних погонажних виробів.

Розв'язок оберненої задачі екструзії показано на прикладі профілів форми "рамка" та L-подібного перерізу, яка полягає у визначенні необхідної форми каналу головки для забезпечення умови отримання виробу заданої геометрії.

Числовий експеримент проводили за наступних умов: потік розплаву полімеру нестисливий. Гравітаційними і інерційними силами нехтуємо. Рівняння руху дає баланс між силами в'язкості і тиску. На стінках головки застосовується гранична умова проковзування.

На першому етапі моделювання проводили без урахування можливості компенсації розбухання екструдату і інших ефектів. Результати такого ітераційного моделювання демонструють особливості течії полімеру і визначення області з уповільненим рухом полімерного матеріалу, що може призвести до спотворення форми екструдованого виробу або ж до його локального розкладання.

На підставі результатів, отриманих при попередньому моделюванні, наступним кроком було реалізовано алгоритм Флетчера-Рівса, який застосовано для визначення геометрії формуючого каналу головки з метою забезпечення бажаної форми екструдованого профілю.

Розглянута методика моделювання дозволяє проводити уточнення геометрії формуючого каналу головки і отримання екструдованого профілю заданої форми.

На рисунку 11 показані варіанти неоптимізованої і оптимізованої геометрії вихідної області формуючого каналу головки та результати прогнозування геометрії останньої ділянки формуючого каналу.

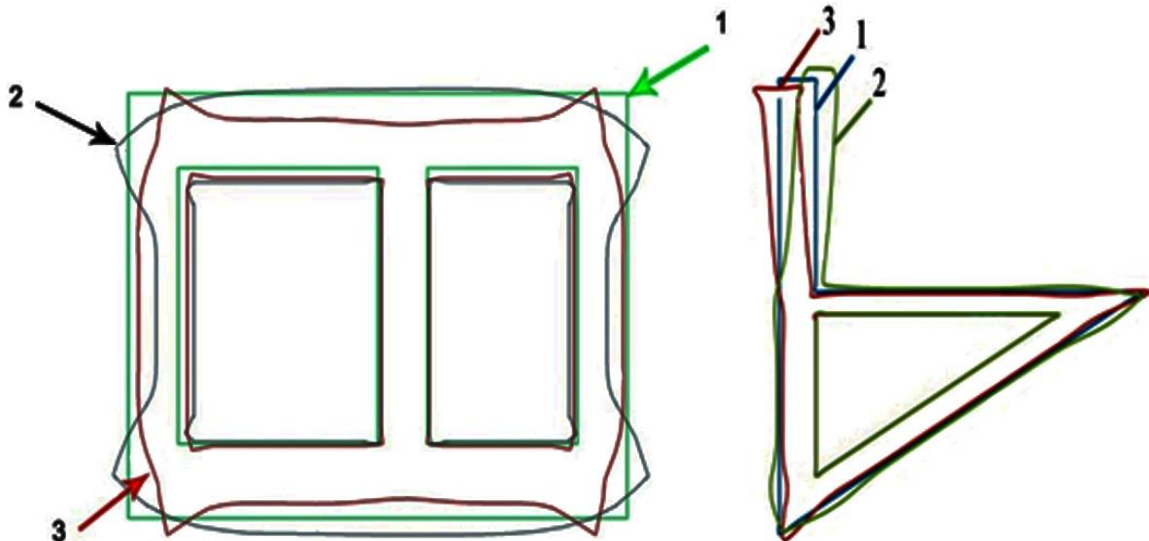


Рисунок 11 – Вихідні поперечні перерізи області формуючого каналу головки неоптимізованої і оптимізованої форми

1 – задана цільова форма профілю; 2 – неправильна форма профілю кінцевого виробу; 3 – необхідна конфігурація перетину матриці головки

Обчислювальна потужність програмного гідродинамічного моделювання дозволяє здійснювати також прогнозування геометрії не лише у формуючому

каналі, а і в предканалі, тобто для формуючих головок з більш складною геометрією. Оскільки будь-який процес моделювання коротший і менш дорогий ніж метод проб і помилок при виготовленні головок, це дає можливість підвищити ефективність їх проектування і виробництва в цілому.

За результатами даного експерименту здійснювалась перевірка достовірності числового моделювання задачі оберненої екструзії для проектування форми формуючого перерізу каналу головки, необхідного для досягнення заданих розмірів профільних виробів.

**У четвертому розділі** подано практичне використання результатів роботи.

Представлено розроблені та запатентовані конструкції екструзійних головок, які забезпечують поглинання пульсацій розплаву і зменшують кількість виробів з дефектами геометрії.

Результат співставлення натурального експерименту і числового моделювання оберненої задачі екструзії полімерного профілю для обчислення необхідної геометрії вихідної ділянки формуючого каналу головки підтверджує можливість і доцільність використання даної методики для досягнення заданих параметрів геометрії цільового профілю.

Експериментально змодельована кінцева ділянка формуючого каналу головки необхідної форми для компенсації ефекту розбухання екструдату після виходу з головки і отримання екструдованого профілю заданої форми представлено на рисунку 12.

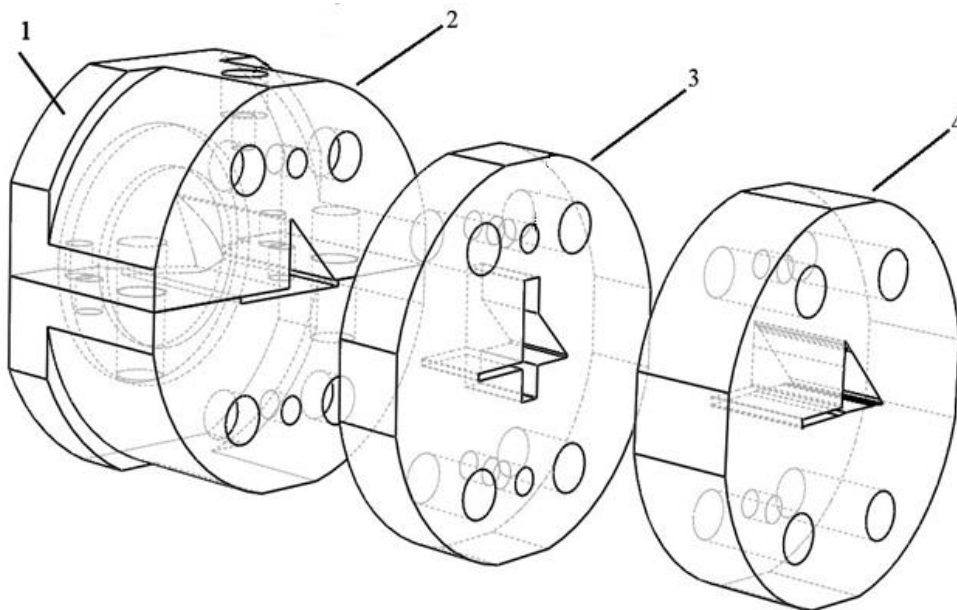


Рисунок 12 – Змодельована геометрія секцій головки для виробництва L-"подібного" однокамерного порожнього профілю

1 – монтажна пластина; 2 – пластина адаптер; 3 – предпластина; 4 – пластина кінцевого формуючого каналу головки

Розроблені технічні рішення і методика розрахунків технологічних режимів формування виробів і конструктивних параметрів обладнання для переробки полімерних композицій впроваджені на полімеропереробних підприємствах.

У додатках наведено методику розрахунку геометрії формуючих каналів профільних погонажних екструзійних головок; методику проведення розрахунку каналів профільних екструзійних головок для формування полімерних погонажних виробів методом оберненої екструзії, а також документи, що підтверджують впровадження результатів досліджень.

## ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу існуючих реологічних моделей та процесів екструзійного формування обґрунтована доцільність використання в'язкопружної моделі ФТТ для врахування явища розбухання.

2. Експериментально визначені матеріальні коефіцієнти реологічної моделі ФТТ дозволяють здійснювати розрахунок параметрів процесу течії в'язкопружної рідини в формуючому каналі з врахуванням ефекту розбухання розплаву полімеру в зоні вільної поверхні на виході з формуючого інструменту, що дає можливість передбачити неоднорідність та властивості полімерних виробів.

3. Створено методику експериментальних досліджень реологічних параметрів матеріалу і характеру ефекту розбухання полімерного матеріалу після виходу з формуючого інструменту.

4. Встановлена кореляція між числовими та натурними експериментами зі збіжністю в межах до 16 %, що підтверджує адекватність розробленої аналітичної моделі та створеного гідродинамічного моделювання скінченно-елементної моделі, на якій проводились числові експерименти.

5. Виконано числове моделювання параметрів геометрії останньої ділянки формуючого каналу, яке дало можливість отримати варіант оптимізованої геометрії вихідної області формуючого каналу головки і задану цільову форму виробу.

6. Створено методику моделювання процесу вільної екструзії, яка дозволила реалізувати алгоритм проектування формуючих каналів головки методом розв'язання оберненої задачі профілювання. Використання методики дає змогу досягати рівномірності витрати розплаву, скоротити довжину формуючих каналів, зменшити кількість периферійного обладнання та дозволить знизити перепад тиску в головці на 10 – 12 %, а відповідно енергетичні витрати на процес формування профільних погонажних виробів.

7. Показано з аналізу результатів розрахунків, що геометрія формуючих каналів головки, побудована за розробленою методикою дозволяє зменшити розбухання екструдату на виході з 14 – 18 % до 9 %.

8. Розроблено конструкцію екструзійної головки за результатами проектного розрахунку геометрії формуючих каналів, конструктивні пропозиції з уточненого профілювання формуючого інструменту методом вирішення оберненої задачі екструзії було передано та впроваджені на виробництві ТОВ НВП «ІНКІС» та ТОВ «Крок-95» (м. Чернігів).

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Kovalenko K. G.** Design of an Extrusion Die for Plastic Profiles / **K. G. Kovalenko**, V. I. Sivetskii, A. L. Sokol'skii et al. // Chemical and Petroleum Engineering. – January 2014. – Vol. 49, Issue 9. – P. 675–678. DOI: 10.1007/s10556-014-9817-x. (Входить до наукометричних баз Scopus, Chemical Abstracts). *Особистий внесок здобувача полягає у визначенні необхідної геометрії формуючого каналу головки на виході, яка визначає вирівнювання швидкостей розплаву в області вільної поверхні і геометрію перетину формуючого профілю.*
2. **Kovalenko K. G.** Modeling Polymer Melt Flow at the Outlet from an Extruder Molding Tool / **K. G. Kovalenko**, A. E. Kolosov, V. I. Sivetskii et al. // Chemical and Petroleum Engineering. – March 2014. – Vol. 49, Issue 11. – P. 792–797. DOI: 10.1007/s10556-014-9837-6. (Входить до наукометричних баз Scopus, Chemical Abstracts). *Особистий внесок здобувача полягає у встановленні, що зі збільшенням часу релаксації ступінь розширення екструдованого циліндричного струменя неньютонівської рідини збільшується і істотно перевищує розширення потоку новоутвореної рідини.*
3. Коваленко Г. М. Моделювання процесу екструзії у формуючому інструменті при формуванні куткового профілю / Г. М. Коваленко, **К. Г. Коваленко** // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2011. – № 4/7 (52). – С. 9-11. *Особистий внесок здобувача полягає у складанні рівняння для розрахунку модернізації існуючої конструкції.*
4. Сахаров О. С. Змішування розплавів термопластів у коаксіальному зазорі / О. С. Сахаров, В. І. Сівецький, **К. Г. Коваленко** та ін. // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження – 2012. – № 1 (9). – С. 57-59. *Особистий внесок здобувача полягає у виконанні числового моделювання процесу змішування у коаксіальному зазорі.*
5. **Коваленко К. Г.** Дослідження процесу екструзії при формуванні куткових профілів з жорсткого ПВХ / **К. Г. Коваленко**, Г. М. Коваленко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – № 1/8 (55). – С. 11-13. *Особистий внесок здобувача полягає в отриманні експериментальних даних залежності продуктивності екструзійної лінії від типорозміру отриманого виробу.*
6. Акимов О. О. Дослідження процесу формування погонажних виробів з жорсткого ПВХ на екструзійній лінії ЛП-45 / О. О. Акимов, Г. М. Коваленко, **К. Г. Коваленко** // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. – 2012. – № 1 (55). – С. 35-39. *Особистий внесок здобувача полягає в отриманні залежності параметрів формування полімеру від геометрії внутрішньої поверхні інструменту і технологічних параметрів.*
7. Сокольський О. Л. Дослідження ефекту розбухання при екструзійному формуванні полімерних профілів / О. Л. Сокольський, М. А. Романченко, **К. Г. Коваленко** // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Нові рішення в сучасних технологіях. – 2013. – № 26 (999). – С. 84-88. *Особистий внесок здобувача полягає у виконанні*

*дослідження залежності розбухання екструдованого профілю від умов прилипання матеріалу на стінках формуючого каналу екструдера.*

8. **Коваленко К. Г.** Особливості течії в'язкопружної рідини в дисковому зазорі екструдера / **К. Г. Коваленко**, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2013. – № 1 (11). – С. 16-19. *Особистий внесок здобувача полягає у виконанні розрахунку розподілу швидкостей і тиску в дисковому зазорі й каналі модельного дискового екструдера.*

9. **Коваленко К. Г.** Методика розв'язання зворотної задачі екструзійного формування термопластів / **К. Г. Коваленко**, В. І. Сівецький, О.Л. Сокольський та ін. // Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов. – 2013. – № 4 (37). – С. 177-183. *Особистий внесок здобувача полягає у виконанні моделювання методики розв'язання оберненої задачі екструзії.*

10. **Коваленко К. Г.** Проектирование экструзионного формующего инструмента для пластикового профиля с помощью программы AnsysPolyflow / **К. Г. Коваленко**, В. И. Сивецкий, А. Л. Сокольский // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 10. – С. 25-27. *Особистий внесок здобувача полягає у виконанні розрахунку геометрії формуючого каналу головки, яка забезпечує збалансовані витрати і необхідну конфігурацію профілю екструдату на виході з головки.*

11. **Коваленко К. Г.** Моделирование процесса течения расплава полимера при выходе из формующего инструмента экструдера / **К. Г. Коваленко**, А. Е. Колосов, В. И. Сивецкий и др. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 12. – С. 15-19. *Особистий внесок здобувача полягає у виконанні числового моделювання процесу течії розплаву полімерного матеріалу на виході з формуючого інструменту.*

12. Кушнир М. С. Моделирование процесса плавления полимеров в каналах червячных экструдеров / М. С. Кушнир, В. И. Сивецкий, **К. Г. Коваленко** и др. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 11. – С. 29-33. *Особистий внесок здобувача полягає у виконанні числового моделювання процесу плавлення полімеру в черв'ячному каналі екструдера.*

13. Патент на корисну модель № 81464 України, МПК (2009) G01N11/14. Спосіб визначення коефіцієнта динамічної в'язкості пристінного шару розплавів термопластичних полімерів з урахуванням коефіцієнта пристінного тертя / Колосов О. Є., Сівецький В. І., **Коваленко К. Г.** та ін. – u№ 201302110; заявл. 20.02.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 4 с. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні досліджень, написані та оформленні патенту.*

14. Патент на корисну модель № 81465 України, МПК (2009) G01N11/14. Спосіб визначення коефіцієнта тертя ковзання для пари «термопластичний полімер – сталь» у залежності від температури / Колосов О. Є., Сівецький В. І., **Коваленко К. Г.** та ін. – u№ 201302111; заявл. 20.02.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 4 с. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні комп'ютерних розрахунків.*

15. Патент на корисну модель № 81466 України, МПК (2009) G01N11/14. Спосіб визначення ефективного гідравлічного радіуса при течії розплавів полімерів

у каналах довільного перетину / Колосов О. Є., Сівецький В. І., **Коваленко К. Г.** та ін. – u№ 201302112; заявл. 20.02.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 5 с. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні досліджень, написанні та оформленні патенту та матеріалів заявки.*

16. Патент на корисну модель № 81467 України, МПК (2009) G01N11/14. Спосіб визначення реологічних параметрів течії розплавів термопластичних полімерів в каналах довільної геометрії / Колосов О. Є., Сівецький В. І., **Коваленко К. Г.** та ін. – u№ 201302113; заявл. 20.02.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 7 с. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні досліджень, написанні та оформленні патенту.*

17. Патент на корисну модель № 81468 України, МПК (2009) G01N11/14. Спосіб приведення кривих течії розплавів термопластичних полімерів, неінваріантних відносно гідравлічного радіуса каналу, до інваріантного виду / Колосов О. Є., Сівецький В. І., **Коваленко К. Г.** та ін. – u№ 201302114; заявл. 20.02.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 7 с. *Здобувачем були проведені комп'ютерні розрахунки.*

18. Патент на корисну модель № 82157 України, МПК B29C 47/14. Головка екструзійна / Сівецький В. І., Рослов О. В., **Коваленко К. Г.** та ін. – u№ 201300518; заявл. 15.01.2013; опубл. 25.07.2013, Бюл. № 14. – 4 с. *Здобувачем було запропоновано з'єднати матрицю з корпусом за допомогою пружного елемента з можливістю зворотно-поступального руху.*

19. Патент на корисну модель № 82205 України, МПК B29C 47/14. Головка екструзійна / Сівецький В. І., Рослов О. В., **Коваленко К. Г.** та ін. – u№ 201300518; заявл. 15.01.2013; опубл. 25.07.2013, Бюл. № 14. – 3 с. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні комп'ютерних розрахунків.*

20. Акимов О. О. Дослідження процесу формування погонажних виробів з жорсткого ПВХ на екструзійній лінії ЛП-45 / О. О. Акимов, Г. М. Коваленко, **К. Г. Коваленко** // I Міжнар.наук.-практ. конф.: Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: Мат. конф.– Чернігів, 2011. – С. 110-111.

21. **Коваленко К. Г.** Використання в'язкопружних моделей при розрахунках екструзії полімерних матеріалів / **К. Г. Коваленко**, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський та ін. // Наук.-практ. конф.: Ресурсоенергоєфективні процеси, технології та обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів: Зб.доп. – К.: Січкар, 2012. – С. 28-29.

22. **Коваленко К. Г.** Моделювання течії розплаву полімеру на виході з формуючого інструмента екструдера / **К. Г. Коваленко**, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський // Наук.-практ. конф.: Ресурсоенергоєфективні процеси, технології та обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів: Зб.доп. – К.: Січкар, 2013. – С. 51-52.

23. **Коваленко К. Г.** Проектування екструзійного формуючого інструменту для погонажного профілю за допомогою програми ANSYS Polyflow / **К. Г. Коваленко**, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський // XIV міждун. науч.-техн.конф.: Технологія і інженерне образование: Тези доп. – Севастополь, 2013. – С. 58-60.

24. **Коваленко К. Г.** Оптимізація конструкції формуючих каналів екструзійних головок для виробництва погонажних профільних виробів / **К. Г. Коваленко**,

В. І. Сівецький // Всеукр. наук. конф. молодих учених та студ.: Сучасні технології одержання композиційних матеріалів, хімічних волокон і нанокompозитів: Тези доп. – Київ, 2013. – С. 38.

25. Сивецкий В. И., Колосова Е. П., Кривошеев В. С., Сокольский А. Л., **Коваленко К. Г.**, Кушнир М. С. Технология формования изделий из полимерных композиционных материалов с применением интенсифицирующих методов. – Свидетельство о депонировании произведения в БД РАО «Копирус» (г. Москва) № 014-003246 от 10.04.2014г. ISBN 978-5-4472-3199-6. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні комп'ютерних розрахунків.*

26. Сивецкий В. И., Колосова Е. П., Кривошеев В. С., Сокольский А. Л., **Коваленко К. Г.**, Кушнир М. С. Моделирование технологических процессов и оборудования для формования изделий из полимерных композиционных материалов. – Свидетельство о депонировании произведения в БД РАО «Копирус» (г. Москва) № 014-003247 от 10.04.2014г. ISBN 978-5-4472-3200-9. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні комп'ютерних розрахунків.*

## АННОТАЦИЯ

**Коваленко К. Г. Экструзионное формирование погонажных изделий из полимерных материалов с учетом их вязкоупругих свойств.** - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 - процессы и оборудование химической технологии. - Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" МОН Украины, Киев, 2017.

Диссертационная работа посвящена исследованию вязкоупругих свойств полимерных материалов при экструзионном формировании полимерных погонажных профильных изделий в каналах перерабатывающего оборудования и на выходе из них.

В процессе исследований установлено, что использование реологической модели Фан-Тьен-Таннера, при моделировании вязкоупругих течений в профильных экструзионных головках, позволяет реалистично оценить вязкоупругое поведение расплава полимера на выходе из формирующего инструмента экструдера, предположить и учесть эффекты разбухания полимерного материала, облегчает численное моделирование процесса экструзионного формования погонажных изделий. Это позволяет более точно учесть изменение сечения экструдированных погонажных профилей на выходе из формирующего инструмента.

Разработана методика экспериментальных исследований реологических параметров материала и характера эффекта разбухания полимерного материала после выхода из формирующего инструмента. Использование модели Фан-Тьен-Таннера при моделировании течения вязкоупругих жидкостей на выходе из формирующего инструмента экструдера позволяет рассчитать изменение сечения экструдированных погонажных изделий.

Разработана методика и технологические рекомендации конструктивного профилирования формирующих каналов при свободной экструзии, которые

обеспечивают изготовление полимерного профиля заданного сечения, что позволяет избавиться от калибровочных устройств.

Разработана методика экспериментальных исследований реологических параметров материала и характера эффекта разбухания полимерного материала после выхода из формирующего инструмента. Установленная корреляция между численными и натурными экспериментами подтверждает адекватность разработанной аналитической модели и созданного гидродинамического моделирования конечно-элементной модели, на которой проводились численные эксперименты.

Прогнозирование геометрии последнего участка формирующего канала позволило получить вариант оптимизированной геометрии исходящей области формирующего канала головки и заданную целевую форму изделия. Разработанная методика моделирования процесса свободной экструзии позволила реализовать алгоритм проектирования формирующих каналов головки методом решения обратной задачи профилирования, что позволило при известных параметрах получаемого экструзией изделия проектировать необходимую конфигурацию фильеры, а также снизить энергетические затраты до 10 % или увеличить производительность процесса до 14 %.

Использование разработанной модели позволяет корректировать технологические режимы и конфигурацию каналов в численных экспериментах, достигая равномерности расхода расплава и оптимизируя другие заданные параметры.

Анализ результатов расчета показывает, что геометрия формирующих каналов головки, построенная по изложенной методике, позволяет уменьшить разбухание экструдата на выходе с 14 – 18 % до 9 %.

*Ключевые слова:* полимер, вязкоупругие свойства, полимерные погонажные изделия, свободная экструзия, моделирование, профилирование.

## АНОТАЦІЯ

**Коваленко К. Г. Екструзійне формування погонажних виробів з полімерних матеріалів з урахуванням їх в'язкопружних властивостей.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" МОН України, Київ, 2017.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню в'язкопружних властивостей полімерних матеріалів при екструзійному формуванні полімерних погонажних профільних виробів у каналах переробного обладнання та на виході з них.

Розроблено методику експериментальних досліджень реологічних властивостей матеріалу і характеру ефекту розбухання полімерного матеріалу після виходу з формуючого інструменту. У процесі досліджень встановлено, що використання моделі Фан-Тьєн-Таннера при моделюванні течії в'язкопружних рідин на виході з формуючого інструменту екструдера дозволяє розрахувати зміну

поперечного перерізу екструдованих погонажних виробів. Прогнозування геометрії останньої ділянки формуючого каналу дозволило отримати варіант оптимізованої геометрії вихідної області формуючого каналу головки і задану цільову форму екструдованого виробу. Розроблена методика моделювання процесу вільної екструзії дозволила реалізувати алгоритм проектування формуючих каналів головки методом вирішення оберненої задачі профілювання, що дало можливість за умови відомих параметрів одержуваного екструзією виробу проектувати необхідну конфігурацію фільтри екструзійної головки. Розроблено конструкцію екструзійної головки за результатами проектного розрахунку геометрії головки, конструктивні пропозиції щодо уточненого профілювання формуючого інструменту методом вирішення оберненої задачі екструзії.

*Ключові слова:* полімер, в'язкопружні властивості, полімерні погонажні вироби, вільна екструзія, моделювання, профілювання.

## ANNOTATION

**Kovalenko K. G. Extrusion forming molded products from polymeric materials based on their viscoelastic properties.** – The manuscript.

Thesis for a Philosophy Doctor (eng.) degree on specialty 05.17.08 – processes and equipment of chemical technology. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" MES of Ukraine, Kyiv, 2017.

The thesis is devoted to research the viscoelastic properties of polymeric materials during extrusion molding, polymer-molded products in specialized processing equipment channels and output them.

The experimental research method of the rheological material parameters and the nature of the polymeric material swelling effect after leaving the forming tool were developed. Using Phan-Tien-Tanner model of the viscoelastic flow modeling fluid at the extruder outlet forming tool lets to calculate the change section of extruded moldings. Prediction geometry of the last forming channel section made it possible to get an optimized original geometry version of the die channel forming region and form desired target product. The developed procedure of the modeling process made it possible to realize the algorithm of free extrusion molding implement design channels die by solving "inverse problem" profiling, which allowed with the known parameters of the extruded product, to design the necessary extrusion die configuration. The design of the extrusion die according by the project calculating results of die geometry and the constructive proposals for improved forming tool profiling by the "inverse extrusion" method were developed.

*Key words:* polymer, viscoelastic properties, polymer molded products, free extrusion, modeling, profiling.