

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

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Коваленко Ксенія Геннадіївна

УДК 678.027.3(043.3)

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

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

05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології  
технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ К. Г. Коваленко

Науковий керівник

Сівецький Володимир Іванович кандидат технічних наук, професор

Київ – 2018

## 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.

Проведений аналітичний аналіз сучасного стану дослідження потоку полімеру показав недостатню дослідженість особливостей течії в'язкопружних рідин, зокрема, ефекту розбухання в зонах виходу з формуючих каналів більш складного перетину, ніж круглого або прямокутного і відсутність методів профілювання формуючих каналів для компенсації ефекту розбухання. Існуючі в'язкопружні реологічні моделі і методики обліку при розрахунку умов проковзування і в'язкопружних властивостей течії розплаву полімеру в формуючих каналах інструменту мають необхідну доцільність використання найбільш реалістичної і якісної реологічної моделі, яка враховує явище розбухання

У процесі досліджень встановлено, що використання реологічної моделі Фан-Тьєн-Ганнера (ФТГ), для моделювання в'язкопружної течії в профільних екструзійних головках, дозволяє реалістично оцінити в'язкопружну поведінку розплаву полімеру на виході з формуючого інструменту екструдера, припустити і врахувати ефекти розбухання полімерного матеріалу, полегшує числове моделювання процесу екструзійного формування погонажних виробів. Це дозволяє більш точно врахувати зміну перерізу екструдованих погонажних профілів на виході з формуючого інструменту.

Розроблена методика експериментальних досліджень реологічних параметрів полімерного матеріалу і його розбухання після виходу з формуючого інструменту.

Експериментально визначені реологічні параметри, які дозволяють точніше здійснювати розрахунок параметрів процесу течії в'язкопружної рідини у формуючому каналі та враховувати ефекти розбухання розплаву полімеру в зоні вільної поверхні при виході з формуючого інструменту, що дозволяє прогнозувати неоднорідність і властивості полімерних виробів.

Наведено результати експериментальних та числових досліджень і методичку 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.

Установлена кореляція між числовими та натурними експериментами підтверджує адекватність розробленої аналітичної моделі та створеного гідродинамічного моделювання кінцево-елементної моделі, на якій проводилися числові експерименти.

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 в'язкопружних властивостей рідини при моделюванні течії з використанням моделі ФТТ дозволяє визначити межі області перебудови екструдованого профілю і здійснювати обґрунтований вибір параметрів формуючого інструменту.

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 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. Це дозволить зменшити перепад тиску в головці на 10-12 %, а відповідно енергетичні витрати на процес формування профільних погонажних виробів.

Розв'язок оберненої задачі полягає у визначенні необхідної форми каналу головки для забезпечення умови отримання виробу заданої геометрії. Моделювання на першому етапі проводиться 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 є реалізація алгоритму Флетчера-Рівса, який застосовано для визначення геометрії формуючого каналу головки з метою забезпечення бажаної форми екструдованого профілю.

Прогнозування геометрії останньої ділянки формуючого каналу дало можливість отримати варіант оптимізованої геометрії вихідної області формуючого каналу головки для формування заданої геометрії виробу.

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.

Методика поєднує наближену аналітичну і уточнену скінченно-елементну моделі, що дозволяє здійснювати проектний розрахунок конфігурації формуючих каналів екструзійних головок для формування виробів з полімерних матеріалів з урахуванням їх реологічних властивостей. Використання розробленої моделі дозволяє коригувати технологічні режими і конфігурацію каналів в числових експериментах, досягаючи рівномірності витрати розплаву і оптимізуючи інші задані параметри.

Розроблено методику та технологічні рекомендації конструктивного профілювання формуючих каналів при вільному екструзійному формуванні, які

забезпечують виготовлення полімерного профілю заданого перерізу, що дозволяє позбутися необхідності використання калібруючих пристроїв.

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, проводити уточнення геометрії формуючого каналу головки і отримання екструдованого профілю заданої форми, а також дозволило знизити енергетичні витрати до 10 % чи збільшити продуктивність процесу формування до 14 %.

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.

Геометрія формуючих каналів головки, побудована за розробленою методикою, дозволяє зменшити розбухання екструдату на виході з 14 – 18 % до 9 %.

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

Науково-технічні результати дисертаційної роботи впроваджено у промислових зразках переробного обладнання у вигляді технологічних рекомендацій на ТОВ НВП «ІНКОС» м. Чернігів та ТОВ «Крок-95», що призвело до зросту економічного ефекту на 7 %.

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

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, Springer).

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, Springer).

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.

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.

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.

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.

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.

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.

9. Коваленко К. Г. Методика розв'язання оберненої 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.

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.

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.

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.

13. Патент на корисну модель № 81464 Україна, 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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.: Січкара, 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.: Січкара, 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 міжун. науч.-техн.конф.: Технология и инженерное 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.

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.

## 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 analytical analysis of modern research polymer flow state has revealed the insufficient research of viscoelastic fluids flow features, in particular, of the swelling effect in zones of outlet formation channels of a more complex cross section than round or rectangular and the absence of profiling forming channels methods for compensation of the swelling effect. Existing viscoelastic rheological models and accounting methods, while calculating the slip conditions and viscoelastic polymer melt flow properties in the forming instrument channels, have the necessary expediency to use the most realistic and qualitative rheological model that takes into account the swelling phenomenon.

In the research process it was found that the use of Phan-Tien-Tanner rheological model (PTT) for modeling the viscoelastic flow in profile extrusion dies allows us to evaluate realistically the viscoelastic polymer melt behavior at the output extruder forming tool, to assume and take into account the swelling polymeric material effects, facilitates numerical simulation of the extrusion formation molded products process. This allows to take into account the output cross-section extruded molded profiles change of the forming tool more accurately.

The experimental research method of rheological material parameters and the nature of the polymeric material swelling effect after leaving the forming tool have been developed.

The rheological constants that allow to calculate accurately the parameters of the viscoelastic fluid flow in the forming channel and to take into account the polymer melt swelling effects in the free surface zone when leaving the forming tool which suggests the heterogeneity and polymer products properties have been experimentally determined.

The experimental and numerical research results and the refined design geometry methodology of forming channels for the various molded profile products production are given. It includes the stages of the previous free extrusion process modeling and the implementation of the designing the forming die channels algorithm by solving the inverse profiling method.

The correlation between numerical and natural experiments has been established and confirms the adequacy of the developed analytical model and the CFD modeling of the finite-element model which carried out numerical experiments.

The numerical research results show that in the case of forming channels with geometry that corresponds to a given extruded profiles section, the actual cross section may significantly differ from the target. The consideration of the viscoelastic fluid properties in the flow modeling using the FTT model were proposed and allows to determine the limits of the extruded profile rearrangement region and to make a reasonable choice of the forming tool parameters.

The profile extrusion through a forming recommended length channel of the initial forming channel provides stress relaxation and minimizes the swelling effect. The channel length and, hence, the hydraulic resistance are quite large in this case. With the forming channels length decrease, the swelling phenomenon becomes more significant - the extrudate form is distorted. Taking into account the conditions of the extrudate viscoelastic properties when solving the inverse extrusion profile products problem can reduce the forming channels length by its configuration adjusting. This will reduce the pressure drop in the die by 10-12 % and, accordingly, the energy costs of the profile molded products formation.

The inverse problem solution consists in determining the necessary die channel form to ensure the given geometry condition of obtaining product. The first stage modeling is carried out without taking into account the compensating extrudate swelling possibility and other effects. Such an iterative model results show the polymer flow particularities and the determination region with slow polymer material motion, which may lead to the shape extruded product distortion or to its local decomposition.

Based on the results obtained in the previous modeling, the next step is the Fletcher-Reeves algorithm implementation, which is used to determine the forming die channel geometry in order to provide the desired extruded profile form.

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 computational CFD modeling power also allows the geometry prediction not only in the forming channel, but also in the pre-channel, that is, for forming complex geometry dies. Since any simulation process is shorter and less expensive than the

method of trial and error in the die manufacture, this makes it possible to improve the efficiency of their design and production in general.

The method combines the approximate analytical and refined finite-element model, which allows to carry out the design calculation of the extrusion dies forming channels configuration for the polymeric materials products formation, taking into account the dependence of rheological properties. Using the developed model allows you to adjust the technological modes and channel configuration in numerical experiments, achieving the uniformity of the melt flow and optimizing other specified parameters.

The methodology and technological recommendations for constructive forming channels profiling at free extrusion formation which ensure the production of a given polymer profile section that allows to get rid of calibration devices have been developed.

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, and also allowed to reduce energy costs to 10 % or increase productivity forming process up to 14 %.

The comparison inverse extrusion a polymeric profile problem result of a real experiment and a numerical modeling for calculating the required geometry of the forming die channel initial region confirms the possibility and feasibility of using this technique to achieve the specified target profile geometry parameters.

Analysis of the calculation results shows that the die forming channel geometry, constructed according to the developed method, allows to reduce the output extrudate swelling from 14 – 18 % to 9 %.

The developed and patented designs of extrusion dies are provided, which ensure the melt fluctuations absorption and reduce the number of geometry defected products.

The scientific and technical thesis results were introduced in industrial processing equipment samples in the form of technological recommendations to INCOS LLC in Chernihiv and Krok-95 LLC, which led to a 7 % increase in the economic effect.

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

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів і скорочень .....	15
Вступ .....	17
1 Аналітичний огляд стану проблеми та обґрунтування напрямку роботи...	25
1.1 Дослідження в'язкопружних властивостей течії розплавів термопластів та розбухання екструдату при витіканні розплавів полімерів з формуючих каналів устаткування для виробництва профільних погонажних виробів.....	25
1.2 Течія і розбухання розплавів полімерів через канали складної форми..	33
1.3 Числові дослідження течії неньютонівських рідин .....	39
1.3.1 Огляд та вибір диференціальної моделі в'язкопружної поведінки розплавів полімерів неньютонівських рідин.....	41
1.4 Висновки до розділу 1 і завдання досліджень .....	47
2 Математичне та числове моделювання процесів формування виробів екструзійним методом.....	50
2.1 Математична модель процесу екструзійного формування профільних погонажних виробів.....	50
2.2 Експериментальна установка та методика дослідження параметрів реологічної моделі .....	55
2.3 Апробація результатів числового моделювання і експериментального випробування в промислових умовах.....	66
2.4 Математична модель проектування зразка каналу профільної погонажної головки методом оберненої екструзії.....	74
2.5 Оцінка достовірності експериментальних даних .....	76
2.6 Висновки до розділу 2.....	83
3 Моделювання та числовий алгоритм проектування каналів формуючого інструменту .....	85
3.1 Числовий експеримент для дослідження параметрів течії розплаву полімерів у формуючих каналах профільних погонажних головок.....	85
3.1.1 Течія через кільцевий циліндричний канал (труба).....	86
3.1.2 Течія через формуючий канал круглого поперечного перерізу.....	92
3.1.3 Течія через формуючий канал прямокутного поперечного перерізу....	98

3.1.4 Моделювання течії розплаву через формуючий канал порожнього квадратного поперечного перерізу .....	104
3.2 Числовий експеримент дослідження експериментального зразка профільних погонажних головок для процесу вільного екструзійного формування .....	112
3.3 Моделювання і числовий алгоритм проектування зразка каналу профільної погонажної головки методом оберненої екструзії.....	128
3.3.1 Моделювання і числовий алгоритм проектування L-"подібного" однокамерного полого профілю методом оберненої екструзії.....	134
3.4 Висновки до розділу 3.....	141
4 Впровадження і рекомендації .....	145
4.1 Коефіцієнта динамічної в'язкості.....	145
4.2 Коефіцієнт тертя.....	146
4.3 Ефективний гідравлічний радіус.....	147
4.4 Реологічні параметри течії.....	149
4.5 Приведення кривих течії в каналах наперед заданої геометрії розплавів	149
4.6 Головка екструзійна .....	150
4.7 Головка екструзійна.....	151
4.8 Апробація результатів числового моделювання і експериментального випробування в промислових умовах.....	153
4.9 Впровадження результатів науково-технічних розробок .....	158
4.10 Висновки до розділу 4.....	159
Висновки .....	160
Перелік посилань.....	162
Додаток А Методика розрахунку профілів профільних погонажних екструзійних головок .....	176
Додаток Б Методика проведення розрахунку каналів профільних погонажних екструзійних головок методом оберненої екструзії.....	181
Додаток В Документи, що підтверджують впровадження результатів роботи	193

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

$k$  – коефіцієнт тертя;

$L$  – довжина каналу, мм;

$n$  – індекс течії;

$P$  – тиск, Па;

$Q$  – об'ємна витрата, мм<sup>3</sup>/с;

$T$  – температура, °С;

$\dot{\gamma}$  – швидкість зсуву, с<sup>-1</sup>;

$v$  – швидкість, м/с;

$\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;

$\tau_1$  – в'язкопружна компонента;

$\tau_2$  – пружна компонента;

$\lambda_1$  – час релаксації для розплаву, с;

$\lambda_2$  – час ретардації для розплаву, с;

$\overset{\nabla}{\tau}$  – верхня конвективна похідна;

$\overset{\Delta}{\tau}$  – нижня конвективна похідна;

$\eta$  – постійна зсувна в'язкість, Па·с;

$\eta_1$  – динамічна в'язкість, Па·с;

$\eta_2$  – об'ємна в'язкість, Па·с;

$\eta_r$  – неньютонівський вклад в загальну в'язкість, Па·с;

$\xi$  – матеріальний параметр, який контролює зсувну в'язкість;

$\varepsilon$  – матеріальний параметр, який контролює розширювальну здатність розплаву;

$\dot{\mathbf{D}}$  – швидкість зміни тензора деформації, с<sup>-1</sup>;

$\nabla$  – оператор Гамільтона, м<sup>-1</sup>;

$\mathbf{I}$  – одиничний тензор;

$F_{slip}$  – коефіцієнт ковзання (тертя) на поверхні каналу, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$e_{slip}$  – параметр матеріалу;

$\alpha$  – матеріальна константа;

De – число Дебори ;

We – число Вайссенберга.

Основні скорочення:

ПАТ – публічне акціонерне товариство (при назві установи);

НВП – науково-виробниче підприємство (при назві установи);

ТОВ – товариство з обмеженою відповідальністю;

НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського – Національний технічний університет  
України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

ПЕНТ – поліетилен низького тиску;

ПВХ – полівінілхлорид;

ПЕВТ – поліетилен високого тиску;

ПС – полістирол;

ФТТ – Фан-Тьен-Таннер;

ФР – Флетчер-Рівс.



## ВСТУП

Для забезпечення внутрішнього ринку України імпорт профільних погонажних виробів перевищив 50 %. У багатьох галузях промисловості, будівництва та народного господарства широко використовуються різноманітні профільні погонажні полімерні вироби, які зокрема виготовляють методом вільної екструзії. В даному процесі гомогенізований розплав полімеру нагнітається через екструзійну головку, в якій відбувається формування бажаної конфігурації погонажних виробів без взаємодії з калібрувальним інструментом і додаткової механічної обробки.

Внаслідок в'язкопружних властивостей розплавів полімерів при їх вільній екструзії спостерігаються такі негативні явища, як спотворення конфігурації екструдованих виробів, то це необхідно враховувати при розробці технології та конструкції формуючого інструменту. В той же час конфігурація полімерних виробів урізноманітнюється, а процес проектування геометрії і формуючих каналів ускладнюється також за рахунок того, що розплави полімерів, з яких формують вироби, змінюють свої в'язкопружні властивості як в процесі підготовки в екструдері, так і під час течії у каналах формуючого інструменту та на виході з них. Це ускладнює моделювання процесів вільного екструзійного формування.

Багатьма авторами інтенсивно досліджуються течії реологічно складних середовищ в різних каналах. Конфігурації формуючих каналів та полімерних виробів ускладнюються, а рецептура композицій, з яких формують полімерні вироби, постійно змінюються, що також ускладнює моделювання цих процесів, особливо за наявності вільних та контактуючих поверхонь на виході каналів.

В силу складності і великого обсягу розрахунків при моделюванні процесів формування виробів складної геометрії, такі розрахунки нині виконуються за допомогою обчислюваної техніки та унікального програмного забезпечення на математичній базі методів скінченних елементів й контрольних об'ємів. Такі програмні продукти визначають пріоритет розробника в певній галузі і мають значну наукову та комерційну цінність.

При переробці полімерів спостерігається цілий ряд реологічних явищ, зокрема таких як пам'ять накопичених деформацій і ефекти розбухання екструдату,

зумовлених характерною для кожного з них наявністю певного часу релаксації напружень. Тому при числовому моделюванні процесів вільного екструзійного формування погонажних полімерних виробів потрібно враховувати вказані ефекти в'язкопружної поведінки полімерів, пов'язану з їх здатністю запасати пружну енергію, яка частково може бути "повернута розплавом" при зміні умов деформування та в наслідок його високоеластичності. Зокрема, окрім таких реологічних характеристик полімерів, як зсувна в'язкість, яка є функцією швидкості зсуву, необхідно враховувати повздовжню в'язкість, і вплив нормальних напружень на поведінку екструдованого розплаву полімеру в області збіжної течії з формуючого отвору екструзійної головки [1].

Незважаючи на виняткову важливість проблеми, кількість публікацій по результатах досліджень поведінки розплавів полімерів в області збіжних потоків, впливу на них в'язкопружних властивостей полімерів, конфігурації формуючих каналів складної геометричної форми і процесів, що відбуваються безпосередньо на виході з них на зміну конфігурації екструдованих профілів, недостатня. Піонерськими публікаціями результатів досліджень збіжних потоків можна вважати роботи Спенсера і Діллона [2], Беглі і Шрайбера [3] і Торделла [4] про механізми руйнування розплаву, Хана і Дреклера [5] про механізм руйнування розплаву при витіканні з каналу і про вплив нормальних напружень, Хана і Кіма [6] з оцінки впливу в'язкості розплаву на перепад тиску, тощо.

У роботах Фан-Гьена, Таннера, Мітсуліса, Хассагера [7-10] було запропоновано декілька математичних моделей опису течії збіжних потоків для каналів простої конфігурації. Показана необхідність вибору тієї чи іншої реологічної моделі в залежності від розгалуженості молекулярної структури полімеру, швидкості зсуву, наявності ефекту ковзання розплаву по стінах каналів, тощо.

Аналогічні дослідження ля каналів складного перетину розглядалися також роботи [45-50].

**Актуальність теми.** Профільні полімерні погонажні вироби різноманітного перерізу набули надзвичайно широкого розповсюдження в будівництві та інших

галузях промисловості й народного господарства. Виробництво багатьох типів таких полімерних виробів здійснюється на базі процесу вільного екструзійного формування, при якому гомогенізована в екструдері полімерна композиція нагнітається крізь головку для створення бажаної конфігурації поперечного перерізу заданого погонажного виробу без взаємодії з калібрувальним інструментом. Внаслідок в'язкопружних властивостей розплавів полімерів при їх витіканні з формуючого каналу головки проявляються ефекти спотворення конфігурації екструдованих профілів відносно геометрії формуючого каналу. Тому при проектуванні формуючих головок для виробництва профільних погонажних полімерних виробів необхідно враховувати закономірності розподілу швидкостей течії в каналах головки 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, але і від властивостей пластмас та технологічних параметрів процесу екструзії.

При проектуванні екструзійної головки виникає два основних питання, які необхідно вирішити: як, по можливості, зробити потік рівномірно розподіленим і як передбачити постекструзійні ефекти. До цього часу метод спроб і помилок був основним при розробці конструкції екструзійних головок, так як була відсутня методика, яка б враховувала всі вказані закономірності характерні для процесу вільної екструзії полімерів й особливо супроводжуючі його постекструзійні ефекти в області збіжних потоків. Тому актуальним є розробка і застосування методики розрахунку екструзійних головок, яка б враховувала всі особливості процесів екструзійної течії полімерів у формуючих каналах та прояву постекструзійних ефектів внаслідок характерних для них в'язкопружних властивостей. Це необхідно для вирішення проблеми неоднорідності як форми поверхні так і стабільності конфігурації екструдованих виробів шляхом розробки методик й оптимізації геометрії формуючого інструмента. При цьому значну роль відіграє числовий

експеримент [11, 12, 13], 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 полімерних профільних погонажних виробів.

Дана робота присвячена дослідженню процесу та обладнання реалізуючого процесу вільного екструзійного формування погонажних виробів з полімерного розплаву з урахуванням його в'язкопружних властивостей та вирішення проблеми неоднорідності форми поверхні і перетину профільних виробів 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 інструментах промислових екструдерів та в зоні вільної поверхні на виході з них і дослідження впливу в'язкопружних властивостей полімеру на геометричні параметри формуючих каналів полімерних погонажних виробів.

Внаслідок складності проблеми потрібна розробка нових підходів до математичного моделювання течії розплаву полімеру у формуючому інструменті з врахуванням здатності полімеру запасати пружну енергію деформації. Так як однорідність властивостей розплаву полімеру і, відповідно, якість отримуваної продукції істотно залежить від умов течії розплаву полімеру у формуючому

інструменті екструдера, нами було розроблено алгоритми для числового моделювання течії в'язкопружної рідини у вихідній області формуючої насадки екструдера та розв'язання задачі оберненої екструзії для оптимізації геометрії формуючого інструмента екструдера й технологічних параметрів процесу екструзії. Алгоритм включає в себе облік в'язкопружної поведінки полімеру, граничні умови проковзування полімеру на стінках формуючого каналу і матеріальні константи, що характеризують в'язкопружні властивості полімеру. В результаті числового моделювання отримані нові дані про структуру потоку. Показано, що врахування пружних властивостей розплавів полімерів приводить до значної зміни структури потоку, що, в свою чергу, зумовлює необхідність корегування як технологічних параметрів процесу екструзії, так і геометрії формуючих каналів.

Прогнозування потрібного профілю формуючого каналу головки для досягнення бажаної форми поперечного перерізу погонажних виробів є складним завданням і вимагає детального знання в'язкопружних характеристик матеріалу, особливості його течії, явищ теплообміну [14]. Для екструзійних виробів, які мають складну форму поперечного перерізу це є скоріше мистецтвом, ніж наукою в більшості випадків. Проектування головок для нового виробу здійснюють на основі попереднього досвіду і експериментів. У багатьох випадках дорогі експерименти і внутрішньозаводські випробування можуть бути замінені числовим моделюванням [11, 13]. Числове моделювання дає можливість виявлення таких важливих параметрів процесу екструзії, як розподіл швидкості течії полімеру в формуючих каналах головки, дотичне напруження, тиск і температурні поля, що неможливо або надзвичайно затратне зробити експериментально [14].

Як правило, конструкторам відома необхідна форма вихідної профілю, але не відома відповідна їм геометрія формуючих каналів головки. Необхідна форма каналів головки може бути визначена методом оберненого проектування. Формуючий канал повинен мати необхідну геометричну форму для компенсації деформації екструдату після виходу з головки внаслідок розбухання екструдату і фільтрної витяжки [13].

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 задачі 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.

**Наукова новизна отриманих 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 полягає в тому, що:**

– 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. Автору належить експериментальне дослідження коефіцієнтів розбухання, релаксації та параметрів реологічної моделі, розробка методик розрахунків геометричних параметрів формуючих каналів та проведення натурних досліджень і числових експериментів, впровадження результатів роботи.

Робота є результатом самостійних досліджень Коваленко Ксенії Геннадіївни.

**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, 2012-2013рр.); 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 нанокompозитів» (м. Київ, 2013 р.).



## АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ РОБОТИ

### 1.1 Дослідження в'язкопружних властивостей течії розплавів полімерів та розбухання екструдату при їх витіканні з формуючих каналів устаткування для виробництва профільних погонажних виробів

Для розплавів термопластів характерно не тільки в'язка, але і пружна поведінка (в'язкопружність). Цей тип поведінки характерний при течії полімерного розплаву в каналах екструзійної головки змінного поперечного перерізу каналу, в результаті чого виникає перепад тиску. Це відбувається внаслідок деформування розплаву в переходах між ділянками з різними поперечними перерізами каналу. Частина повної деформації при цьому складають пружні деформації. На виході з екструзійної головки пружні деформації проявляються у вигляді зміни форми і розмірів потоку, так зване «розбуханням» екструдату. Це зумовлено тим, що вивільняється енергія пружних деформацій, утворена в результаті зсувної деформації в каналах черв'ячних екструдерів та головці [15].

Здатність до оборотної деформації є наслідком, так званої, ентропійної пружності полімерних розплавів. Це означає, що макромолекули, які спочатку хаотично переплутані, можуть у процесі деформування значною мірою орієнтуватися в напрямку деформації. Однак як тільки це відбувається, орієнтована мережа прагне повернутися назад у стан максимально можливого безладу (на підставі другого закону термодинаміки). При течії в робочих каналах екструдера матеріал пристосовується до певного деформованого стану, проте поступово відбувається перегрупування макромолекул (так звана релаксація). Оскільки процес зниження орієнтованості макромолекул протікає повільно, він не завершується до моменту виходу матеріалу з екструзійної головки. У результаті процес релаксації продовжується і після виходу матеріалу з головки. Час, необхідний для завершення релаксації матеріалу з орієнтованого стану, скорочується із зростанням температури, оскільки в цьому випадку підвищується рухливість молекул. [15]

Відзначено, що розплав «запам'ятовує» деформований стан, якому він піддавався при проходженні через екструзійну головку. Це явище «ефекту пам'яті», характерно для в'язкопружних рідин, якими є розплави полімерів. Ці ефекти доставляють немало клопоту конструкторам і технологам при конструюванні технологічного оснащення та при відпрацюванні технологічного процесу виробництва виробів, особливо складної форми. Особливості течії конкретного полімерного матеріалу в каналах головки визначають, наскільки збільшаться розміри екструдату на виході з неї в результаті розбухання і як це відбивається на розмірах виробу, на ступені орієнтації матеріалу у виробі, а отже, і на його якості.

Однією з основних задач розрахунку екструзійних головок завжди вважалося визначення її гідравлічного опору, від якого залежать необхідний тиск, що розвивається шнеком екструдера на вході в головку, і відповідно продуктивність процесу. При цьому розплав полімерних матеріалів розглядають як в'язку ньютонівську або неньютонівську (наприклад, псевдопластичну) рідину, а його пружними властивостями зазвичай нехтують [15]. Для такого розрахунку необхідно знати розміри всіх каналів головки і насамперед розміри кінцевої частини головки (фільтери), так як саме в ній спостерігається максимальне падіння тиску. При подібному підході розміри формуючого каналу задаються, як правило, за рекомендаціями, за аналогією або, в крайньому випадку, «на око».

На даний час у вітчизняній практиці при конструюванні екструзійних головок, як правило, не враховують пружні властивості розплаву, тобто здатність розплаву запасати в результаті деформування пружну енергію (так званий «ефект пам'яті»). Метод проб і помилок був основним при проектуванні екструзійних головок. Визначення конструктивних параметрів головок для нового виробу здійснювалось на основі попереднього досвіду і експериментів. Сучасний стан обчислюваної техніки дозволяє в багатьох випадках замінити дорогі експерименти та внутрішньозаводські випробування числовим моделюванням. Це дає можливість встановлення таких важливих параметрів процесу екструзії, як розподіл швидкості течії полімеру в формуючих каналах головки, напружень, тиску і температури перероблюваного полімеру, що неможливо визначити експериментально і тим самим забезпечити умови обґрунтованого визначення конструктивних та технологічних параметрів процесів формування погонажних виробів.

В роботі [16] показано, що пружні властивості призводять до виникнення побічних ефектів, які необхідно враховувати при конструюванні головок. До їх числа належать: зміна тиску на вході в канали при зміні поперечного перерізу; циркуляційні течії на вході; розбухання екструдату на виході з каналу, внаслідок якого поперечні перерізу екструдату і каналу екструзійної головки розрізняються; зміна діаметру, зменшення довжини і збільшення товщини стінок трубчастої заготовки при екструзії з роздуванням, тощо.

Нехтування пружністю розплаву може призводити до відносно великих помилок зокрема при розрахунку втрат тиску. У роботі [16] справедливність цього твердження показана на прикладі течії високомолекулярного ПЕВП через видувну екструзійну головку.

Як показує практика, розрахункові значення падіння тиску завжди нижче вимірних, і ця помилка зростає з ростом тиску в головці. Ця помилка виникає внаслідок зневаги в розрахунковій моделі в'язкопружними ефектами.

До складу екструзійних головок завжди входить фільєра, яка зазвичай має ділянку з постійними розмірами поперечного перерізу. Довжина цієї ділянки вибирається з метою «заспокоєння» розплаву і забезпечення релаксацій накопичених при течії напружень і оборотних деформацій.

Період релаксації залежить від передісторії течії, температури і не є постійною величиною. Для опису поведінки в'язкопружних рідин використовують поняття «характерного часу релаксації», що представляє собою час протягом якого початкова напруження (або оборотна деформація) знижується до умовно-рівноважного стану, відповідного певній швидкості зсуву і температурі [17]. Вважають, що при рівноважній деформації течія має чисто зсувний характер.

Якщо характерний час релаксації більше часу течії розплаву у формуючому каналі, то стаціонарний стан не досягається і релаксація триває на виході з каналу і проявляється, наприклад, у розбуханні екструдату. Усунути повністю розбухання екструдату неможливо навіть при течії в дуже «довгих» каналах, так як запасена пружна енергія в розплаві не єдина причина розбухання. Перебудова профілю швидкостей від параболічного в каналі до плоского на виході з головки також вносить свій внесок у збільшення поперечного перерізу потоку, хоча внесок цього явища в розбухання не перевищує 10-20 % [17]. В даний час відзначається значний

інтерес до проблем вирішення завдань, пов'язаних зі збіжними течіями. Ці течії одержали велике прикладне значення в різних галузях науки і технології.

В першу чергу до них відносяться проблема вільної екструзії при переробці полімерних матеріалів при виробництві профільних погонажних виробів, при якому виріб, що вийшов з формуючої головки, більше не контактує з калібрувальним інструментом і не піддається додатковій витяжці і механічній обробці. У цьому випадку остаточні розміри і форма виробу залежать від ефекту розбухання (званого іноді Барус-ефектом).

Панов [17] досліджував неоднорідність розбухання екструдату при виході з формуючого інструменту. В ході експериментів він встановив, що на величину коефіцієнта розбухання екструдатів впливають молекулярні характеристики, технологічні умови, фізичні властивості матеріалу, а також геометричні параметри формуючих каналів. Коефіцієнт розбухання швидко зменшується при зростанні відносної довжини каналів. Така закономірність розбухання струменя полімерів вказує на те, що високоеластичні властивості розплавів при постійній деформації зсуву залежать від часу перебування матеріалу в каналі. Зменшення розбухання екструдованого струменя на виході з каналів при збільшенні їх відносної довжини пояснюється і тим, що розплави полімерів володіють так званою "пам'яттю" [19]. Панов зробив висновок також про те, що коефіцієнти розбухання екструдатів, отримані при витіканні розплавів з каналів складного поперечного перерізу, більші, ніж коефіцієнт розбухання екструдатів, отриманих в циліндричних каналах. Крім того, коефіцієнти розбухання екструдатів більше в тих випадках, коли у поперечного перерізу каналу, в якому вони були отримані, були виступаючі кути. При напірній течії розплаву полімеру виникають концентрації напруження і при виході потоку розплаву вони збільшують поперечне розбухання екструдату так, що нерівномірність напружень по перерізу в цілому для некруглого екструдату більше, ніж для потоку циліндричної форми.

Таннер [18] показав, що явище екструзійного розбухання може бути обумовлене двома факторами. Перший полягає в прояві пружних властивостей рідини. Другий - це перебудова профілю швидкостей при переході рідини з режиму течії Пуазейля до течії з вільною поверхнею.

Хан [19] вважає, що розбухання екструдату обумовлено релаксацією осьових

нормальних напруження на виході з капіляра, тоді як інші дослідники вважають, що ефект розбухання визначається радіальними нормальними напруженнями. Автори [20-23] дотримуються думки, що розбухання екструдату на виході з капіляра характерно для неньютонівських в'язкопружних рідин і обумовлено високоеластичними властивостями цих систем.

При витіканні рідини з насадки екструдера відбувається зміна граничних умов від прилипання до руху з вільною поверхнею. В результаті з'являються внутрішні напруження в рідині. Для цієї ситуації важко отримати аналітичне рішення. При вирішенні подібних завдань застосовують або числові методи, або експериментально досліджують явище екструзійного розбухання.

У технологічній практиці ефект розбухання оцінюють коефіцієнтом, під яким розуміють відношення діаметра екструдату до діаметру формуючого отвору в каналі. Як відомо, діаметр потоку полімеру виявляється збільшеним в порівнянні з діаметром профілюючого каналу і це збільшення може наближатися до трикратного. При екструзії складних профілів, неоднорідність розбухання на різних ділянках їх перетину може призводити до спотворення профілю аж до повної неможливості отримання виробів заданої конфігурації.

Неоднорідність розбухання екструдату при виході з різних ділянок формуючого інструмента призводить до різних ступенів спотворення перерізу виробу, що особливо важливо враховувати при виробництві виробів складного профілю. Найбільша складність при проектуванні екструзійних головок для виробництва профільних погонажних екструзійних виробів полягає у визначенні необхідної геометрії профілюючих каналів формуючих інструментів. Вона залежить як від реологічних властивостей матеріалу, так і від технологічних параметрів процесу екструзії та геометрії формуючих каналів головки.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень ефекту розбухання, що приводяться в літературі, в переважній більшості випадків отримані при витіканні розплавів полімерів з циліндричних каналів [20, 21, 22] і тільки у роботах [19, 23] містяться дані по розбухання для випадку видавлювання розплавів полімерів через канали більш складних профілів.

Ніккель зі співробітниками [24] моделював розширення ньютонівських рідин при течіях з малими числами Рейнольдса. Він показав, що зсувні напруження на

виході зменшуються, але одночасно з'являються поздовжні напруження, і що течія стає невіскозиметричною в області виходу з екструдера. На поверхні виникає сила розтягування, а на осі симетрії стискаюча сила.

Аналогічні завдання вирішували Джордж із співробітниками в роботах [25-26]. Вони використовували техніку сингулярних кінцевих елементів, завдяки чому значно підвищилась точність розрахунків і збільшилася швидкість збіжності числового рішення.

Завдання розширення струменя ньютонівської рідини з числами  $Re > 100$  вирішили Лью з співробітниками [27]. При малих числах Рейнольдса розбіжності з експериментальними даними мали місце тільки безпосередньо біля виходу з формуючого каналу.

Експериментальні дослідження Аллайна зі співробітниками [28] по розширенню потоку при екструзії полісахариду з великою молекулярною масою показали, що він виявляє властивості ступеневої рідини, при швидкостях зсуву від  $980 \text{ c}^{-1}$  до  $3600 \text{ c}^{-1}$ . Вони використовували ксантан різної концентрації і визначили відстань від виходу з екструдера, на якій відбувається остаточне формування потоку. Відстань, на якій потік змінював свою конфігурацію збільшується прямо пропорційно швидкості зсуву.

Моделюванням течій неньютонівських рідин, що проявляють пружні властивості, займалися також Берадо і Фортин зі співробітниками [29]. Вони використовували багатопараметричну модель Фан-Тьен-Таннера і досліджували зміну конфігурації профілів вільної екструдованої поверхні при довгих і коротких насадках екструдера. Ними встановлено, що при реалізації процесу екструзії на довгих насадках профіль струменя встигає розвиватися аналогічно експериментальним даним, а для коротких насадок спостерігається розходження з експериментальними даними.

У ряді робіт [30-33] використовувалося умова проковзування в околиці виходу з формуючого каналу екструдера. Це дозволило деяким чином згладити різку зміну граничних умов. Сілліман і Скрайвен [30] досліджували течію ньютонівської рідини з лінійною функцією проковзування на стінці. Вони показали, що перша різниця нормальних напружень та розширення струменя зменшуються з ростом проковзування. Досить враховувати проковзування на

відстані порядку 0,18 напівширини каналу від виходу з екструдера. Подальше збільшення області проковзування не впливає на виникаючі напруження.

Вессон і Паланастазі [31] використовували умову проковзування на стінках формуючих каналів при дослідженні течії в'язкопружних рідин. Вони отримали рішення для течій з більш високими числами Вайссенберга, ніж у випадку умови прилипання.

Фан-Тьен [32] досліджував залежність коефіцієнта проковзування для різних рідин, грунтуючись на даних експериментів Рамамурті [33]. Він показав, що проковзування виникає, коли напруження на стінках досягають певної критичної величини. Наявність проковзування веде до зменшення ефекту розширення потоку. Однак, його результати відрізняються від даних Вессона і Паланастазі [31] для критичних чисел Вайссенберга.

Моделюванням неізометричної течії вязкопружної рідини на виході з формуючого каналу екструдера займалися Луо і Таннер [34] і Баракос і Мітсуліс [35]. Вони показали залежність профілю утворюваного струменя від різниці температур на стінках вихідного каналу екструдера. Спостерігалось вигинання струменя в бік більш холодної стінки навіть для ньютонівських рідин.

У роботі [36] встановлено, що при витіканні всіх видів досліджуваних розплавів полімерів з каналів складної форми спостерігається різке збільшення коефіцієнта розбухання в області значень низьких тисків. При підвищенні температури для всіх досліджуваних полімерів і каналів кінцеве значення коефіцієнта розбухання зростає. Результати досліджень також свідчать про вплив геометрії формуючого інструмента на розбухання розплавів полімерів. Найбільше значення коефіцієнта розбухання спостерігається при течії розплаву полімеру в каналі виду "облицювальна планка", це пояснюється наявністю виступаючих кутів. У кутах при напірній течії розплаву полімеру виникають концентрації напруження і при виході полімеру вони збільшують поперечний переріз екструдату. Отримані результати добре узгоджуються з результатами досліджень авторів [37-39].

В роботі [40] досліджено високоеластичне відновлення потоку розплаву полімеру при екструзії полімерних оболонок. Встановлено, що при витіканні екструдату з формуючого каналу відбувається збільшення товщини стінок і розмірів поперечного перерізу виробу. Це пояснюється в'язкопружними

властивостями розплаву полімерів, тобто спостерігається процес високоеластичного відновлення струменя [41]. Величина розбухання досягає максимального значення при збільшенні тиску (до 2-3 МПа), а потім у міру збільшення до певного значення зменшується. При подальшому підвищенні тиску величина розбухання залишається практично постійною. Величина розбухання зростає також зі зменшенням довжини формуючого каналу.

Недоліком представлених робіт по дослідженню явища екструзійного розбухання [17, 36, 40] є те, що для опису ефекту розбухання при екструзії полімерів через канали складного перетину були використані прості алгоритми розрахунку, які не описують в'язкопружну поведінку течії полімерів та не враховують коефіцієнт проковзування матеріалу у формуючому каналі.

Форма потоку розплаву і положення перерізу його максимального розбухання залежить від ступеня витяжки та реологічних властивостей матеріалу [42]. За відсутності витяжки переріз з максимальними розмірами знаходиться на найбільш віддаленій відстані від фільтри, із збільшенням витяжки переріз з максимальними розмірами наближається до фільтри, а поперечні розміри його зменшуються.

Розбухання полімерних матеріалів присвячено велику кількість теоретичних і прикладних робіт. Найбільший інтерес для практичного використання представляють ті роботи, в яких розглядається залежність високоеластичної деформації від реологічних властивостей матеріалу і технологічних режимів екструзії, а також дається математичний опис процесів, що розвиваються [43,44]. Це сприяє науково-обґрунтованому конструюванню каналів екструзійних головок.

В роботах [42-46] для врахування пружних властивостей реальних рідин використовувалось контрваріантна модель Максвелла релаксаційного типу, але недоліком даної моделі є те, що вона є однією з найпростіших в'язкопружних моделей і вона рекомендується лиш тоді, коли доступно мало інформації про течію полімеру через формуючі канали головок. В представлених роботах дослідження поведінки течії екструдату через формуючі канали інструменту проводився методом контрольних об'ємів з використанням модифікованого алгоритму SIMPLER, який не враховує коефіцієнт проковзування розплаву полімеру в формуючих каналах головки екструдера.



У роботі [47] зроблено огляд причин розбухання і констатується, що точне передбачення величини розбухання на основі наявних теорій поки неможливо, оскільки вплив ряду факторів залишається ще неясним.

Наведені у літературі рекомендації [48-50] з вибору розмірів формуючих каналів головок побічно враховують прояв розплавом високоеластичних властивостей. Наприклад, з метою врахування цього явища для конкретного полімерного матеріалу рекомендується дещо збільшити або зменшити той чи інший розмір поперечного перерізу формуючої щілини і встановити для неї певну відносну довжину. Ці практичні рекомендації вироблені при зіставленні розмірів одержуваних виробів з виконавчими розмірами встановленої екструзійного оснащення. Недолік подібних рекомендацій, однак, полягає в тому, що вони можуть суттєво відрізнятись у різних авторів навіть для одних і тих же полімерних матеріалів. Тому потрібні об'єктивні методи розрахунку, які можуть перевірятися в практичній роботі і коректуватися при необхідності.

Таким чином, залишкова високоеластична деформація на виході розплаву з головки визначається як в'язкопружними властивостями полімерів, так і рівнем напруження і деформацій як на вході в формуючий канал так і в ньому, швидкістю течії і часом релаксації.

## **1.2 Течія і розбухання розплавів полімерів через канали складної форми**

З точки зору технології переробки пластмас великий інтерес представляє виявлення кореляції між реологічними властивостями полімерних матеріалів і параметрами переробки, що впливають, наприклад, на перепад тиску в формуючих каналах, розподіл швидкостей, в'язкопружну поведінку і формоутворюючу здатність. Точне теоретичне вирішення задачі про течію в'язкопружних рідин через канали більш складної геометричної форми, ніж кругла труба або плоска щілина, в загальному вигляді отримати дуже важко. Тому конструювання формуючих інструментів досі проводилося в основному методом «проб і помилок», і досягнення в цій галузі трималися різними фірмами з переробки пластмас у секреті.

Предметом значної кількості досліджень служило також течія полімерних матеріалів через канали з конічними входами. У багатьох екструзійних головках,

наприклад у формуючих інструментах, використовуваних для отримання волокон або екструзії труб, конфігурація входної зони набагато складніша, ніж циліндр з плоским входом. Конічний вхід в екструзійних головках рекомендують застосовувати з двох основних причин. Перша полягає в тому, що при конічному вході вдається уникнути утворення застійних зон в кутах віскозиметричних резервуарів. Важливо підкреслити, що в промислових умовах переробки в деяких полімерах при затримці їх в застійній зоні можуть відбуватися зшивання і (або) деструкція, а за допомогою каналів з конічним входом можна виключити ці небажані явища. Друга причина використання каналів конічної форми полягає в можливості підвищення продуктивності процесу формування завдяки збільшенню значень критичних швидкостей зсуву, тобто тих швидкостей, починаючи з яких виникає явище нестійкої течії, або так зване "руйнування потоку".

На рисунку 1.1 показана схема теоретично прогнозованих вторинних течій в конічному каналі. Зазначимо, що вторинні циркуляційні течії розплавів полімерів відзначалися також в капілярах з плоским входом [19]. Крім того, добре відомо, що для усунення вторинних течій кут входу в канал необхідно виконувати меншим, ніж кут, утворений конвергентними потоками розплаву.

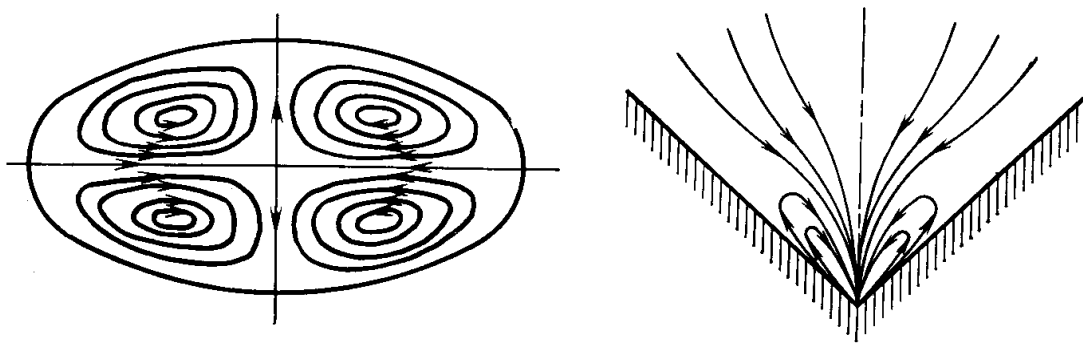


Рисунок 1.1 – Схема вторинних течій в'язкопружних рідини в трубі з еліптичним поперечним перерізом

Рисунок 1.2 – Схема вторинних течій в'язкопружних рідини в конічному каналі

В даний час немає теоретичних формул, які можна було б використовувати для розрахунку і конструювання каналів довільного перетину або для розрахунку перепаду тиску і ступеня розбухання полімерних матеріалів, що екструдуються через канали складної форми.

В роботі [19] проведено аналіз течії неньютонівських в'язкопружних рідин в каналах складної форми, з використанням різних реологічних рівнянь стану. Автори прийшли до висновку, що течію в'язкопружних рідин в таких каналах при постійному перепаді тиску можна розглядати як суто поздовжню і лише незначна частина середовища залучається до так званої вторинної течії (рисунок 1.2).

Для того, щоб виявити напрямки руху частинок при вторинних течіях (виникають, наприклад, у каналах складної конфігурації), визначальне рівняння необхідно вирішити щодо всіх трьох складових руху, в той час як у відсутність вторинних «потоків» достатнім виявляється рішення тільки осьової складової рівняння руху. Труднощі розв'язання рівняння руху при розгляді вторинних течій пов'язані зазвичай з дуже складним видом реологічних рівнянь стану для в'язкопружних рідин. Веллер і Уіслер [31] числовим методом вирішили рівняння руху, отримані при аналізі течії рідини Рейнера - Рівлін в каналі квадратного перетину, і визначили таким чином напрямку вторинних течій. Слід вказати на те, що експериментальні роботи в цій області відстають від теоретичних досліджень.

З метою спостереження особливостей руху розплавів полімерів у каналах складної форми Хан [19] проводив експерименти по видавлюванні різних сумішей несумісних полімерів і вивчав розподіл матеріалів в екструдерах за фотографіями їх мікроструктури.

У літературі багато уваги було приділено явищу розбухання екструдату після виходу з круглого отвору і відносно мало описано це явище для насадок некруглого перетину. Перша спроба виявити кількісний зв'язок між розбуханням екструдату після його виходу з прямокутного каналу з реологічними характеристиками рідини була зроблена Ханом [19].

При продавлюванні екструдату поліетилену високої густини крізь канал прямокутного перерізу з відношенням сторін (більшої сторони прямокутника до меншої), рівним 6 звертають на себе увагу два факти. По-перше, розбухання полімеру більше на довгій стороні прямокутного каналу, ніж на короткій, причому максимального значення розбухання струменя досягає в центрі довгої сторони. По-друге, чим більше об'ємна швидкість течії, тим сильніше розбухання екструдату (рисунок 1.3). Ці результати узгоджуються зі спостереженнями при течії в'язкопружних рідин через круглі труби.

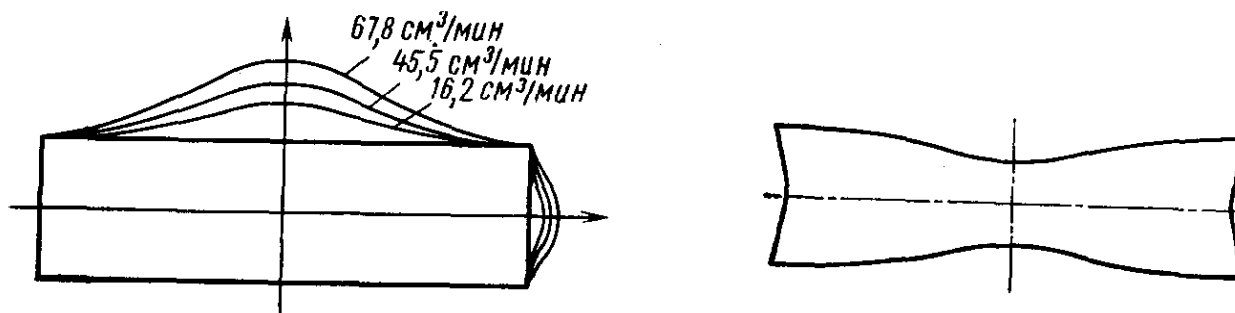


Рисунок 1.3 – Схематичне зображення розбухання екструдату при різних об'ємних швидкостях течії

Рисунок 1.4 – Поперечний переріз фільтри (типу "собача кістка"), придатної для одержання екструдату прямокутного перерізу

Неоднорідність розбухання екструдату при виході з прямокутних каналів призводить до виникнення серйозних проблем при отриманні виробів прямокутної форми. Наприклад, необхідним стає видалення матеріалу з набряклого боку профільного виробу. Ця додаткова операція збільшує вартість переробки за рахунок регенерації відходів. Однак удосконалення конструкції формуючого інструмента (рисунок 1.4) дозволяє отримати прямокутний екструдат і виключити стадії видалення і переробки відходів. Складність, однак, полягає у визначенні кривизни довгої і короткої сторін прямокутника, яку необхідно передбачити при конструюванні екструзійної головки. Ця кривизна каналу буде залежати від реологічних властивостей перероблюваного матеріалу і від таких технологічних параметрів переробки, як об'ємна швидкість течії і температура розплаву. На жаль, в даний час немає точних, теоретично обґрунтованих формул для розрахунку кривизни стінок формуючих мундштуків, і необхідні подальші теоретичні дослідження з метою вирішення цього надзвичайно складного завдання.

На рисунку 1.5 представлені експериментальні дані зміни нормальних напружень ПЕНП при  $180^{\circ}\text{C}$ . З рисунка видно, що нормальні напруження на стінці, виміряні вздовж середньої лінії довгої сторони перерізу, більші, ніж нормальні напруження уздовж середньої лінії короткої сторони. Світлі значки відповідають довгій стороні перерізу каналу, темні - короткоюю. На рисунку 1.6 дано графіки залежності градієнта тиску ( $-dp/dz$ ) уздовж середньої лінії довгої сторони

перерізу каналу від об'ємної швидкості течії. Можна вважати, що ці криві «еквівалентні» звичайним кривим течії полімерів в круглих каналах. Проте використання терміна «криві течії» в даному випадку неправомерно, так як градієнти швидкості і тиску на стінці змінюються вздовж обох сторін прямокутника. Графіки на рисунку 1.6 ілюструють важливий факт, а саме те, що залежність градієнта тиску від об'ємної швидкості в неньютонівській області течії підпорядковується степеневому закону.

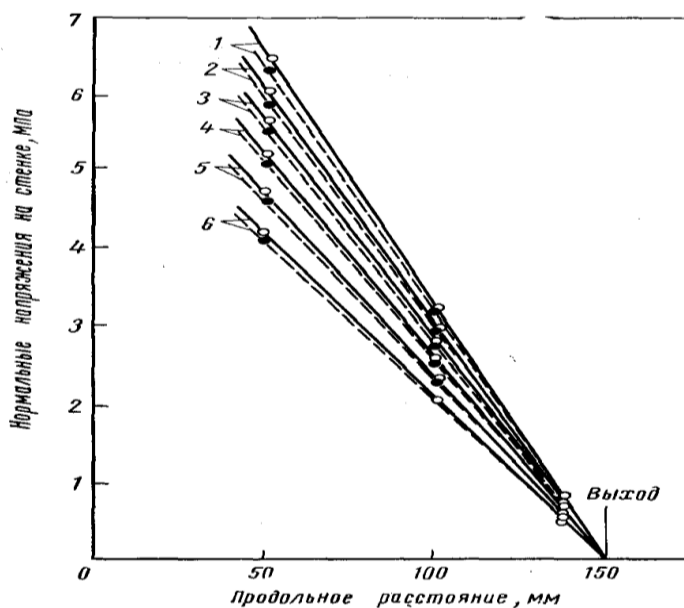


Рисунок 1.5 – Профіль зміни нормальних напружень на стінках прямокутного каналу вздовж середніх ліній довгої і короткої сторін [19]

Об'ємна швидкість течії: 1 – 97,1  $\text{см}^3/\text{хв}$ ; 2 – 72,6; 3 – 65,7; 4 – 47,6; 5 – 36,6; 6 – 26,5  $\text{см}^3/\text{хв}$ .

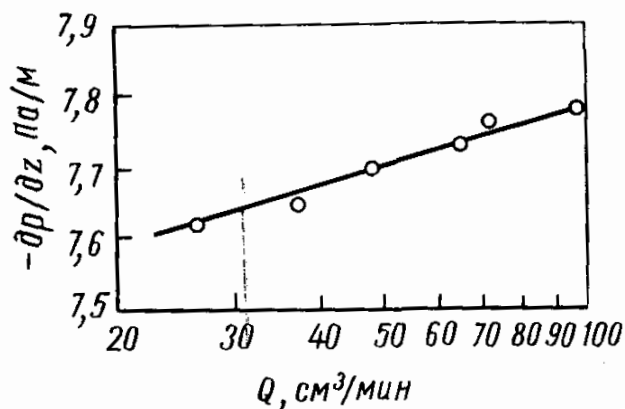


Рисунок 1.6 – Залежність перепаду тиску від об'ємної швидкості течії [19]

На рисунку 1.7 наведено графік залежності залишкового тиску розплаву ПЕНП на виході з формуючого каналу від об'ємної швидкості течії. Так як зазначене тиск на виході можна розглядати як міру оборотної пружної енергії, накопиченої в рідині, то вид кривої на рисунку 1.7 пояснює дві важливі особливості розбухання екструдату, зазначені вище. По-перше, той факт, що тиск на виході в центрі довгої сторони перерізу каналу більше, ніж у центрі короткої стінки, добре узгоджується із співвідношенням коефіцієнтів розбухання в тих же точках суміжних сторін насадки. По-друге, підвищення залишкового тиску розплаву при зростанні швидкості течії також узгоджується з тим, що збільшення швидкості деформування викликає посилення розбухання полімеру.

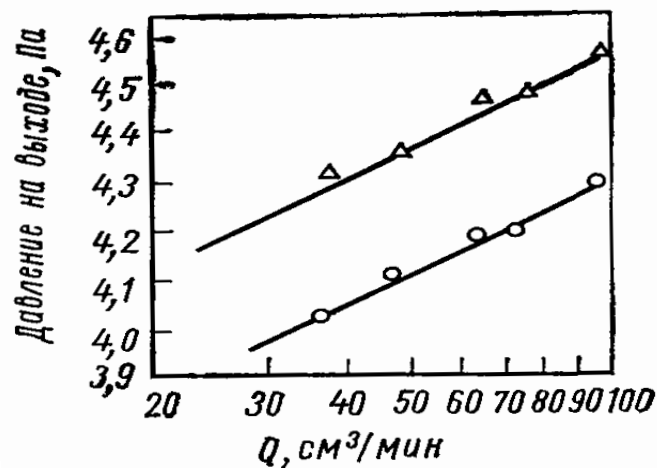


Рисунок 1.7 – Вплив об'ємної витрати в процесі течії, в центрі довгою (Δ) і короткою (O) сторін поперечного перерізу [19]

Таким чином, можна зробити висновок про те, що неоднорідність розподілу розбухання екструдату, корелює з нерівномірністю профілю нормальних напружень при виході розплаву з каналу прямокутного перерізу.

Основним недоліком наявних досліджень є те, що запропоновані вирішення проблем по усуненню розбухання екструдату основані на методі проб і помилок, тобто не існує розробленої методики по числовому розрахунку даної проблеми та алгоритму її вирішення.

### 1.3 Числові дослідження течії неньютонівських рідин

Числовим моделюванням течій неньютонівських рідин займається велика кількість дослідницьких груп. На даний момент є два узагальнюючих огляди на цю тему [51,52].

Більшість робіт сконцентровано на стаціонарних течіях з використанням простих конститутивних рівнянь (Максвелла, Олдройда-В). При цьому найбільший інтерес дослідників сконцентровано на течіях з великим числом Вайссенберга. Труднощі, пов'язані з поганою збіжністю числових схем при великих числах Вайссенберга для збіжних течій, пов'язані з утворенням піків напружень поблизу місця звуження, що призводять до числової нестійкості.

Існує не дуже багато публікацій, присвячених числовому рішенням задачі про течію неньютонівських рідин в областях складної геометричної форми. У роботі Вайта, Гостіса і Берда [53] представлений огляд експериментальних і числових робіт, присвячених впливу величини числа Вайссенберга на особливості числової реалізації проблеми. Ці особливості пов'язані насамперед з тим, що величина числа Вайссенберга впливає на вибір реологічної конститутивної моделі і на спосіб дискретизації області течії. Експериментальні роботи Еванса і Уолтерса [54], Богера, Хе і Біннінгтона [55] показали вплив типу каналу що звужується, ступеня звуження, швидкості потоку і реологічних властивостей рідини на форму і розміри циркуляційних течій поблизу місця звуження.

Останнім часом значний інтерес для дослідників представляють числові дослідження тривимірних течій [56-59]. У цих дослідженнях все частіше використовується метод контрольного об'єму.

Аналіз числових досліджень течії неньютонівських рідин показав, що переважна більшість досліджень проводилась на простих геометріях формуючих каналів, зокрема циліндричних та прямокутних, та відсутність даних по числовому дослідженню формуючих каналів складної геометрії. Канал має ступінчасту конфігурацію, що представляє із себе різке звуження, і являється складовим елементом формуючої головки екструдера.

У початкових роботах присвячених дослідженню течій в'язкопружних рідин в плоских каналах, як правило, використовувалися методи скінченних елементів і

скінчених різниць. У роботах Кроше [63] використана скінченноелемента техніка. В їх роботах швидкість апроксимована за допомогою ермітових скінчених елементів. Граничне значення числа Вайссенберга, одержане ними,  $We = 2.19$ . Вище цього значення числа Вайссенберга збіжність числової процедури порушувалася.

З експериментальної точки зору вкрай складно простежити вплив реологічних характеристик окремо на досліджувану течію. Причому вплив кожної характеристики бажано досліджувати незалежно від інших характеристик. Ці труднощі пов'язані з тим, що в реальних полімерних рідинах пружні ефекти присутні спільно з аномалією в'язкості і появою ефекту поздовжньої в'язкості. Присутній також ще цілий ряд інших специфічних ефектів, характерних для неньютонівських рідин. Всі ці ефекти присутні і проявляються в різному ступені і в різних комбінаціях. Тому завжди з'являється бажання ізолювати ці ефекти. Це може бути зроблено числовим моделювання шляхом вибору відповідних конститутивних реологічних моделей. Однак виникають серйозні проблеми, пов'язані з утворенням великих пружних напружень у кутових точках каналу.

### **1.3.1 Огляд та вибір диференціальної моделі в'язкопружної поведінки розплавів полімерів неньютонівських рідин**

Течія неньютонівських рідин має деякі суттєві особливості порівняно з ньютонівськими. Однією з таких особливостей є можлива неволюційність використовуваної реологічної моделі. Це проявляється в тому, що при описі конкретних типів течії одні рівняння стану дають вірні результати, а інші приводять до парадоксів.

Теорія побудови моделей конститутивних рівнянь реологічного стану є досить складним розділом прикладної математики. Виникають численні труднощі, для успішного подолання яких необхідне знання деяких основних принципів інваріантності. Ігнорування цих принципів, як правило, приводить дослідників до моделей, які описують неадекватно досліджувані процеси.

Для виявлення основних особливостей при деформуванні та течії доцільно класифікувати реальні текучі системи. Чисто в'язкі рідини діляться на ньютонівські



і неньютонівські. Ці рідини, у яких швидкість зсуву залежить тільки від прикладеної напруженні зсуву. Вони не володіють пам'яттю їх історії деформації.

Рідини, реологічні властивості яких залежать від часу. До них відносяться неньютонівські рідини, для яких швидкість зсуву залежить від напруження і тривалості деформації. В'язкопружні системи. Це матеріали, для яких напруження зсуву залежить від історії деформації. Вони володіють пам'яттю. До складних реологічних систем відносяться рідини, які проявляють одночасно комбінацію вищезазначених властивостей.

При виборі відповідних реологічних співвідношень варто керуватися певними вимогами. Рівняння повинні: 1) передбачати аномалію в'язкості; 2) описувати нормальні напруження; 3) описувати зсувні і динамічні експериментальні дані; 4) пояснювати релаксаційні явища; 5) відповідати експериментальним даним.

Перераховані ефекти свідчать про складну механічну поведінку високомолекулярних рідин, основною особливістю яких є накладення пружних високоеластичних ефектів на необоротну течію і прояв структурних змін в процесі деформування.

Існуючі реологічні співвідношення не в змозі повністю описати всі реальні властивості матеріалів. Однак, будь-яка математична модель дає корисний опис певних властивостей деяких реальних матеріалів при обмежених умовах деформування. Реологічні співвідношення можуть також служити передумовою для отримання розумних спрощених співвідношень, застосовуваних для вирішення різних завдань за конкретних умов течії.

Для побудови загальної теорії рідини з пам'яттю була аксіоматично введена "проста рідина". Теорія простої рідини будується на наступних принципах: 1) детермінізм напруження; 2) локальна дія; 3) не існування природного стану; 4) загасаюча пам'ять.

Принцип детермінізму напружень полягає в тому, що напруження в даний момент часу не залежить від майбутніх деформацій, а залежить тільки від минулих деформацій. Принцип локальної дії означає, що напруження в даній точці однозначно визначається історією деформування в довільно малій околиці даної матеріальної точки. Неіснування природного стану означає, що всі можливі форми

існування еквівалентні, а будь-яке розрізнення в напруженому стані є наслідком відмінності в історії деформування. Принцип затухаючої пам'яті можна сформулювати наступним чином: вплив минулих деформацій на поточну напруження у слабкіший для більш віддаленого минулого, ніж для недавнього.

Рівняння стану можна підрозділити на три типи: 1) диференціальні; 2) інтегральні і 3) релаксаційні.

До першого типу належать рівняння, що визначають тензор напруження як функцію диференціальних кінематичних величин, що відносяться лише до моменту спостереження. У рівняннях другого типу тензор напружень визначається за допомогою одного або декількох інтегралів.

Рівняння стану релаксаційного типу містять щонайменше одну похідну за часом від тензора напружень. Швидкість зміни (або релаксація) напруження дає назву цьому типу рівнянь.

Одним з найпростіших способів модифікації рівняння стану рідини для врахування пружних властивостей рідини є введення до реологічних рівнянь адитивного члена неньютонівської рідини, що містить похідну за часом від напруження

$$\boldsymbol{\tau} + \lambda \overset{\diamond}{\boldsymbol{\tau}} = 2\mu \overset{\diamond}{\mathbf{D}}, \quad (1.1)$$

де  $\overset{\diamond}{\boldsymbol{\tau}}$  використовується для позначення похідної за часом від тензора напруження, Па/с; а  $\lambda$  – час релаксації, с;  $\mu$  – динамічна в'язкість, Па·с;  $\overset{\diamond}{\mathbf{D}} = \frac{1}{2}(\nabla \vec{v} + \vec{v} \nabla)$  – тензор швидкості деформації, с<sup>-1</sup>, де  $\nabla$  – оператор Гамільтона, м<sup>-1</sup>;  $\vec{v}$  – вектор швидкості, м/с.

Додавання члена, що містить тимчасову похідну, дає можливість представляти за допомогою цього рівняння явище релаксації напруження, характерного для рідин з пам'яттю.

Релаксаційне рівняння Максвелла, що враховує пружні властивості рідин

$$\boldsymbol{\tau} + \lambda \left( \left( 1 - \frac{a}{2} \right) \overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}} + \frac{a}{2} \overset{\Delta}{\boldsymbol{\tau}} \right) = 2\eta \dot{\mathbf{D}}, \quad (1.2)$$

де  $\overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}}$  – верхня конвективна похідна за часом в'язкопружного екстра-напруження

$$\overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}} = \vec{v} \cdot \nabla \boldsymbol{\tau} - (\nabla \vec{v} \cdot \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau} \cdot \nabla \vec{v}^T), \quad (1.3)$$

$\overset{\Delta}{\boldsymbol{\tau}}$  – нижня конвективна похідна за часом в'язкопружного екстра-напруження:

$$\overset{\Delta}{\boldsymbol{\tau}} = \vec{v} \cdot \nabla \boldsymbol{\tau} + (\vec{v} \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau} \cdot \nabla \vec{v}) \quad (1.4)$$

$$\nabla \vec{v} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j}. \quad (1.5)$$

Швидкість релаксації напруження регулюється значенням часу релаксації  $\lambda$ . Параметр  $a$  – є довільним числом, проте з позитивності в'язкості.

Так звані моделі сім'ї Олдройта (в тому числі моделі Максвелла, Олдройта-В, Уайт-Метцнера, Фан-Тьен-Таннера, і Джисекуса) підкоряються диференціальним рівнянням, записаних в показниках тензора екстра-напружень  $\boldsymbol{\tau}_1$  і являються найбільш реалістичними і розповсюдженими у використанні при розрахунку в'язкопружності течії розплавів полімерів.

Модель Фін-П включає в себе рівняння, записане з точки зору тензора форми, а модель ПОМ-ПОМ складається з двох рівнянь, записаних у показниках тензора орієнтації і змінного розтягування. Модель Леонова для наповнювачів включає в себе три рівняння: для вільних макромолекулярних ланцюгів; для захоплених макромолекулярних ланцюгів; для структурної (порушення зчеплення) змінної, яка характеризує перехід макромолекулярних ланцюгів від захопленого до вільного стану. В'язкопружний тензор екстра - напружень пов'язаний з тензором форми або тензором орієнтації і змінним розтягуванням через алгебраїчні рівняння. Це

дозволяє здійснювати числові розв'язання задач в'язкопружних течій з використанням моделей Фін-П, ПОМ-ПОМ або Леонова.

Рівняння імпульсу у безрозмірній формі представляється у вигляді:

$$\begin{aligned} Re \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) &= -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_1 + \beta \nabla^2 \vec{v} \\ \nabla \cdot \vec{v} &= 0 \\ \boldsymbol{\tau}_1 + We \overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}} &= 2(1 - \beta) \mathbf{D} \end{aligned} \quad (1.5)$$

де параметр  $\beta = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$  є відношення часів релаксації;  $p$  – зовнішній гідростатичний тиск, Па. Зазвичай це співвідношення приймається рівним 1/9 [62].

Числа Рейнольдса та Вайссенберга визначаються в наступній формі

$$Re = \frac{\rho v l}{\eta} \quad We = \frac{\lambda_1 v}{l} \quad (1.6)$$

де  $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – характеристична швидкість, м/с;  $l$  – характеристична довжина, м;  $\eta$  – динамічна в'язкість, Па·с. У ряді публікацій замість числа Вайссенберга використовується число Дебори [63]. В якості аргументу функції розбухання екструдату ( $\beta$ ) використовується число Дебори ( $De$ ), яке являє собою відношення часу релаксації полімеру до часу проходження ним формуючої ділянки. У цьому випадку співвідношення між числами Вайссенберга і Дебори визначаються значеннями характерної швидкості і характерної довжини. Прийнято вважати, що  $De = 3We$ .

Верхня-конвективна модель Максвелла [64] є однією з найпростіших в'язкопружних визначальних рівностей. У ній представлені постійні в'язкості і квадратичне рівняння різниці нормального напруження. З урахуванням її реологічної простоти, модель рекомендується тільки тоді, коли доступно мало інформації про течію, або коли достатній якісний прогноз. Незважаючи на свою числову простоту, ця модель може бути складна з обчислювальної точки зору.

Для будь-якого реального полімеру, рекомендується перейти, принаймні на модель Олдройта-В [65]. Як і модель Максвелла, також одна з найпростіших в'язкопружних установчих моделей. Вона дещо краще, ніж модель Максвелла, так як вона дозволяє включення в'язкої компоненти додаткового напруження, яке може призвести до кращої поведінки числової схеми. Модель Олдройта-В є гарним вибором для рідин, що володіють дуже високою екстенсіональною в'язкістю.

Конститутивне реологічне рівняння моделі Олдройда-В зводиться до верхньої конвективної моделі Максвелла, коли характерний час ретардації дорівнює нулю і до ньютонівської рідини при рівності характерного часу релаксації і ретардації. Для моделі Олдройта-В пружна компонента обчислюється за [65].

Модель Уайт-Метцнера [65], дозволяє відтворювати певні віскозиметричні особливості течії. В'язка компонента розраховується за необхідністю. Модель Уайт-Метцнера здатна характеризувати такі віскозиметричні функції, як зсув непотоньшення і не квадратичну різницю першої нормальної напруження, які характеризують більшість рідин. Модель Уайт-Метцнера також передбачає додаткову пружність, допускаючи використання різних функції для залежностей швидкості зсуву від в'язкості і часу релаксації. Коли експериментальні дані зсувної в'язкості і різниці першої нормальної напруження доступні, можна легко отримати матеріальні параметри для моделі Уайт-Метцнера апроксимаційною кривою.

Незважаючи на свої цікаві властивості з віскозиметричної точки зору, модель Уайт-Метцнер іноді призводить до фіктивних коливань в розчині при високих швидкостях зсуву. В результаті переважають моделі ФТТ, Джисекуса і Фін-П.

Модель ФТТ [65] є універсальною реологічною моделлю, що дозволяє з високою точністю прогнозувати аномалію в'язкості розплаву полімеру і наявність поздовжньої в'язкості в течіях, обумовлених нормальними напруженнями, добре описує течію полімерів, для яких характерна наявність в'язкопружної поведінки.

Тим не менш, модель ФТТ вимагає приєднання в'язкої компоненти до тензора додаткового напруження для забезпечення стійкості. Модель ФТТ забезпечує слабкий контроль зсувної в'язкості при високих швидкостях зсуву при

використанні одного часу релаксації. Використання декількох режимів релаксації може поліпшити контроль.

Як і модель ФТТ, модель Джисекуса є однією із самих реалістичних диференціальних в'язкопружних моделей. У ній представлені розрідження при зсуві і неквадратичні рівняння різниці нормальної напруження при високих швидкостях зсуву.

Недоліком цієї моделі Джисекуса є те, що ненульове значення матеріальної константи призводить до обмеженої стійкості об'ємної в'язкості і залежності швидкості зсуву від зсувної в'язкості. Для цієї моделі в'язка компонента повинна бути додана в тензор екстра-напруження для забезпечення стійкості.

Модель Фін-П походить від молекулярної теорії. У найпростішому поданні, молекули описуються як гантелі, побудовані з двох сфер, сполучених нелінійною пружиною. Однак, на відміну від моделі Максвелла пружини допускають тільки кінцеве розширення, так що енергія деформації гантелі стає нескінченною для кінцевого значення пружинного подовження. Ця модель являється дуже складною для визначення матеріальних констант для розрахунку течій в'язкопружної рідини.

В'язкопружне матеріальне рівняння, так звана модель Пом-Пом, була представлена Макліш і Ларсоном [66]. Приблизна диференціальна форма моделі заснована на рівняннях макромолекулярних орієнтацій, і макромолекулярних розтягувань у зв'язку з орієнтаційними змінами [66]. Модель зазнає подальших змін і покращення, щоб зробити її придатною для впровадження в програмне забезпечення і введення ненульової другої різниці нормальної напруження.

Аналіз сучасних зарубіжних публікацій [67-72] у сфері дослідження ефектів розбухання та оптимізації форми полімерних погонажних профілів при в'язкопружній течії показав, що при розрахунку екструзійного формування автори в своїх роботах використовують реологічні моделі ФТТ та Джисекуса, але через недоступність матеріальних констант для цих моделей автори користуються, які приведені в прикладах розрахункових програм і тільки при дослідженні стаціонарних простих течій розплавів полімерів.

Враховуючи всі плюси і недоліки існуючих реологічних моделей, можна зробити висновок про доцільність використання для числових досліджень реологічну модель ФТТ або Джисекуса. В зв'язку з доступністю експериментального визначення матеріальних реологічних констант для досліджуваної групи полімерів перевагу слід віддати моделі ФТТ.

#### **1.4 Висновки до розділу 1 і завдання досліджень**

Аналіз аналітичного огляду існуючих зарубіжних і вітчизняних публікацій по дослідженню течій високоеластичного розплаву полімеру в каналах, характерних для течій у формуючих інструментах промислових екструдерів, показав недостатню дослідженість особливостей течії в'язкопружних рідин в зонах виходу з формуючих каналів більш складного перетину ніж круглий або прямокутний та відсутність методик профілювання формуючих каналів для компенсації ефекту розбухання.

Дослідження течій високоеластичного розплаву полімеру в каналах, характерних для течій у формуючих інструментах промислових екструдерів, останнім часом стає особливо актуальним. Це пов'язано з наявними на сьогоднішній момент невирішеними технологічними проблемами екструзійного формування профільних погонажних виробів методом вільної екструзії, існуючими в полімерній промисловості.

Необхідність врахування при розрахунку розмірів формуючих каналів високоеластичних властивостей розплаву в даний час не піддається сумніву. Дослідження в цьому напрямку тривають, в тому числі із застосуванням числових методів розрахунку і комп'ютерного моделювання. Результатом подібних робіт, мабуть, повинні бути рекомендації, засновані на дослідженнях основних промислових марок полімерних матеріалів екструзійного призначення, які були б прийнятні для практичного використання конструкторами і технологами без проведення трудомістких робіт по знаходженню необхідних для розрахунку характеристик матеріалів .

При числовому моделюванні течії розплаву полімеру в формуючому інструменті потрібно враховувати не тільки складну в'язкопружну поведінку полімерів, пов'язану зі здатністю полімеру запасати пружну енергію, причому остання частково може бути повернута розплавом, внаслідок його високоеластичності, а й вплив конструктивних параметрів формуючого інструмента на неоднорідність екструдату.

Встановлено, що при витіканні екструдату з формуючого каналу (на виході з нього) відбувається збільшення (розбухання) товщини стінок і розмірів поперечного перерізу виробу. Це пояснюється в'язкопружними властивостями розплаву полімерів. Розбіжності у визначенні межі тисків при яких відбувається максимальне значення розбухання полімеру по даним робіт [36, 40] очевидно пояснює вплив геометрії каналу.

Аналіз робіт і в'язкопружних реологічних моделей показав, необхідність врахування при розрахунку умов проковзування і в'язкопружних властивостей течії розплаву полімеру у формуючих каналах інструменту та доцільність використання найбільш реалістичної і якісної реологічної моделі, яка враховує явище розбухання, моделі ФТТ.

Практичне освоєння нових технологій і модернізація існуючих потребує детального вивчення течій розплавів полімерів у каналах, характерних для формуючих інструментів промислових екструдерів, що використовуються при виробництві полімерних погонажних виробів.

У відповідності з цим поставлено 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.

## **2 МАТЕМАТИЧНЕ ТА ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ВИРОБІВ ЕКСТРУЗІЙНИМ МЕТОДОМ**

Важливість врахування ефектів пам'яті для полімерних розплавів зумовлює необхідність застосування відповідних матеріальних рівнянь для моделювання їх поведінки в процесах переробки полімерів особливо на стадії формування виробів. Протягом останніх 10 років [75,76], значні успіхи були досягнуті в числовому моделюванні двовимірних (2D), а також і для тривимірних (3D) задач стаціонарного потоку рідини, зокрема проблеми розбухання екструдату. Такі проблеми розглядалися в роботах Буша та Фан-Тьєна [77], Тран-Конг та Фан-Тьєна [78] Карагіаніса зі співавт. [79], Шиоджима з Шімазакі [80], Вамберсія і Крочета [81], Легата і Маршала [82].

Основними цілями даного розділу є розглянути експериментальне і числове моделювання, пов'язане з розбуханням екструдату в'язкопружного матеріалу на виході з формуючого каналу для широко використовуваних полімерних матеріалів. Методику числового моделювання передбачається базувати на методі елементарного струменя з визначенням і використанням матеріальних реологічних констант конститутивного рівняння ФТТ.

На основі проведеного огляду стану досліджень технології виробництва профільних полімерних погонажних виробів і методів конструювання екструзійних головок актуальною є розробка удосконаленої математичної моделі, яка дозволить розрахувати параметри процесу з врахуванням ефекту розбухання полімеру в зоні вільної поверхні на виході з формуючого каналу, а також здійснювати обґрунтований розрахунок геометрії формуючих каналів головки в залежності від в'язкопружних властивостей перероблюваних полімерних матеріалів і технологічних параметрів процесу екструзійного формування.

### **2.1 Математична модель процесу екструзійного формування профільних погонажних виробів**

Розглядаємо задачу течії полімеру в формуючому каналі незмінного перерізу за таких припущень:

- процес екструзії стаціонарний;
- течія розплаву – ізотермічна;
- рідина нестислива ( $\rho = \text{const}$ );
- сили інерції нехтовно малі порівняно з силами в'язкості:  $\text{Re} \ll 1$ ;
- швидкість на стінці не дорівнює нулю, присутнє проковзування:  $v|_{\text{стінки}} \neq 0$ .

Математичну модель екструдуювання утворює система рівнянь нерозривності та руху [83]:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{v} = 0; \\ \rho \left[ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}, \end{cases} \quad (2.1)$$

де  $\nabla$  – оператор Гамільтона,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\vec{v}$  – вектор швидкості,  $\text{м/с}$ ;  $t$  – час,  $\text{с}$ ;  $\rho$  – густина,  $\text{кг/м}^3$ ;  $p$  – зовнішній гідростатичний тиск,  $\text{Па}$ ;  $\bar{\bar{\tau}} = 2\eta(\dot{\gamma})\dot{\mathbf{D}}$  – тензор в'язких напружень другого рангу,  $\text{Па}$ ;  $\dot{\mathbf{D}} = 1/2(\nabla\vec{v} + \vec{v}\nabla)$  – тензор швидкості деформації,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\eta(\dot{\gamma})$  – в'язкість рідини як функція другого інваріанта  $\dot{\gamma}$  від  $\dot{\mathbf{D}}$ ,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $\dot{\gamma} = \sqrt{2(\dot{\mathbf{D}}:\dot{\mathbf{D}})}$  – другий інваріант від  $\dot{\mathbf{D}}$ ,  $\text{с}^{-1}$ .

Пристинні ефекти на стінці (зсувна компонента напруження  $\tau$ ) описуються узагальненим законом Нав'є [62]

$$\tau = -F_{\text{slip}} |v_s - v_w|^{e_{\text{slip}}}, \quad (2.2)$$

де  $v_s$  – тангенціальна компонента швидкості течії,  $\text{м/с}$ ;  $v_w$  – тангенціальна компонента швидкості стінки,  $\text{м/с}$ ;  $F_{\text{slip}}$  – коефіцієнт ковзання (тертя) на поверхні каналу,  $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ ;  $e_{\text{slip}}$  – параметр матеріалу. Пристинні ефекти враховуються з роботи [84].

### Реологічний закон стану матеріалу

Узагальнене конститутивне рівняння максвелівського типу, яке використовується для в'язкопружної рідини може бути записано у вигляді (1.2).

Напруження, що накопичується в полімерному середовищі, представляється у вигляді суми двох компонент із в'язкопружної і пружної частин [61]

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_1 + \boldsymbol{\tau}_2, \quad (2.3)$$

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

$$\boldsymbol{\tau}_1 + \lambda_1 \overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}}_1 = 2\eta_1 \dot{\mathbf{D}}; \quad (2.4)$$

$$\boldsymbol{\tau}_2 = 2\eta_2 \dot{\mathbf{D}}, \quad (2.5)$$

де  $\lambda_1$  – час релаксації, с<sup>-1</sup>;  $\overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}}_1$  – верхня конвективна похідна за часом в'язкопружного екстра-напруження (1.3); пружна компонента  $\boldsymbol{\tau}_2$  розраховується за помітних змін об'єму полімеру.

У рівняннях (2.4)  $\eta_1$  – динамічна в'язкість, Па·с; а  $\eta_2$  – об'ємна в'язкість, Па·с (в наших задачах не враховується, розплав вважаємо нестисливим).

Величини  $\eta_1$  і  $\eta_2$  зв'язані співвідношеннями:

$$\eta = \eta_1 + \eta_2,$$

$$\lambda_2 = \frac{\eta_2}{\eta} \lambda_1. \quad (2.6)$$

Для в'язкопружної моделі ФТТ, загальний тензор екстра-напружень в'язкопружної компоненти  $\boldsymbol{\tau}_1$  обчислюється із співвідношення

$$\exp\left[\frac{\varepsilon\lambda}{\eta_1} \boldsymbol{\tau}_1\right] \boldsymbol{\tau}_1 + \lambda \left[ \left(1 - \frac{\xi}{2}\right) \overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}}_1 + \frac{\xi}{2} \overset{\Delta}{\boldsymbol{\tau}}_1 \right] = 2\eta_1 \dot{\mathbf{D}} \quad (2.7)$$

і пружна компонента  $\boldsymbol{\tau}_2$  розраховується за (2.5).  $\xi$  і  $\varepsilon$  – це матеріальні параметри, які визначають зсувну в'язкість і розширювальну здатність розплаву, відповідно. Зокрема, ненульове значення  $\xi$  призводить до обмеження стійкості об'ємної

в'язкості. Значення часу релаксації  $\lambda_1$  для розплаву полімеру знаходиться з експериментально визначеного часу, за який екструдат набуває 1/3 своєї кінцевої форми після виходу з фільтри, а параметр  $\varepsilon$  – з числового встановлення форми екструдату до збігу з експериментально визначеною формою потоку стабілізації перерізу екструдату.

Пружна компонента  $\tau_2$ , як правило, інтерпретується як складова напруження полімерних розплавів, або як реакція напруження, пов'язана зі швидким режимом релаксації.

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

$$\eta_1 = \frac{\eta_0}{1 + (\lambda\dot{\gamma})^m}, \quad (2.8)$$

де  $\eta_0$  – в'язкість за нульової швидкості зсуву, Па·с;  $\lambda$  – час релаксації, с;  $m$  – показник. За усталеної зсувної одновісної течії локальна швидкість зсуву зменшується до градієнта швидкості.

Для дослідження умов розширення потоку в'язкопружної рідини на виході з формуючого отвору проводиться аналіз напруженого стану середовища, що виникає в екструдаті в області виходу за наступних граничних умов:

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

$$\mathbf{G} = G_{\text{inlet}} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = v_{\text{inlet}}, \quad (2.9)$$

де  $\mathbf{G} = G_{\text{inlet}}$  – об'ємна витрата розплаву, м<sup>3</sup>/с;  $\mathbf{v} = v_{\text{inlet}}$  – швидкість полімеру на вході в головку, м/с;  $\mathbf{n}$  – вектор нормалі до вільної поверхні;

- 2) на виході екструдату з формуючого каналу приймається нульовий тиск

$$\mathbf{n} \cdot \nabla p = 0; \quad (2.10)$$

- 3) на стінці каналу враховуються пристінні ефекти за законом Нав'є (2.2);  
 4) на вільній поверхні екструдату задаються умови рівноваги і нульове значення швидкості розбухання:

$$\begin{cases} \tau_{ii} = (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n} = p - HS; \\ \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = 0, \end{cases} \quad (2.11)$$

де  $H$  – кривизна вільної поверхні,  $\text{м}^{-1}$ ;  $S$  – питома сила поверхневого натягу,  $\text{Н/м}$ .

Для аналізу процесу вільного формування погонажних виробів екструзійним методом розглядається область течії розплаву полімеру в зоні виходу з формуючого отвору, яка обмежена відношенням його довжини до діаметру в межах -3 до 3. Від'ємні значення означають область формуючого отвору перед виходом з нього. У нульовій позиції знаходиться вихід з формуючого отвору насадки екструдера, а позитивні – в області вільної течії екструдованого профілю.

Схема екструзійної течії розплаву полімеру на виході з формуючого каналу головки та на виході з нього з граничними умовами представлена на рисунку 2.1.

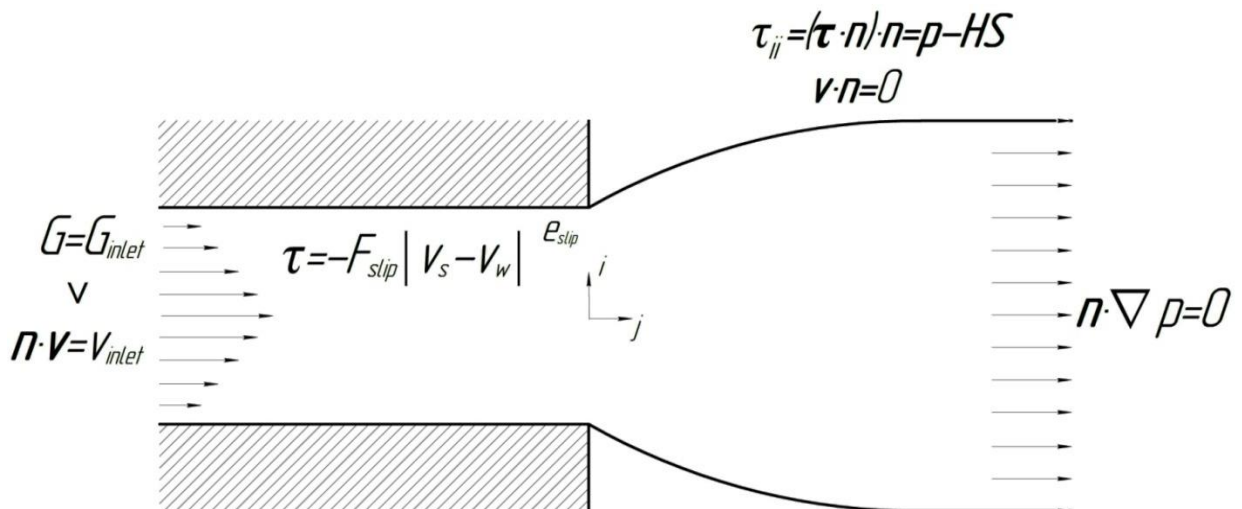


Рисунок 2.1 – Схема течії розплаву полімеру на виході з формуючого каналу головки з граничними умовами

На вході в канал задається повністю розвинена течія. В області формуючого каналу головки швидкість руху розплаву полімеру має повністю розвинений

профіль, а на виході з каналу розглядаються умови сталого потоку. На виході з каналу задаються граничні умови фон Неймана, при цьому передбачається, що перетин виходу знаходиться на достатній відстані для досягнення сталої течії. На стінках екструдера виконується умова проковзування, на вільній поверхні тангенціальні напруження дорівнюють нулю, нормальні напруження збалансовані поверхневим натягом, застосована умова непроникності.

## 2.2 Експериментальна установка та методика дослідження параметрів реологічної моделі

Проведення експериментів з дослідження параметрів реологічної моделі, яка використовується для врахування в'язкопружної поведінки розплаву полімеру при математичному описі процесу екструзії крізь формуючий канал головки круглого поперечного перерізу здійснювали на черв'ячно-пластикаційному пристрої діаметром 36 мм з відношенням довжини до діаметру рівним 20, оснащений головкою з довжиною формуючого каналу 40 мм та діаметром 8 мм, що гарантувало наявність повністю розвиненого потоку на виході з формуючого каналу.

Схема експериментальної установки представлена на рисунку 2.2.

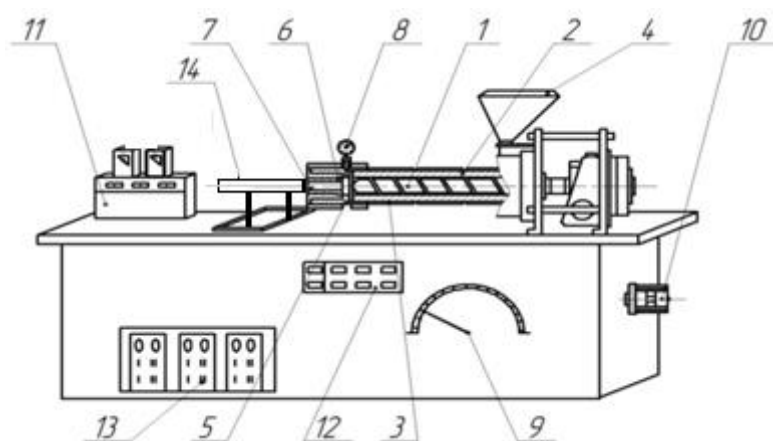


Рисунок 2.2 – Схема експериментальної установки

Частота обертання черв'яка від 20 до 100 об/хв. Черв'як 1 розташовувався в матеріальному циліндрі 2, який обігрівався хомутовим нагрівальними елементами опору 3, і забезпеченому живильним бункером 4. До матеріального циліндра 2

через перехідник 5 кріпилася за допомогою нарізного сполучення екструзійна головка 6 з формуючим каналом 7. Для візуального контролю тиску екструзії перед екструзійною головкою 6 встановлювався манометр 8. Регулювання тиску екструзії здійснювалося регулятором 9, що змінює частоту обертання черв'яка 1 через гідропривід 10. Установка містила щит електричного живлення 11, пульт управління 12, блок автотрансформаторів 13 і приймальний пристрій 14.

Зразковий манометр 8 встановлювався на перехіднику 5 допомогою мембранного роздільника МР - 5321, розрахованого на вимірювання тиску розплаву полімеру до 60 МПа. Обігрів матеріального циліндра 2, перехідника 5 і екструзійної головки 6 здійснювався по зонах: три зони обігріву матеріального циліндра 2 екструдера, одна зона обігріву перехідника 5, одна зона обігріву екструзійної головки 6. Кожна зона теплоізолювана азбестовим волокном.

На рисунку 2.3 представлений загальний вигляд пластикаційного циліндра, додатково оснащеного формуючою головкою. Екструдований профіль круглого поперечного перерізу приймався без витяжки.

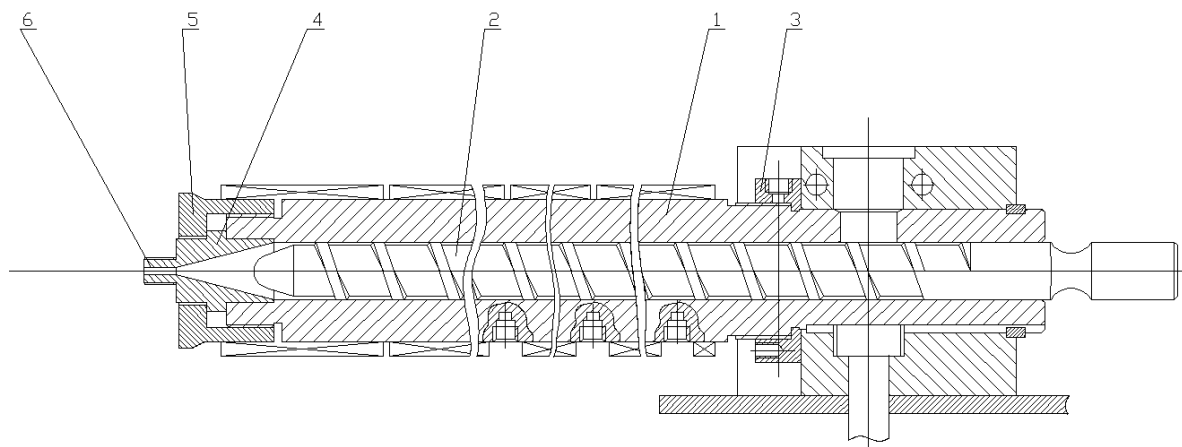


Рисунок 2.3 – Пластикаційний циліндр з формуючою головкою

Експериментальна установка відповідно з рисунком 2.2 працювала таким чином. У екструзійну головку 4, приєднану до матеріального циліндра 1 через перехідник 5, встановлювався формуючий інструмент 6, відповідної геометрії для дослідження. На приладі КВП-1-504 класу точності 0,5 задавалася необхідна температура обігріву для кожної зони і, за допомогою хомутових нагрівальних елементів опору 3 і хромель-копелевими термопарами, починався нагрів установки до виходу на необхідні температурні параметри. Таким чином, схема керування



температурними режимами забезпечувала підтримання заданої температури з похибкою 2%. Вимірювальна схема контролю температури розплаву полімеру зібрана на основі дванадцятиточечного цифрового приладу А565 (273...673К) з роздільною здатністю 0,1 К класу точності 0,05 і комплектувалася голковими хромель-копелевими термопарами (діаметр проводу хромель-копелі 0,2 мм при діаметрі голки 1,4 мм). Термопари встановлювались в трьох точках корпусу головки, на відстані 2 мм до перехідних то формуючої ділянок.

Після виходу на робочий температурний режим в живильний бункер 4 завантажувався досліджуваний полімерний матеріал. Регулятором швидкості 9, через гідропривід 10 приводився в обертання черв'як 1. За сталого режиму екструзії розплаву полімеру з головки 6 через певний час  $t$  екструдат відрізався по торцевій поверхні формуючого каналу 7. Час відсікання екструдату  $t$  вибирався таким чином, щоб відсічений відрізок мав довжину від 50 до 100 мм (для зменшення помилки експерименту і полегшення подальших досліджень). Отримані зразки екструдату (3-4 зразка для кожного із значень обертів черв'яка) зважувалися на аналітичних вагах марки ВЛА - 200 -М.

Середнє значення маси для  $i$ -ої серії при  $n$  послідовних дослідах, визначали як середнє арифметичне за формулою [86]

$$m_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n m_{ij} . \quad (2.12)$$

Однорідність вимірювань характеризується дисперсією  $D_i$ , яка визначається згідно [87] за формулою

$$D_i = (\sigma^2)_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (m_{ij} - m_i)^2 . \quad (2.13)$$

Для оцінки відтворюваності розраховано критерій Кохрена (розрахунковий)  $k_{кр}$  згідно з формулою

$$k_{kp} = \max D_i / \sum_{i=1}^m D_i, \quad (2.14)$$

де  $\max D_i$  – найбільше значення дисперсій з числа розглянутих паралельних серій  $m$ .

Перевірка виконання умови відтворюваності експерименту, шляхом порівняння значення розрахункового критерію Кохрена  $k_{kp}$  з табличним значенням  $k_{KT}$  відповідно з нерівністю [88, 89]:  $k_{kp} \leq k_{KT}$ .

Значення  $k_{KT}$  визначалося залежно від довірчої ймовірності і від числа ступенів свободи. Проведені розрахунки показали, що при величині довірчої ймовірності 0,95 дотримується умова відтворюваності експерименту.

Експеримент ставився за умов стабільності вибраного режиму екструзії при продуктивності 3 кг/год. Продуктивність визначалась ваговим методом та регулювалась зміною обертів черв'яка.

Експерименти, проведені по дослідженню розбухання полімерного матеріалу пов'язані з каналом круглого поперечного перерізу діаметром 8 мм і довжиною 40 мм, яка вважається досить довгою, щоб забезпечити наявність повністю розвиненого потоку на виході з формуючого каналу.

Довжина фотофіксації вільної ділянки екструдату не перевищувала 30 мм, так що провисання під дією сили тяжіння було незначним, як раніше показано Жилет і Серіаі [90]. Розмір екструдованого виробу був виміряний 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 2.4 .

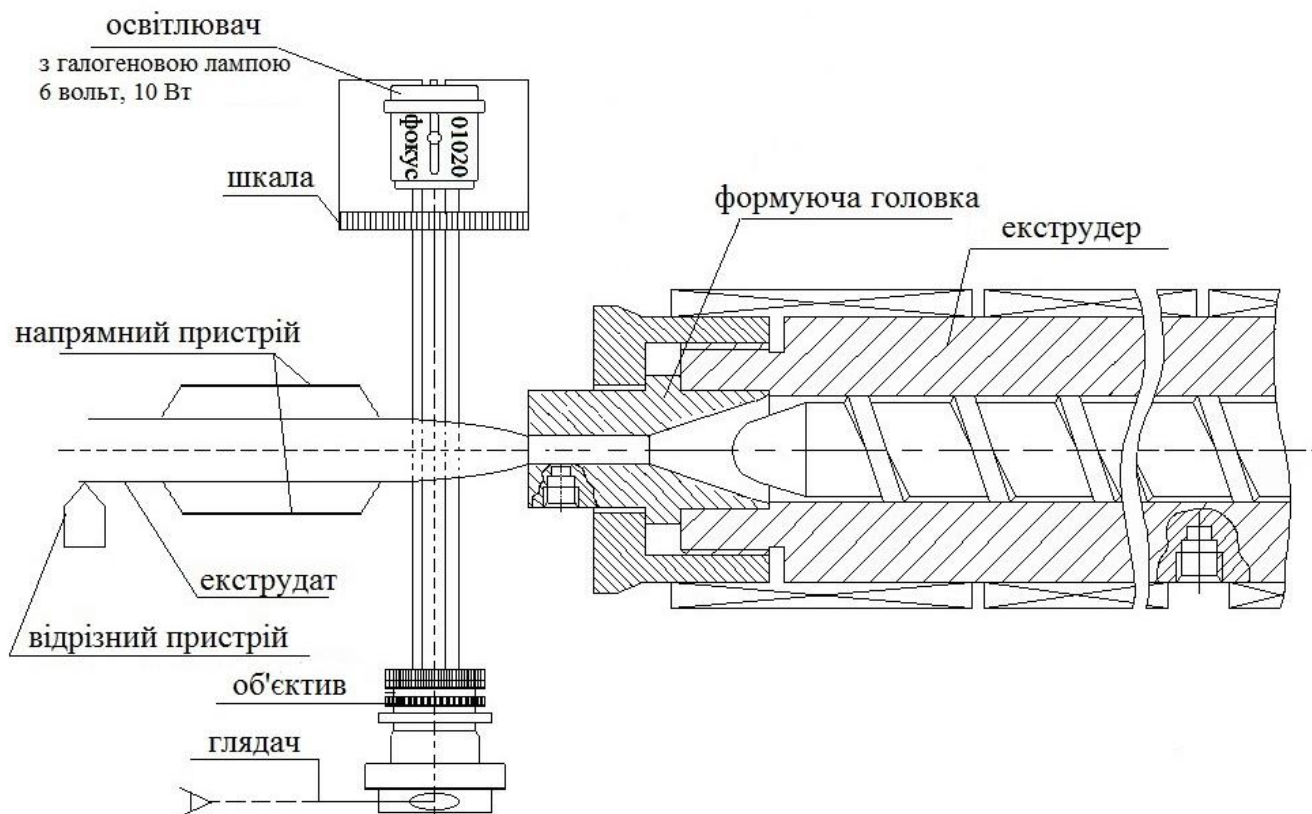


Рисунок 2.4 – Схема експериментальної фотооптичної установки вимірювання параметрів моделі ФТТ

Максимальна відстань для вимірювань екструдату була обмежена 30 мм. Фотографії представляють додаткову інформацію для встановлення форми вільного струменя, особливо на відстані за течією від вихідного перетину менше 1 мм. Приклади виду на полімерний струмінь наведені у фотографіях рисунку 2.5.



*а)*

*б)*

*в)*

Рисунок 2.5 – Фотофіксація вільної поверхні екструдату

а – ПЕВТ; б – ПВХ; в – ПС

## Характеристика досліджуваних полімерних матеріалів

Дослідження реологічних і гідродинамічних властивостей проводилася для наступних полімерних матеріалів:

- а) поліетилен високого тиску (ПЕВТ 15803-020) за ГОСТ 16337;
- б) полістирол (ПС-115) за ГОСТ 20282;
- г) композиція полівінілхлориду (ПВХ) марки SorVyl Німеччина.

Температури дослідження при проведенні експериментів для обраних полімерних матеріалів: ПЕВТ 170° С, ПС 180° С, ПВХ 180° С.

Вибір зазначених матеріалів в якості об'єкта дослідження обумовлений їх технологічними властивостями, що задовольняють вимогам, які пред'являються до матеріалів для виготовлення труб і профільних погонажних виробів.

З наведених матеріалів найкращим для застосування у даній продукції визнали композицію ПВХ. Такий висновок був зроблений з аналізу властивостей полімерних труб, виготовлених із зазначених матеріалів. Так згідно [91] вироби з ПВХ мають найвищу тривалу міцність, найнижчий коефіцієнт лінійного розширення, найнижчу теплопровідність, найвищі фізико-механічні показники .

Коефіцієнт лінійного розширення ПВХ в 2 рази нижче, ніж у поліпропілену (ПП). Це забезпечує більш надійну роботу виробів з ПВХ. Характерною властивістю ПВХ є майже необмежена стійкість до кислот і лугів, спиртів, масел, жирів, бензину і морській воді завдяки атомам хлору, які також ускладнюють займистість. Про напірні ПВХ труби відомо, що навіть після 10 років експлуатації на відкритому повітрі показали себе вельми надійними: накіп на стінках труб не утворюється, пропускна здатність практично не змінюється. Крім того, труби з ПВХ мають меншу товщину стінки ніж труби з ПЕВТ, ПП, так як допустима напруження для ПВХ в 2 і більше разів вище, ніж у зазначених полімерів.

При витіканні екструдату з формуючого каналу (на виході з нього) реалізується вся накопичена в полімерному матеріалі пружна деформація, обумовлена значними зсувними напруженнями в каналах екструзійної головки. В результаті відбувається розбухання і збільшення розмірів поперечного перерізу виробу, що виходить з головки, що пояснюється в'язкопружними властивостями

розплаву полімерів, тобто спостерігається процес високоеластичного відновлення струменя [92].

Експерименти з вивчення процесів високоеластичного розбухання течії розплаву полімеру проводилися в широкому інтервалі температур і тисків (ПЕВТ 15802-020 при температурі  $t = 130 - 170^\circ \text{C}$  і тиску  $P = 0,5 - 8 \text{ МПа}$ ; ПС 115 при  $t = 180 - 200^\circ \text{C}$  і  $P = 0,5 - 8 \text{ МПа}$ ; композиція ПВХ при  $t = 160 - 180^\circ \text{C}$  і  $P = 0,5 - 8 \text{ МПа}$ ). Сутність досліджень полягала в наступному.

Для визначення часу релаксації, коефіцієнту розбухання та розширювальної здатності розплаву для реологічної моделі ФТТ, були проведені такі розрахунки:

1. Визначення масової продуктивності  $G = \frac{m}{t}$ , (2.15)

де  $m$  – маса профілю круглого поперечного перерізу, г;  $t$  - час, с;

2. Визначення об'ємної продуктивності  $Q = \frac{G}{\rho}$ , (2.16)

де  $\rho$  – густина досліджуваного матеріалу,  $\text{кг/м}^3$ ;

3. Лінійна швидкість екструдату  $U = \frac{Q}{F_{\text{отв}}}$ , (2.17)

де  $F_{\text{отв}}$  – площа поперечного перерізу отвору формуючого каналу,  $\text{м}^2$ ;

4. За допомогою отриманих експериментальних фотографій визначена довжина ділянки профілю  $l_\lambda$ , на якій відбувається стабілізація перерізу (припиняється розбухання екструдату), а отже і довжина, при якій досягається максимальний коефіцієнт розбухання розплаву, для подальшого визначення часу релаксації полімеру.

5. Визначення часу релаксації  $\lambda = \frac{l_\lambda}{U}$  (2.18)

Визначені матеріальні параметри в'язкопружності розплаву і використані для побудови кривих змін профілю вільної поверхні екструдату на виході з формуючого інструменту, представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – 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

На рисунках 2.6-2.8 наведено приклади експериментальних даних, що визначають зміну форми екструдату при трьох різних швидкостях потоку. Відкриті і заповнені символи відносяться до різних груп експериментів і можна помітити, що відтворюваність вимірювань є чудовою. Крім того, слід підкреслити, що дані по розбуханню екструдату, виведені з фотографій або з оптичних вимірювань добре узгоджуються між собою.

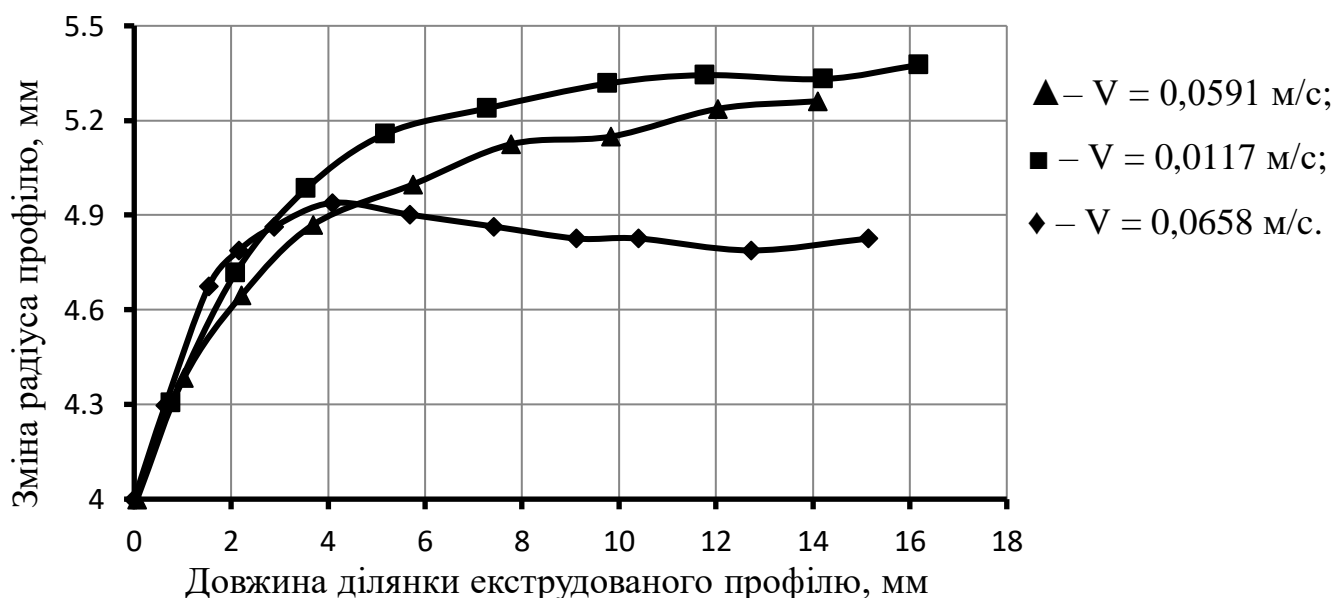


Рисунок 2.6 – Залежність зміни радіуса екструдату круглого поперечного перетину після виходу з формуючого інструменту ПВХ марки SorVyl (Німеччина)

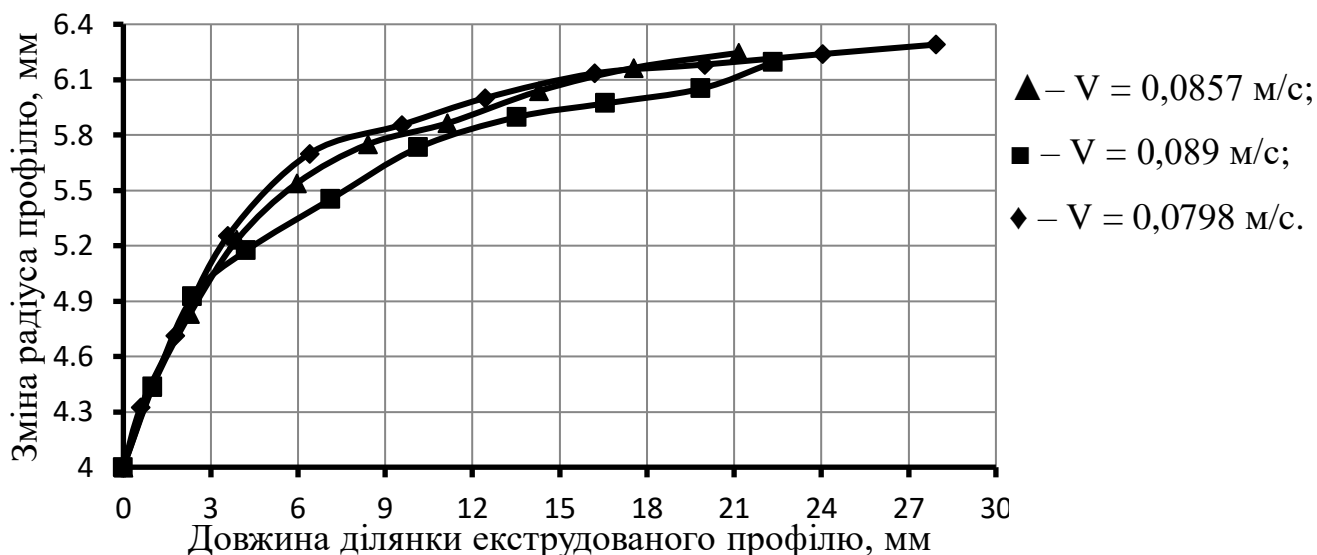


Рисунок 2.7 – Залежність зміни радіуса екструдату круглого поперечного перетину після виходу з формуючого інструменту ПЕВТ 15802-020 ГОСТ 16337-77

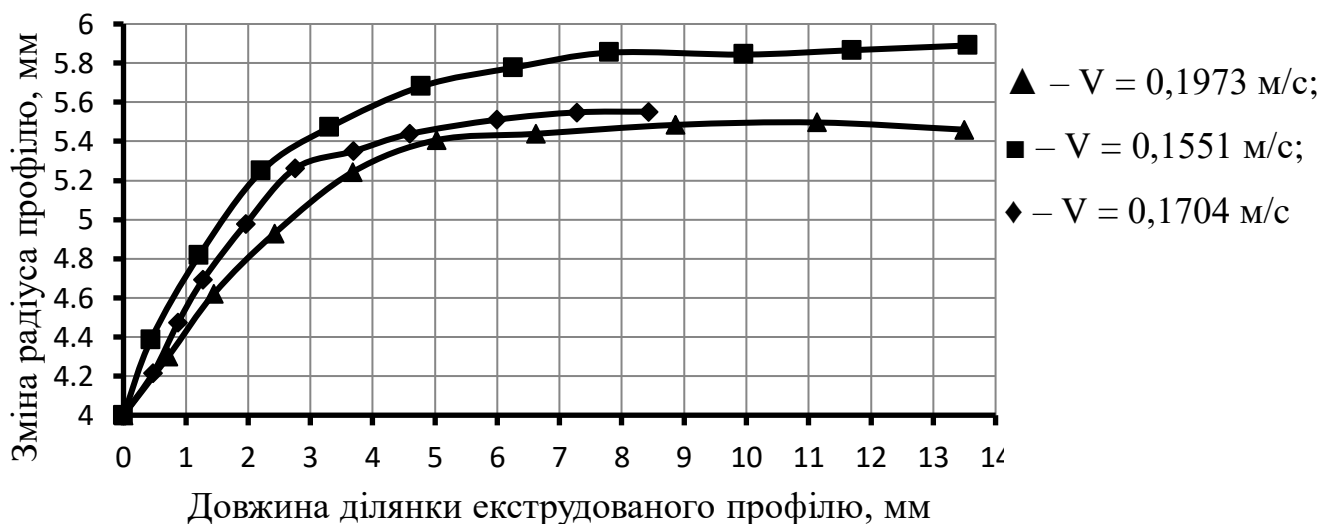


Рисунок 2.8 – Залежність зміни радіуса екструдату круглого поперечного перетину після виходу з формуючого інструменту ПС 115

Аналіз результатів представлених на рисунках 2.6-2.8, показує наявність загальних закономірностей. Так, при екструзії досліджуваних полімерів величина коефіцієнта розбухання спочатку різко збільшується при малих значеннях тиску (до 2-3 МПа), а потім, у міру збільшення останнього, темп зростання зменшується. При подальшому підвищенні тиску величина коефіцієнта розбухання залишається практично постійною. Величина коефіцієнта розбухання зростає також із зменшенням довжини формуючого каналу.

Результати експериментальних досліджень добре узгоджуються з даними наведеними в літературі [93, 94] і мають велике практичне значення. Зокрема, вони використовувалися для розрахунку розмірів формуючого каналу екструзійних головок.

На рисунку 2.9 представлений графік залежності швидкості зсуву від в'язкості для ПВХ марки SorVyl.

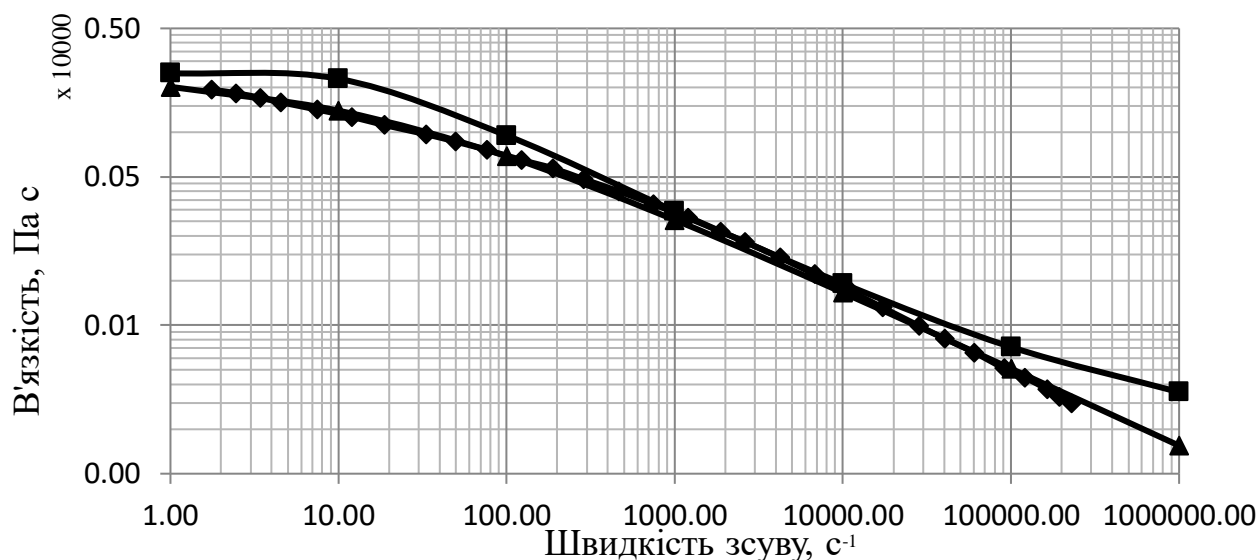


Рисунок 2.9 – Залежність швидкості зсуву від в'язкості для ПВХ літературні дані залежності: ▲ – CrossLaw, ■ – Verd-Carreau; ◆ – результат числового встановлення закону [95]

Коефіцієнт в'язкості для в'язкопружної компоненти ( $\eta_1$ ) визначений по встановленому виду перехресного закону (CrossLaw) [98] для знаходження в'язкості ПВХ (2.7).

Експериментальним шляхом були визначені коефіцієнти розбухання та час релаксації полімерів в процесі вільної екструзії і на їх базі були встановлені параметри в'язкопружної реологічної моделіФТТ [14].

Числове моделювання процесу екструзії профілю круглого поперечного перетину було виконано у програмному комплексі «ANSYS» за допомогою програми «Polyflow». Скінченно елементна сітка формуючого каналу головки і вільної поверхні екструдованого профілю представлена на рисунку 2.10. Розглядався формуючий канал круглого поперечного перетину діаметром 8 мм та



довжиною 40 мм. Канал був розбитий на 10560 скінченних елементів зі згущенням сітки біля виходу з формуючого каналу.

На відміну від класичних методів, що використовуються в обчисленнях процесу екструзії, дана процедура дозволяє відображення сітки в потоці залишатися незмінним протягом ітераційного процесу. Форма нової вільної поверхні визначається прямим підрахунком невідомих. Ця можливість призводить до значного спрощення числового процесу. Моделювання проводилося з метою встановлення реологічного параметру розширювальної здатності розплаву моделі ФТТ для даного полімеру в заданому температурному режимі.

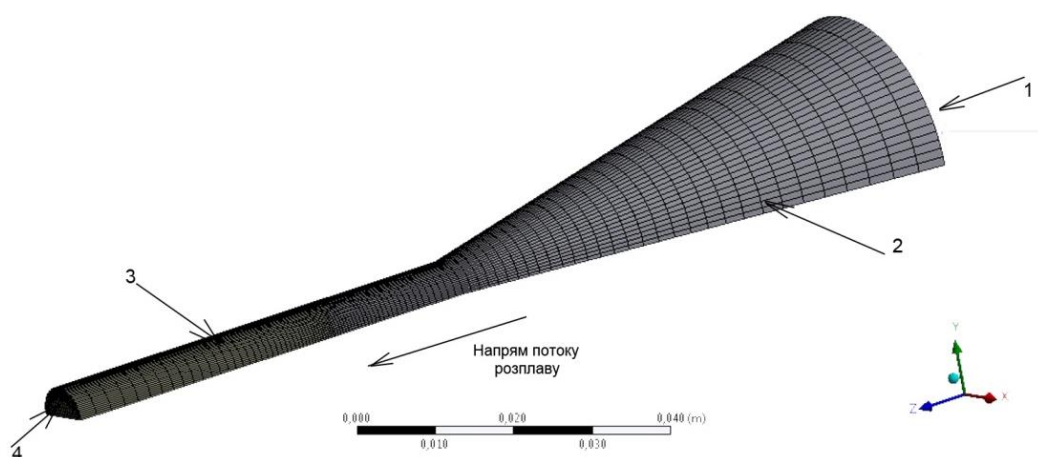


Рисунок 2.10 – Скінченно елементна сітка формуючого каналу головки круглого поперечного перетину і вільної поверхні з граничними умовами

1. вхід (повністю розвинений потік розплаву); 2. стінка (умова проковзування);
3. вільна поверхня ( $f_s = 0$ ,  $f_n = 0$ ,  $V_N = 0$ ); 4. вихід ( $f_n = 0$ ,  $v_s = 0$ )

Для визначення оптимальної кількості скінченних елементів для розрахунку геометрію каналів розбивали послідовно зі збільшенням числа на 10000 елементів. Розрахунок повторювався. Отримані результати порівнювались з попередніми, якщо результат відрізнявся більш ніж на 5 %, то процес перерахунку повторювався доти, доки відмінність розрахованих даних від попередніх не перевищувала 5 %.

Результати числового моделювання і отриманих експериментальних даних при різних швидкостях потоку зі зміни радіуса екструдату на виході з формуючого інструменту представлені на рисунку 2.11.

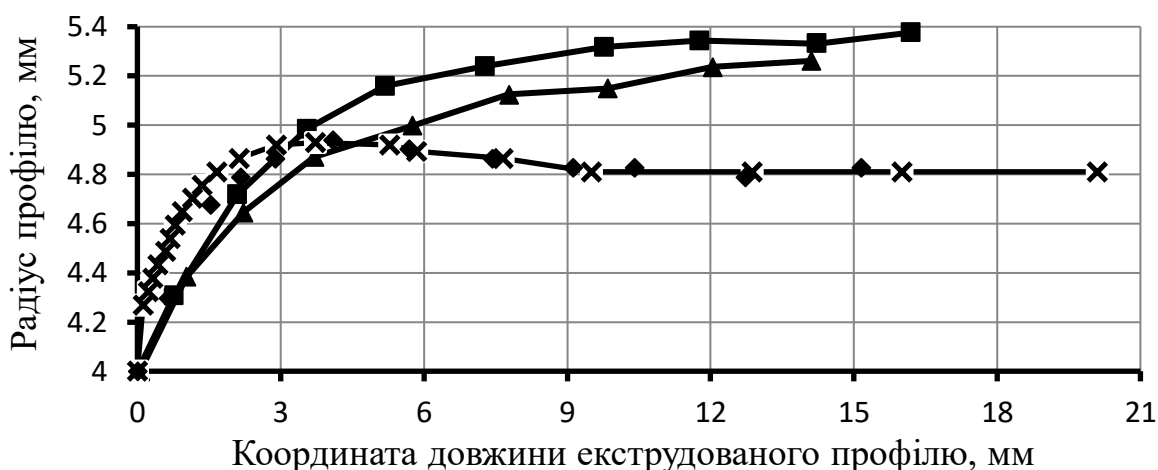


Рисунок 2.11 – Залежність зміни радіуса екструдату круглого поперечного перетину ПВХ марки SorVyl на виході з формуючого каналу

експериментальні дані : ▲ –  $V = 0,0591$  м/с; ■ –  $V = 0,0117$  м/с; ◆ –  $V = 0,0658$  м/с;  
 × – результат числового моделювання

На рисунку 2.11 суцільною лінією зображений результат числового моделювання з встановленим матеріальним параметром розширювальної здатності розплаву, а точками експериментальні дані зміни радіуса екструдату на виході з формуючого інструменту. Графік числового моделювання з встановленим параметром 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 з використання реологічної моделі ФТТ.

### 2.3 Апробація результатів числового моделювання і експериментального випробування в промислових умовах

З метою перевірки достовірності експериментально встановлених реологічних констант для оцінки ефекту розбухання полімерного в'язкопружного матеріалу після виходу з формуючого інструменту було проведено

експериментальне дослідження в умовах діючого наукового виробничого підприємства ТОВ НВП «ІНКОС», м. Чернігів. В даному розділі описується процес проведення натурального експерименту та його результати при виготовленні погонажних профільних виробів, зокрема зубчатого.

Схема експериментальної установки для дослідження ефекту розбухання при протіканні розплаву полімеру через екструзійну головку та її фотофрагментів представлена на рисунках 2.12-2.13.

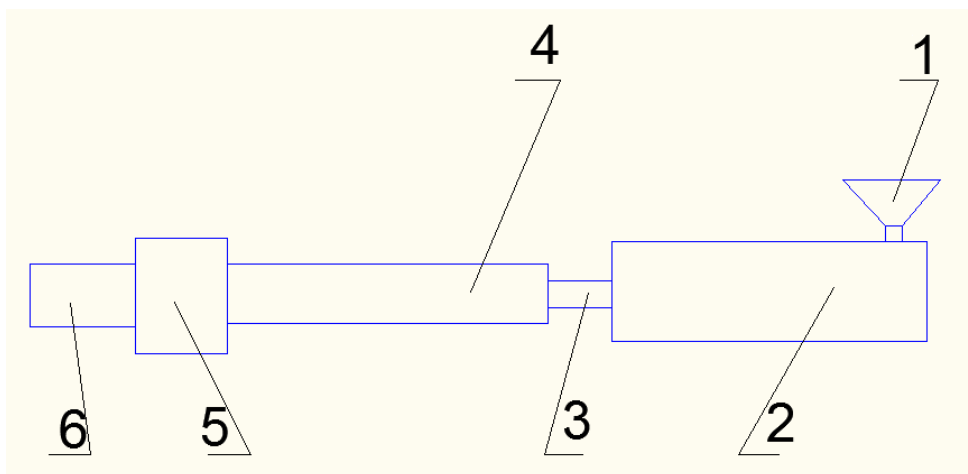


Рисунок 2.12 – Схема експериментальної установки для дослідження ефекту розбухання при виробництві полімерних виробів

1 – завантажувальний бункер екструдера; 2 – екструдер; 3 – зона вільної поверхні;  
4 – охолоджуюча ванна; 5 – тягнучий пристрій; 6 – ріжучий пристрій

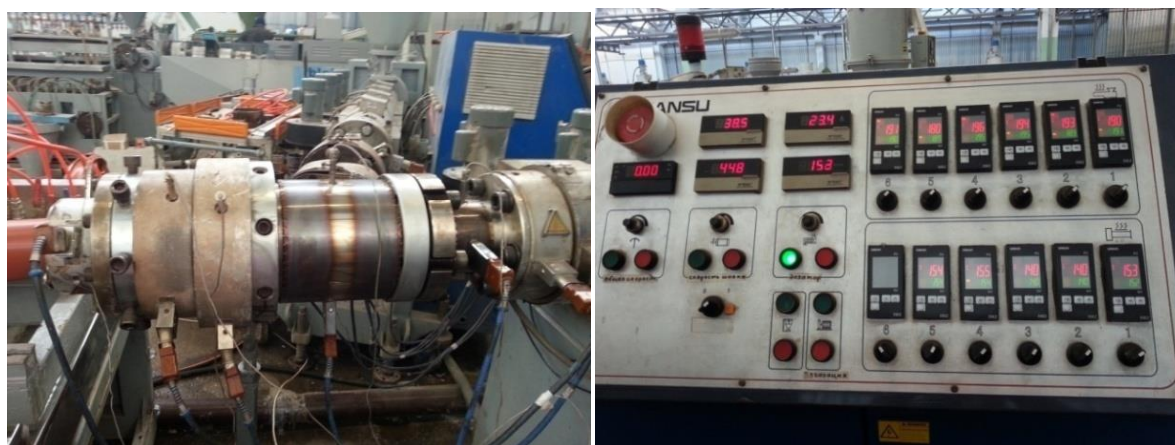


Рисунок 2.13 – Фотофрагменти експериментальної установки екструдера

Експериментальні дослідження процесу екструзійного формування профільних полімерних погонажних виробів проводився на лінії екструзійного типу з екструдером діаметром 45 мм і співвідношенням довжини черв'яка до його діаметру 25:1, потужність двигуна 15кВт, тип 4A112M4У3, число зон нагріву 5, число зон охолодження 6. Глибина каналу черв'яка в зоні дозування 3 мм.

Експериментальні дані по отриманню зубчатого профілю типорозміру 30 мм ×4 мм з композиції ПВХ виробництва Німеччини марки SorVyl та виробництва України приведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Експериментальні дані формування зубчатого профілю

Назва параметру	Досліджуваний матеріал
	ПВХ
Типорозмір профілю, мм×мм	30×4
Продуктивність, кг/год	16,6
Оберти черв'яка, об/хв	25,7
Час формування виробу (довжиною 2,75 м), с	97,7
Вага виробу, г/шт	450
Молекулярна маса ПВХ при температурі приведення	1500
Температура твердого полімеру, °С	24
Коефіцієнт температурної залежності в'язкості	0.0001
Динамічна в'язкість в каналі профілюючої матриці, Па·с	1500
Коефіцієнт фільтрної витяжки полімеру	1,1
Густина розплаву ПВХ, кг/м <sup>3</sup>	1600

Аналогічні дослідження, що проводилися на інших марках сировини показали, що залежно від рецептури композиції експлуатаційні і технологічні параметри процесу значно відрізняються.

Температура по зонах екструзії реєструвалася одноканальним ПІД-терморегулятором МІКРА600 з класом точності 0,25 за допомогою штатної

хромель-алюмінієвої термопари, яка були встановлена у просвердленому в футерівці гнізді біля поверхні. Технічні характеристики приладу наведені в таблиці 2.3. Діапазон регульованих температур в залежності від типу термопари наведений у таблиці 2.4. Попередньо термоприлади були відкалібровані при певних еталонних значеннях температури (температура кипіння води, температура плавлення льоду та температура оточуючого середовища).

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики регулятора

Дискретність завдання температури, °С	1,0
Закон регулювання каналу нагріву	ПІД
Вихідний сигнал керування	ШІМ
Точність підтримання температури у встановленому режимі	±0,5
Напруження живлення	110-250 В, 50-60 Гц
Розміри, мм	48 x 48 x 120
Маса, г	170

Таблиця 2.4 – Діапазон регулювання Мікра-600

Тип ТП	ТХК (L)	ТХА (K)	ТЖК (J)	ТПП (S)	ТПП (R)	ТПР (B)	ТВР( A-2)	ТСМ - 50	ТСП - 50	ТСМ -100	ТСП- 100
Темпера тура, °С	від - 50 до 550	від -50 до 1300	від - 50 до 800	від 0 до 1700	від 0 до 1700	від 600 до 1700	від 0 до 1700	від -50 до 200	від -50 до 800	від - 50 до 200	від -50 до 250

Значення швидкості обертання ротора електродвигуна екструдера фіксувалося вбудованим електронним лічильником з функцією визначення швидкості SC-362 М. Характеристики приладу наведені у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Технічні характеристики електронного лічильника

Одиниці виміру швидкості	об/хв.
Напруження живлення	110 В або 220 В АС+20%, 50 Гц

## Продовження таблиці 2.5

Точність	±0,05%
Час заміру	0,8 с (більше 60 об/хв)
Відстань заміру	50-200 мм
Запам'ятовуючий пристрій	EEPROM
Керування виходами	Ручне скидання (N), авт. скидання(R) (C)
Діапазон вимірювання	2– 1000 об/хв.
Роздільна здатність	1 об/хв (більше 1000 об/хв)
Робоча температура	Від -20 до +80 °С

Час, за який матеріал видавлюється крізь сопло вимірюється за допомогою секундоміра "Інтеграл С-01". Характеристики приладу наведені у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Технічні характеристики секундоміра "Інтеграл С-01"

Параметр	Значення	Од. виміру
Дискретність відліку часу	0,01	с
Максимальний обсяг рахунку	9 год 59 хв. 59,99 с	-
Запам'ятовується проміжних результатів	10	-
Габаритні розміри	77 x 58 x 18	мм

Межа допустимої додаткової абсолютної похибки секундоміра, викликаній відхиленням температури навколишнього середовища від нормальних умов в інтервалі робочих температур від  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  на  $1^{\circ}\text{C}$  відхилення температури не повинен перевищувати величини  $\Delta 1 = (9,6 \times 10^{-6} \times T_x + 0,01)$ ,  $\Delta 2 = 2,2 \times 10^{-6} \times T_x$ .

Зразки полімеру зважувались на електронних лабораторних вагах марки ТВЕ-0,3-0,005 (Техноваги). Характеристики приладу наведені у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Технічні характеристики ТВЕ-0,3-0,005 (Техноваги)

Параметр	Значення	Од. виміру
Дискретність	0,005	г
Найменша границя зважування	0,1	г
Найбільша границя зважування	300	г
Діаметр платформи	120	мм
Клас точності по ГОСТ 53228-2008	II (високий)	-

Температура на поверхні екструдованого виробу вимірюється за допомогою пірометра "EVM-640". Характеристики приладу наведені у таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Технічні характеристики пірометра "EVM-640"

Параметр	Значення
Опціональна здатність	12:1
Діапазон температур	- 32...535° С
Похибка (при температурі довкілля 25° С)	в діапазоні від - 32 ...-20° С: ± 3° С в діапазоні від -20 ... 100° С: ± 2° С вище 100° С: ± 2%
Спектральний діапазон	5 ...14 мкм
Відтворюваність	±1° С
Здатність	0,1° С
Час реакції	500мс
Діапазон робочих температур	0...50° С, 10...90% відн.вол
Розміри	180×130×40 м
Маса	Прибл. 195г

**Методика проведення експерименту.** Під час проведення експериментальних досліджень в якості досліджуваного матеріалу використовувалися гранульований зразок полімерного матеріалу ПВХ марки SorVyl виробника Німеччина.

Порядок проведення експериментів та вимірювання параметрів процесу екструзійного формування та оцінки достовірності експерименту полягає у наступному:

Досліджуваний матеріал подається у бункер 1 у вигляді гранул. На блоці керування задається швидкість обертання приводу дозатора. Далі матеріал подається до екструдера 2, де поступово розігрівається, проходячи кожну з п'яти зон нагріву, температура на кожній з яких задається на блоці керування процесом. Рівномірно розігрітий розплав полівінілхлориду потрапляє до екструзійної головки, де відбувається поступове зниження температури в 6 кроків, температура кожної зони задається на блоці керування. Матеріал, проходячи через формуючий отвір набуває необхідної форми, виходить з формуючого отвору, що ми можемо спостерігати в зоні вільної поверхні 3. Досить важливим є правильно підібрана швидкість тягнучого пристрою 5, оскільки полімер повинен охолотитися та релаксувати у охолоджуючій ванні 4, аби уникнути виникнення дефектів (зміна розміру та форми) що можуть проявлятися не одразу, а поступово.

Експеримент відбувався наступним чином: установка зібрана так як вказано на рисунку 2.12. За допомогою регулятора, що встановлений на блоці керування, встановлювалися необхідна швидкість обертання черв'яка. Експеримент відбувався в режимі вільної екструзії, тобто без витягування екструдату. На виході екструдату з охолоджувальної ванни маркером ставилася мітка на профілі і вимірювався час проходження мітки відстанню 2,75 м. Час вимірювався секундоміром. Дослід при кожній швидкості обертання черв'яка проводився 5 разів. Товщина екструдату вимірювалась мікрометром по 10 точкам кожного зразка. За отриманими даними розраховувалися об'ємні витрати.

За результатами даного експерименту здійснювалась перевірка визначення параметрів реологічної моделі поведінки полімерного матеріалу, з якого формувалася зубчатий профіль.

За допомогою системи ANSYS Polyflow було проведено числове моделювання процесу формування зубчатого профілю на базі встановлених матеріальних параметрів моделі ФТТ. Моделювався процес формування в режимі вільної екструзії, тобто без тягнучого пристрою, що дозволяє йому релаксувати та проявити явище розбухання.



Для підтвердження експериментальних даних був змодельований профіль формуючого каналу зубчатої форми типорозміром 30 мм × 4 мм та довжиною формуючого каналу 50 мм. Експериментально отриманий і змодельований профіль представлено на рисунку 2.14.

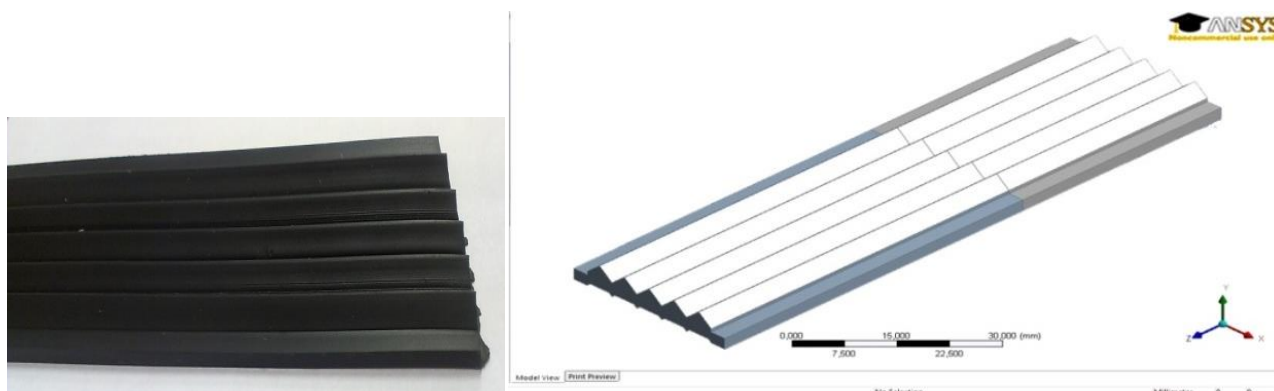


Рисунок 2.14 – Геометрія експериментального і змодельованого зразка зубчатого профілю

Геометричні розміри профілю: 30 мм × 4 мм, довжина головки  $L_{\text{гол}} = 0,3$  м; довжина вільного кінця  $L_{\text{проф}} = 0,4$  м.

Для розрахунків методом скінченних елементів була побудована сіткова область з 12408 елементів. Використане згущення сітки на межі головка-екструдат, оскільки об'єктом дослідження є саме ця область через проходження в ній перехідних процесів. Отримана сітка представлена на рисунку 2.15.

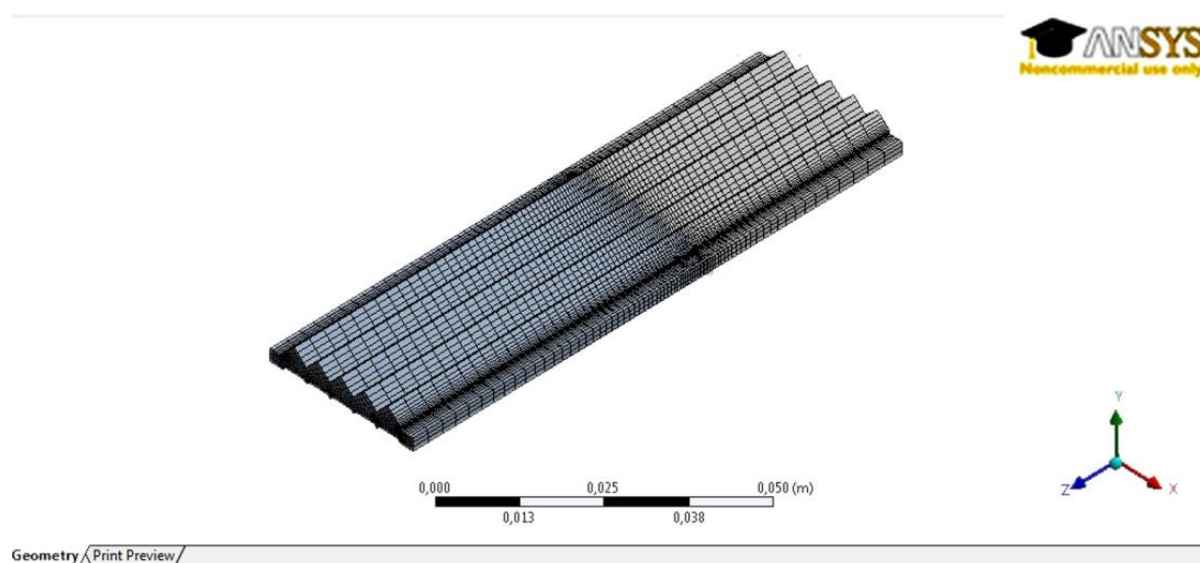


Рисунок 2.15 – Сітка для зубчатого профілю

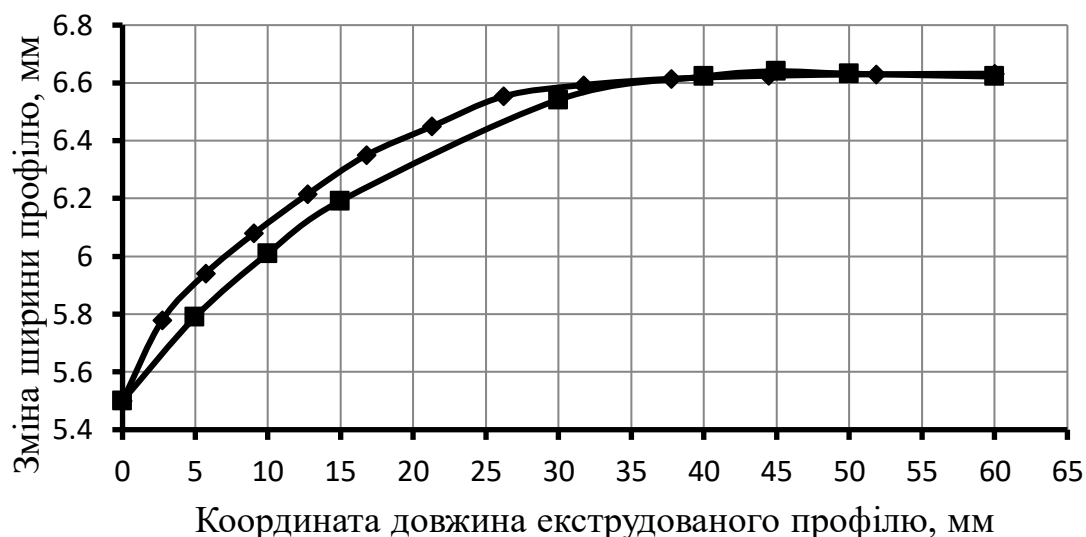


Рисунок 2.16 – Залежність зміни ширини екструдату з ПВХ марки SorVul зубчатого перетину на виході з формуючого інструменту

■ – експериментальні дані  $V = 0,0239$  м/с, ◆ – результат числового моделювання  $V = 0,0219$  м/с

На рисунку 2.16 зображений результат співставлення експерименту і числового моделювання з встановленим реологічними константами течії в'язкопружного розплаву полімеру. З рисунку видно, що графіки практично співпадають. Це підтверджує можливість використання отриманих числовим моделюванням матеріальних параметрів, на основі експериментальних даних для подальшого використання програмного комплексу ANSYS при моделюванні течії розплаву полімеру різного типу погонажного профілю на виході з формуючого каналу інструменту екструдера з використання реологічної моделі ФТТ.

#### 2.4 Математична модель проектування зразка каналу профільної погонажної головки методом оберненої екструзії

Геометрія формуючого каналу головки визначається шляхом розв'язання оберненої задачі моделювання, де цільовий профіль задається як форма екструдату у напрямку течії. Завдання полягає у визначенні необхідної геометрії формуючого

каналу головки на виході, яка визначає вирівнювання швидкостей розплаву в області вільної поверхні і геометрію перетину формуючого профілю.

Для застосування алгоритму початкова обмежена задача перетворюється так, що вона може бути вирішена як серія необмежених задач. Основний підхід полягає в зведення до мінімуму функції:

$$\Phi(X) = F(X) + f(X) \quad (2.19)$$

де  $\Phi(X)$  – псевдо-цільова функція,  $F(X)$  – геометричні параметри, які не підлягають зміні (мета),  $f(X)$  – це штрафна функція відхилення геометрії формуючого інструменту (похибка),  $X$  – являє собою набір проектних змінних (параметри геометрії формуючого каналу).

Метод ФР використовує метод пошукового рядку (ПР), щоб знайти мінімум в заданому напрямку пошуку.

Реалізації алгоритму залежності Флетчера-Рівса для обчислення оберненої задачі екструзії полягає у визначенні геометрії формуючого каналу головки для забезпечення бажаної форми екструдованого профілю.

**Стратегія методу Флетчера-Рівса** полягає в побудові послідовності точок  $\{x^k\}$ ,  $k=0, 1, 2, \dots$  таких, що  $f(x^{k+1}) < f(x^k)$ ,  $k=0, 1, 2, \dots$

Точки послідовності  $\{x^k\}$  розраховуються за правилом:

$$x^{k+1} = x^k - t_k d_k, \quad k = 0, 1, 2, \dots; \quad d_k = \nabla f(x^k) + b_{k-1} \nabla f(x^{k-1}); \quad b_{k-1} = \frac{\|\nabla f(x^k)\|^2}{\|\nabla f(x^{k-1})\|^2}$$

Величина кроку вибирається з умови мінімуму функції  $f(x^k)$  по  $t$  в напрямку руху, тобто в результаті вирішення задачі одновимірної мінімізації:  $f(x^k - t_k d_k) \rightarrow \min(t_k > 0)$ .

При цьому в точках послідовності  $\{x^k\}$  градієнти функції  $f(x)$  взаємно перпендикулярні.

Побудова послідовності  $\{x^k\}$  закінчується в точці, для якої  $|\nabla f(x^k)| < \varepsilon$ .

### Алгоритм метода Флетчера-Рівса

Початковий етап.

Задати  $x^0$ ,  $\varepsilon > 0$ .

Знайти градієнт функції в довільній точці  $\nabla f(X) = \left( \frac{\partial f(X)}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f(X)}{\partial x_n} \right)$

$k=0$ .

Основний етап

Крок 1. Обчислити  $\nabla f(x^k)$ .

Крок 2. Перевірити виконання критерію зупинки  $|\nabla f(x^k)| < \varepsilon$ .

а) якщо критерій виконаний, розрахунок закінчено,  $x^* = x^{k_0}$ ;

б) якщо критерій не виконаний, то перейти до кроку 3, якщо  $k = 0$ , інакше до кроку 4.

Крок 3. Визначити  $d_0 = \nabla f(x^0)$ .

Крок 4. Визначити  $b_{k-1} = \frac{\|\nabla f(x^k)\|^2}{\|\nabla f(x^{k-1})\|^2}$  чи в разі не квадратичної функції

$$b_{k-1} = \begin{cases} \frac{(\nabla f(x^k), \nabla f(x^k) - \nabla f(x^{k-1}))}{(\nabla f(x^k), \nabla f(x^k))}, & k \notin I \\ 0, & k \in I \end{cases}$$

Крок 5. Визначити  $d_k = \nabla f(x^k) + b_{k-1} \nabla f(x^{k-1})$ .

Крок 6. Визначити величину кроку  $t_k$  з умови  $f(x^{k_0} - t_k d_k) \rightarrow \min (t_k > 0)$ .

Крок 7. Визначити  $x^{k+1} = x^k - t_k d_k$ .

Крок 8. Покласти  $k = k + 1$  і перейти до кроку 1.

## 2. 5 Оцінка достовірності експериментальних даних

Методика розрахунку похибок вимірювання фізичних величин.

Визначення похибки середнього результату вимірювань (як прямих, так і

непрямим) фізичних величин здійснюємо за методикою, наведеною в праці [96].

Так, похибку середнього результату прямих вимірювань фізичних величин виконуємо в такій послідовності.

Дослідно-інструментальну помилку середнього результату вимірювань фізичної величини  $\bar{x}$  визначають за залежністю

$$\sigma_{\text{дп}}(\bar{x}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} \quad (2.20)$$

де  $\sigma_{\text{пвп}}$ ,  $\sigma_{\text{пр}}$ ,  $\sigma_{\text{окр}}$  – похибки первинного вимірювального перетворювача, приладу та округлення, відповідно:

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дпп}}}{3}; \quad (2.21)$$

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left( \frac{\gamma_0}{100} D_{\text{вим}} \right); \quad (2.22)$$

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}}, \quad (2.23)$$

де  $\Delta_{\text{дпп}}$  – довідникова похибка приладу;  $\gamma_0$  – клас точності приладу;  $D_{\text{вим}}$  – діапазон вимірювання приладу;  $C$  – ціна поділки шкали (ступінь дискретизації цифрового відліку) приладу.

Випадкова помилка середнього результату становить:

$$\theta(\bar{x}) = \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} \quad (2.24)$$

де  $x_i$  –  $i$ -й результат вимірювання;  $\xi$  – коефіцієнт Стюдента, який залежить від довірчої імовірності  $P_d$  і кількості вимірювань  $n$ .

Повна похибка прямого вимірювання фізичної величини обчислюється за формулою

$$\sigma(\bar{x}) = \sqrt{\sigma_{\text{дп}}^2(\bar{x}) + \theta^2(\bar{x})} \quad (2.25)$$

а значення фізичної величини для довірчої імовірності 0,6826 становитиме:

$$x = \bar{x} \pm \sigma(\bar{x}) \quad (2.26)$$

Похибку середнього результату непрямих вимірювань фізичних величин виконуємо в такій послідовності.

Дослідно-інструментальну помилку середнього результату вимірювань фізичної величини  $\bar{x}$  визначають за формулою

$$\sigma_{\text{дп}}(\bar{x}) = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{\text{дп}}^2(x_1) + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{\text{дп}}^2(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_k}\right)^2 \sigma_{\text{дп}}^2(x_k)}, \quad (2.27)$$

де  $x = F(x_1, x_2, \dots, x_k)$  – залежність шуканої величини  $x$  від величин  $x_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ), що вимірюють безпосередньо.

Випадкова помилка середнього результату в цьому разі становить

$$\theta(\bar{x}) = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2 \theta^2(x_1) + \left(\frac{\partial F}{\partial x_{21}}\right)^2 \theta^2(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_k}\right)^2 \theta^2(x_k)}. \quad (2.28)$$

Остаточну повну похибку непрямого вимірювання фізичної величини з урахуванням (2.27) і (2.28) визначають за залежністю (2.25), а значення фізичної величини для довірчої імовірності 0,6826 – за залежністю (2.26).

**Розрахунок похибки вимірювання частоти обертання ротора електродвигуна.**

Похибка первинного вимірювального перетворювача згідно з (2.21) дорівнює

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дпп}}}{3} = \pm \frac{0,499}{3} = \pm 0,166 \text{ об/хв},$$

де  $\Delta_{\text{дшт}}$  довідникова похибка приладу становить

$$\Delta_{\text{дшт}} = \delta \cdot D_{\text{вим}} = \pm 0,0005 \cdot (1000 - 2) = \pm 0,499 \text{ об}/\text{хв},$$

де  $\delta$  – відносна похибка приладу.

Похибка приладу згідно з (2.22) дорівнює

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left( \frac{\gamma_{\circ}}{100} D_{\text{вим}} \right) = \frac{1}{3} \left( \frac{1}{100} \cdot (1000 - 2) \right) = 29,94 \text{ об}/\text{хв},$$

Похибка округлення згідно з (2.23) становить:  $\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,29 \text{ об}/\text{хв}$ .

Значення дослідно-інструментальної помилки визначаємо згідно з (2.20):

$$\sigma_{\text{дшт}}(\bar{n}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,166^2 + 29,94^2 + 0,29^2} = 29,94 \text{ об}/\text{хв}.$$

### Розрахунок похибки вимірювання температури.

Похибка первинного вимірювального перетворювача згідно з (2.21)

дорівнює:  $\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дшт}}}{3} = \pm \frac{2,5}{3} = \pm 0,833 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

де довідникова похибка хромель-алюмелевої термопари:  $\Delta_{\text{дшт}} = 2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

Похибка приладу згідно з (2.24) дорівнює

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left( \frac{\gamma_{\circ}}{100} D_{\text{вим}} \right) = \frac{1}{3} \left( \frac{0,5}{100} \cdot (1300 - (-50)) \right) = 2,25 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

Похибка округлення згідно з (2.24) становить:  $\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,289 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Значення дослідно-інструментальної помилки визначаємо згідно з (2.22):

$$\sigma_{\text{дшт}}(\bar{T}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,833^2 + 2,25^2 + 0,289^2} = 2,417 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

### Розрахунок похибки вимірювання маси.

Похибка зважування згідно з (2.21) дорівнює

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дшт}}}{3} = \pm \frac{0,0004}{3} = \pm 0,00013 \text{ г},$$

де довідникова похибка приладу ТВЕ-0,3-0,005 становить:  $\Delta_{\text{дшт}} = \pm 0,0004 \text{ г}$ .

Похибка приладу згідно з (2.22) дорівнює

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left( \frac{\gamma_0}{100} D_{\text{вим}} \right) = \frac{1}{3} \left( \frac{0,004}{100} \cdot (300 - 0,1) \right) = 0,004 \text{ г}.$$

Похибка округлення згідно з (2.23) становить:  $\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{0,005}{\sqrt{12}} = 0,0014 \text{ г}$ .

Значення дослідно-інструментальної помилки визначаємо згідно з (2.20)

$$\sigma_{\text{дшт}}(\bar{T}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,00013^2 + 0,004^2 + 0,0014^2} = 0,0042 \text{ г}.$$

Тепер визначимо величину випадкової помилки середнього результату вимірювання ваги. Для визначення випадкової похибки проводили чотири вимірювання ваги, які становили 1,000; 0,995; 0,995; 1,000; 1,000 г.

Середнє арифметичне ваги становить

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i = \frac{1}{5} (1,000 + 0,995 + 0,995 + 1,000 + 1,000) = 0,998 \text{ г}.$$

Тоді випадкова помилка середнього результату становить



$$\theta(\bar{m}) = \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{m} - m_i)^2} =$$

$$2,6 \sqrt{\frac{1}{5(5-1)} [(1-0,998)^2 + (0,995-0,998)^2 + (0,995-0,998)^2 + (1-0,998)^2 + (1-0,998)^2]} =$$

$$= 0,0071$$

де  $\xi = 2,6$  – значення коефіцієнта Стюдента для  $P_d = 0,95$  і  $n = 5$  [101].

Повна похибка прямого вимірювання ваги (2.22)

$$\sigma(\bar{m}) = \sqrt{0,0042^2 + 0,0071^2} = 0,0082 \text{ г.}$$

Значення ваги відповідно до (2.26) становить:

$$m = m \pm \sigma(m) = m \pm 0,0082 \text{ г.}$$

У більшості вимірювань фізичних величин значення випадкової помилки їх середнього результату значно менше від значення дослідно-інструментальної помилки, тому надалі для визначення повної похибки прямого вимірювання фізичних величин братимемо до уваги тільки дослідно-інструментальну помилку, тобто приймаємо, що  $\sigma(\bar{x}) = \sigma_{\text{длт}}(\bar{x})$ .

### Розрахунок похибки вимірювання часу.

Похибка вимірювання часу згідно з (2.21) дорівнює

$$\sigma_{\text{ввп}} = \frac{\Delta_{\text{длт}}}{3} = \pm \frac{1 \cdot 10^{-5}}{3} = \pm 3,33 \cdot 10^{-6} \text{ с,}$$

де довідникова похибка приладу «Інтеграл С-01» становить:  $\Delta_{\text{длт}} = \pm 1 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$

Похибка приладу згідно з (2.22) дорівнює

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left( \frac{\gamma_0}{100} D_{\text{вим}} \right) = \frac{1}{3} \left( \frac{10^{-3}}{100} \cdot 1 \right) = 3,33 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Похибка округлення згідно з (2.23) становить:  $\sigma_{окр} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{0,01}{\sqrt{12}} = 0,0029$  с.

Значення дослідно-інструментальної помилки визначаємо згідно з (2.20)

$$\sigma_{дпн}(\bar{t}) = \sqrt{\sigma_{пвп}^2 + \sigma_{пр}^2 + \sigma_{окр}^2} = \sqrt{0,0000033^2 + 0,0000033^2 + 0,0029^2} = 0,0029$$

с.

Тепер визначимо величину суб'єктивної похибки. Середній час реакції людини на зоровий подразник близько 0,2 с (враховуючи час запуску і зупинки секундоміру, суб'єктивна похибка складає –  $\sigma_{суб} = 0,4$  с).

Повна похибка прямого вимірювання часу (2.25)

$$\sigma(\bar{t}) = \sqrt{0,04^2 + 0,0029^2} = 0,4$$
 с.

Значення часу відповідно до (2.26) становить:  $t = \bar{t} \pm \sigma(\bar{t}) = \bar{t} \pm 0,4$  с.

### Методика розрахунку похибок непрямих вимірювань.

Так як кожна з величин  $x$ , що впливає на загальну шукану величину, визначається з певною похибкою, то шукана величина  $z$  також буде визначена з похибкою.

Повна похибка шуканої величини  $z$  визначається

$$\sigma(\bar{z}) = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x_1}\right)^2 \sigma^2(\bar{x}_1) + \left(\frac{\partial z}{\partial x_2}\right)^2 \sigma^2(\bar{x}_2) + \dots + \left(\frac{\partial z}{\partial x_n}\right)^2 \sigma^2(\bar{x}_n)}$$

або

$$\ln(\sigma(\bar{z})) = \sqrt{\ln\left(\frac{\partial z}{\partial x_1}\right)^2 \sigma^2(\bar{x}_1) + \ln\left(\frac{\partial z}{\partial x_2}\right)^2 \sigma^2(\bar{x}_2) + \dots + \ln\left(\frac{\partial z}{\partial x_n}\right)^2 \sigma^2(\bar{x}_n)}$$

де  $\sigma(\bar{x}_i)$ - повна похибка прямого вимірювання величина, що впливає на шукану.

## 2.6 Висновки до розділу 2

Встановлено реологічну модель для моделювання в'язкопружної течії в профільних екструзійних головках. Експериментально визначені реологічні коефіцієнти дозволяють точніше здійснювати розрахунок параметрів процесу течії в'язкопружної рідини в формуючому каналі та враховувати ефекти розбухання розплаву полімеру в зоні вільної поверхні на виході з формуючого інструменту, що дає можливість передбачити неоднорідність та властивості полімерних виробів.

Створена методика експериментальних досліджень реологічних параметрів матеріалу і характеру ефекту розбухання полімерного матеріалу після виходу з формуючого інструменту. Досліди є відтворюваними, однорідність результатів підтверджується, що свідчить про те, що прийняті методики досліджень забезпечують відтворюваність експериментів.

В процесі досліджень встановлено, що використання реологічної моделі ФТТ дає можливість реалістично оцінити в'язкопружну поведінку розплаву полімеру на виході з формуючого інструменту екструдера, дозволяє передбачити та врахувати ефекти розбухання полімерного матеріалу, полегшує числове моделювання процесу екструзійного формування погонажних виробів та більш точно розрахувати технологічні вироби. Це дозволяє більш точно врахувати зміну перетину екструдованих погонажних профілів на виході з формуючого каналу.

Показано, що використання моделі ФТТ при моделюванні течії в'язкопружних рідин на виході з формуючого інструмента екструдера дозволяє розрахувати зміну перерізу екструдованого погонажного виробу.

В ході числових та натурних експериментів встановлена кореляція між ними, що підтверджує адекватність розробленої аналітичної моделі та створеної в середовищі програми "AnsysPolyflow" скінченно-елементної моделі, на якій проводились числові експерименти. Результати проведених числових досліджень процесу зміни конфігурації потоку на виході з формуючого інструменту екструдера є основою для уточненого моделювання процесів екструзії розплавів полімерів при проектуванні нових екструзійних головок. Результати також можуть бути

застосовані для обґрунтування доцільних режимів процесу екструзії з метою поліпшення якісних характеристик погонажних виробів.

### **3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЧИСЛОВИЙ АЛГОРИТМ ПРОЕКТУВАННЯ КАНАЛІВ ФОРМУЮЧОГО ІНСТРУМЕНТУ**

#### **3.1 Числовий експеримент для дослідження параметрів течії розплаву полімерів у формуючих каналах профільних погонажних головок**

З метою доведення об'єктивності, вірності вибору та перевірки збіжності математичної моделі проводились експериментальні дослідження експериментального зразка профільних погонажних головок. Це також дало можливість вивчити особливості процесу екструзії на прикладі отримання полімерних погонажних виробів.

Числовий експеримент з ціллю порівняння результатів з результатами натурного експерименту та встановлення адекватності вибраної реологічної моделі проводили в системі ANSYS Polyflow, призначеної для розв'язання методом скінченних елементів задач визначення в'язкопружної ньютонівської і неньютонівської течії розплавів полімерів.

За допомогою системи ANSYS Polyflow було проведено числове моделювання течії полімеру з експериментально встановленими матеріальними параметрами моделі ФТТ при екструзійному формуванні полімерних профілів. Всі змодельовані профілі складаються з двох частин: головки та вільного профільованого екструдату після виходу з головки. Профіль виробу моделюється в режимі вільної екструзії, тобто без тягнучого пристрою, що дозволяє полімеру релаксувати та проявити явище розбухання.

Були змодельовані екструдовані профілі наступної геометрії: 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). Для підтвердження експериментальних даних об'єктом дослідження є розроблена головка для отримання профільних погонажних полімерних виробів Ш-подібної форми, форми "рамка" та L-подібної форми.

Для проведення числових досліджень, для всіх профільних виробів формуючих каналів, була побудована досліджувана тривимірна геометрична модель в пакеті SolidWorks у формі каналів головки, а потім вона розбивалась на фрагменти за допомогою графічного інтерфейсу системи ANSYS Polyflow, задавались граничні умови.

### 3.1.1 Течія через кільцевий циліндричний канал (труба)

Геометрія профілю має наступний вигляд:

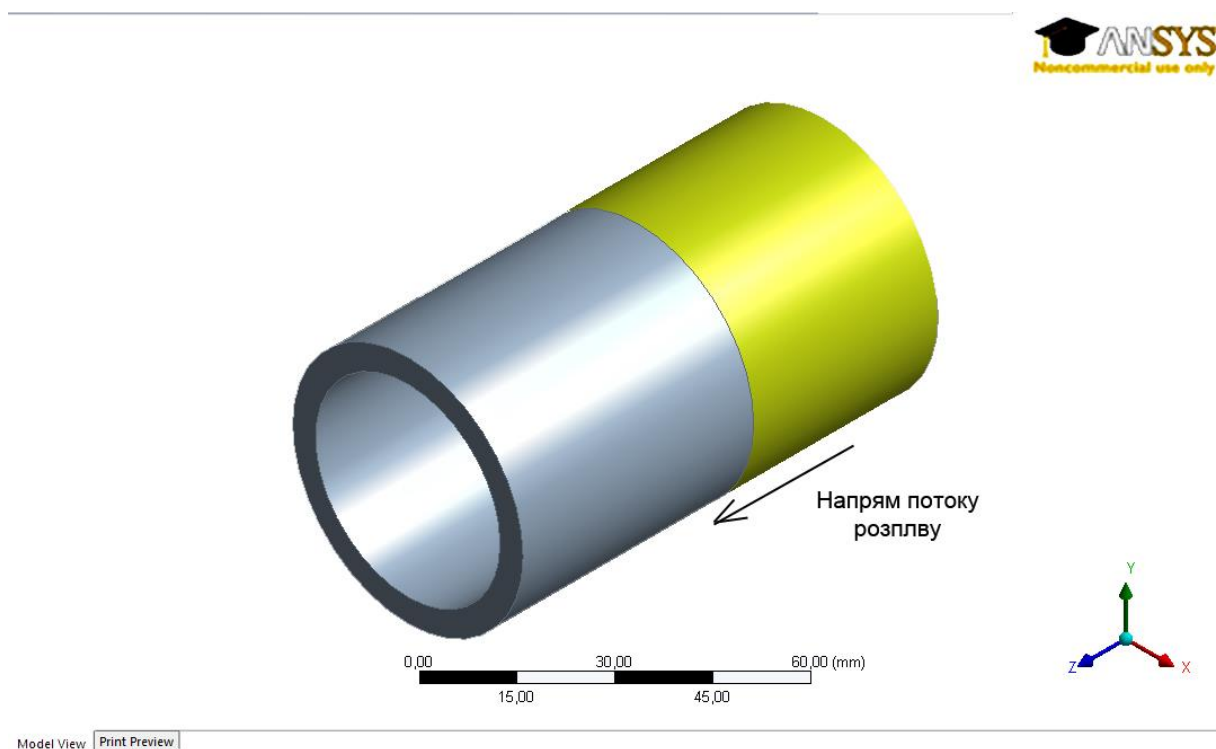


Рисунок 3.1 – Геометрія трубчатого профілю

Геометричні розміри профілю: внутрішній діаметр  $D_{\text{внутр}}=0,4$  м; зовнішній діаметр  $D_{\text{зовн}}=0,5$  м, довжина формуючого каналу  $L_{\text{гол}}=0,3$  м; довжина вільного кінця  $L_{\text{проф}}=0,4$  м.

Область моделювання з граничними умовами представлена на рисунку 3.2.

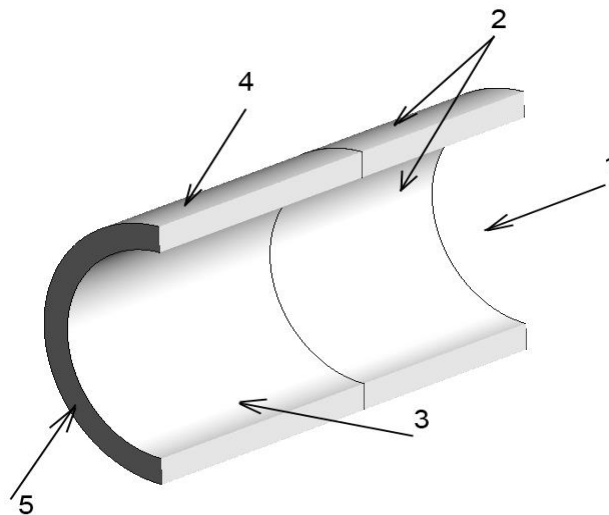


Рисунок 3.2 – Поперечний переріз по вісі симетрії трубчатого профілю з граничними умовами

- 1 – Вхід (повністю розвинений потік розплаву); 2 – Стінка (умова проковзування);  
 3 – Симетрія ( $v_n = 0, f_s = 0$ ); 4 – Вільна поверхня ( $f_s = 0, f_n = 0, v_n = 0$ );  
 5 – Вихід ( $f_n = 0, v_s = 0$ )

Для розрахунків методом скінченних елементів побудована сіткова область з 10548 елементів. Було використане згущення сітки на межі головка-екструдат, оскільки об'єктом дослідження є саме ця область через протікання в ній перехідних процесів. Отримана сітка представлена на рисунку 3.3.

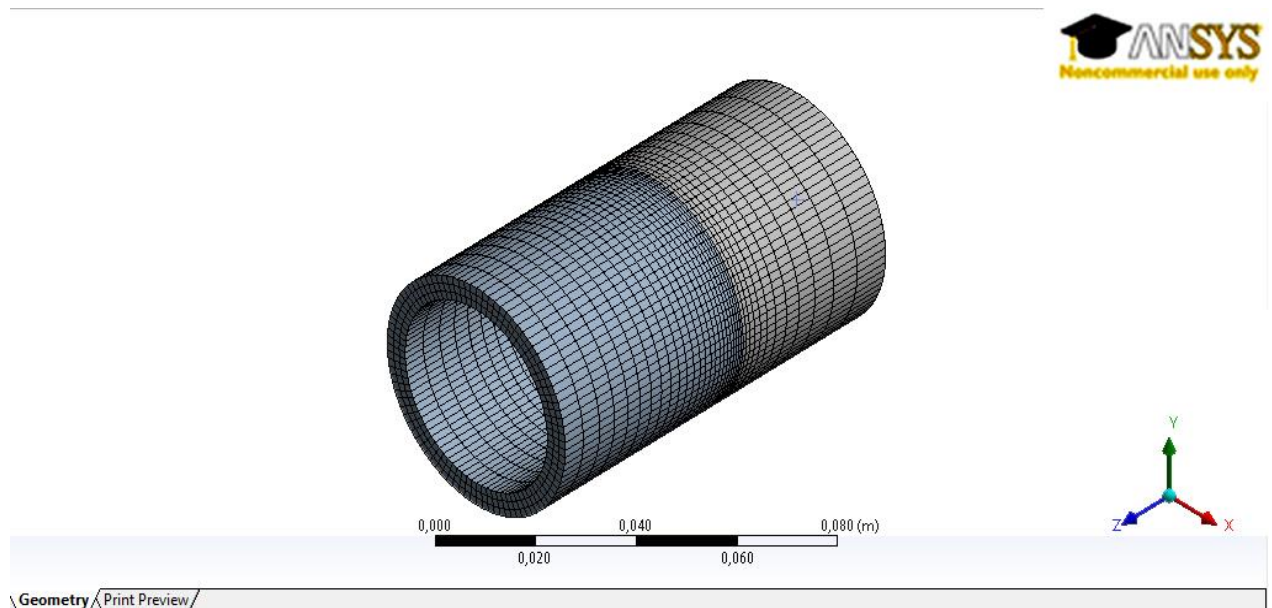


Рисунок 3.3 – Сітка трубчатого порожнього профілю

Розглянемо результати моделювання (рисунок 3.4-3.8).

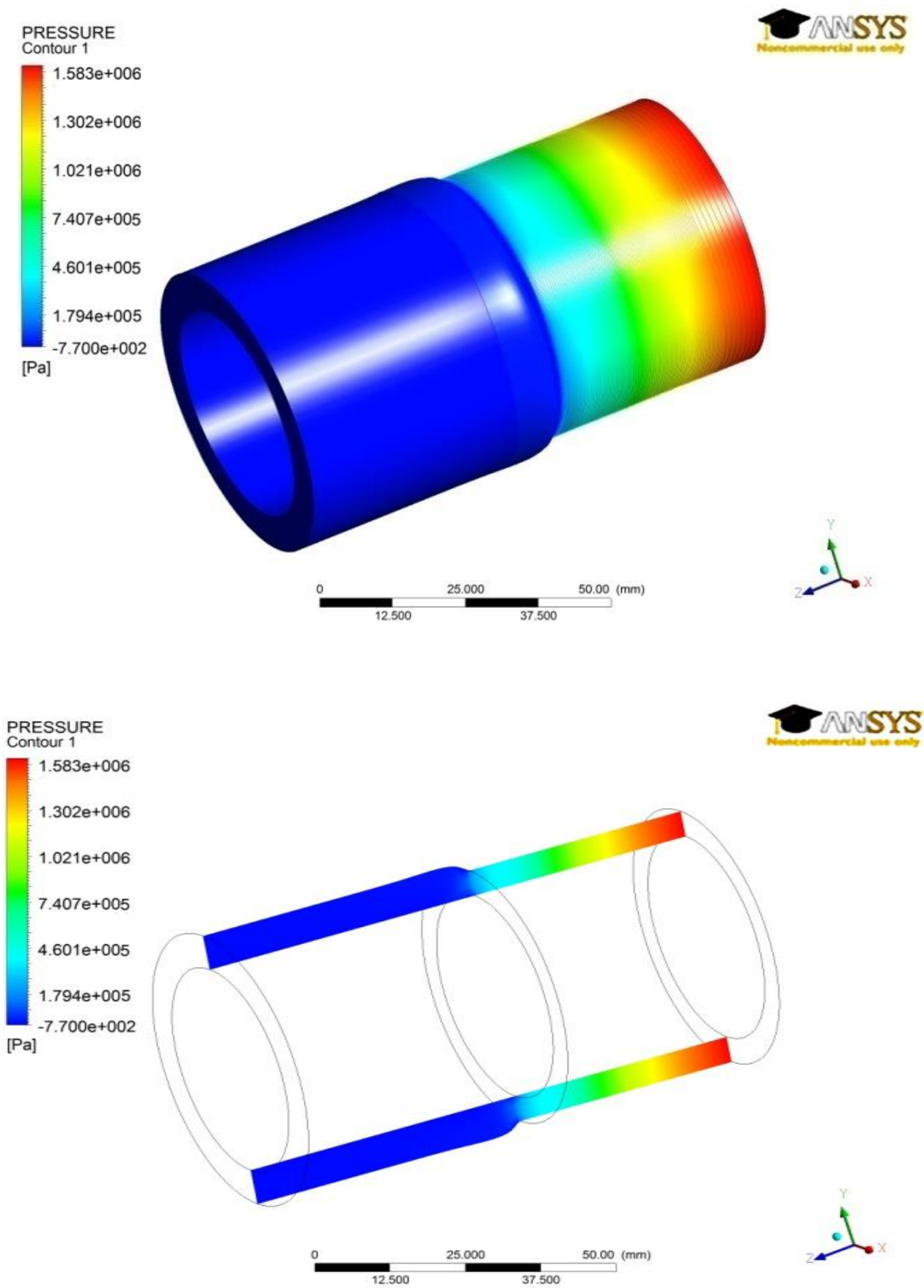


Рисунок 3.4 – Результати розрахунку тиску трубчатого порожнього профілю



Максимальне значення тиску дорівнює  $1,583 \cdot \text{МПа}$ , яке досягається на вході в екструзійну головку.

Розглянемо поле швидкостей в кільцевому зазорі, що представлено на рисунку 3.5.

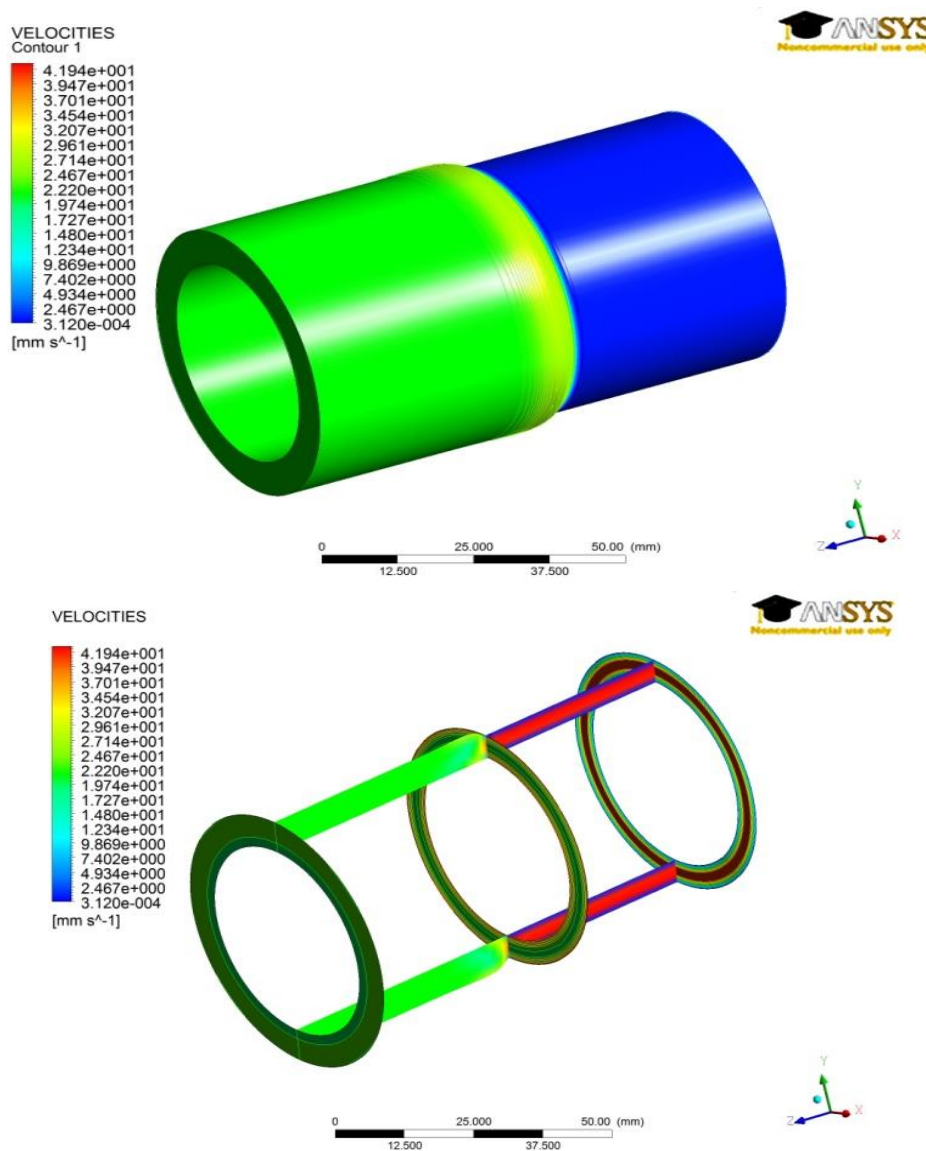


Рисунок 3.5 – Поле швидкостей трубчатого порожнього профілю

Максимальне значення швидкості досягається при вході в головку, а при виході з головки швидкість руху полімеру різко знижується, що пов'язано з тим, що моделюється процес формування в режимі вільної екструзії, тобто після виходу з головки обмежувальні стінки відсутні. Це видно з графіку на рисунку 3.6.

На рисунку 3.7 представлено контури перерізу екструдату на різних

ВІДСТАНЯХ ВІД ВИХОДУ З ГОЛОВКИ.

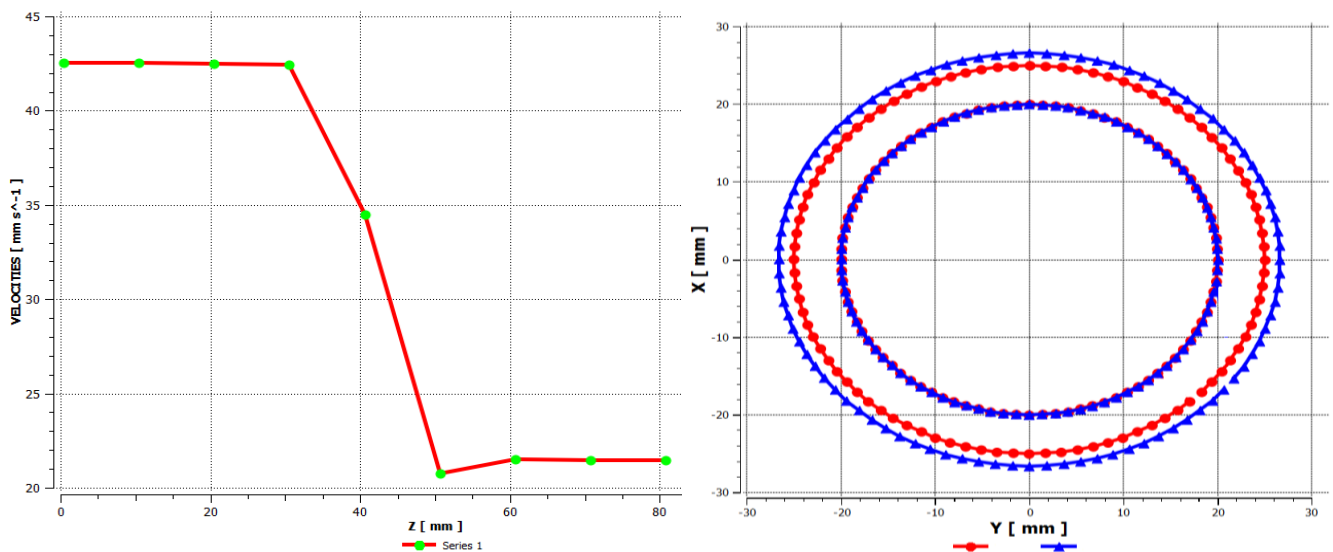


Рисунок 3.6 – Графік розподілу лінійної швидкості по довжині модельованої області

Рисунок 3.7 – Контури поверхні екструдату в поперечному перерізі формуючого каналу головки

- – контур перерізу на виході з головки; ▲ – контур стабілізованого перерізу розмірів екструдату

На рисунку 3.7 видно, що з віддаленням від виходу з головки ефект розбухання найбільш проявляється в кінці вільної поверхні екструдату.

На рисунку 3.8 показаний графік розбухання в повздовжньому напрямі.

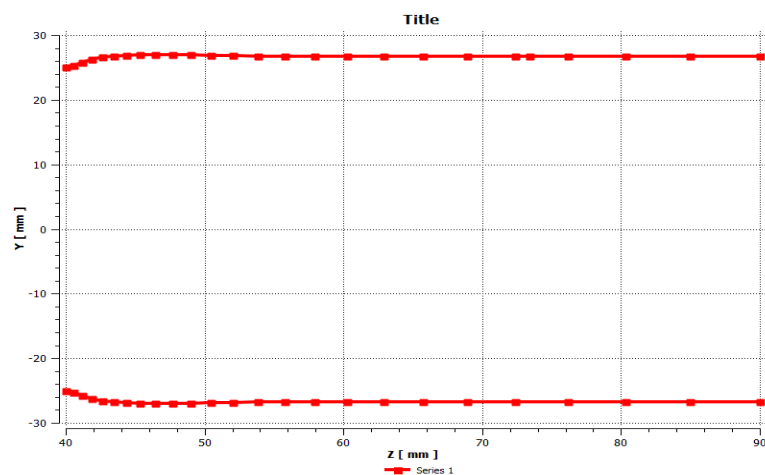


Рисунок 3.8 – Графік зміни форми трубчатого профілю в повздовжньому напрямку

З графіку видно, що ефект розбухання проявляється до відстані в 45 мм від головки, після чого течія стабілізується.

Для оцінки зміни форми вільної поверхні показано результати досліджень зміни радіуса екструдованого трубного профілю, рисунок 3.9. Узагальнена залежність величини розбухання  $\beta$  для п'яти значень числа  $De$  на виході з формуючого каналу представлена на рисунку 3.10.

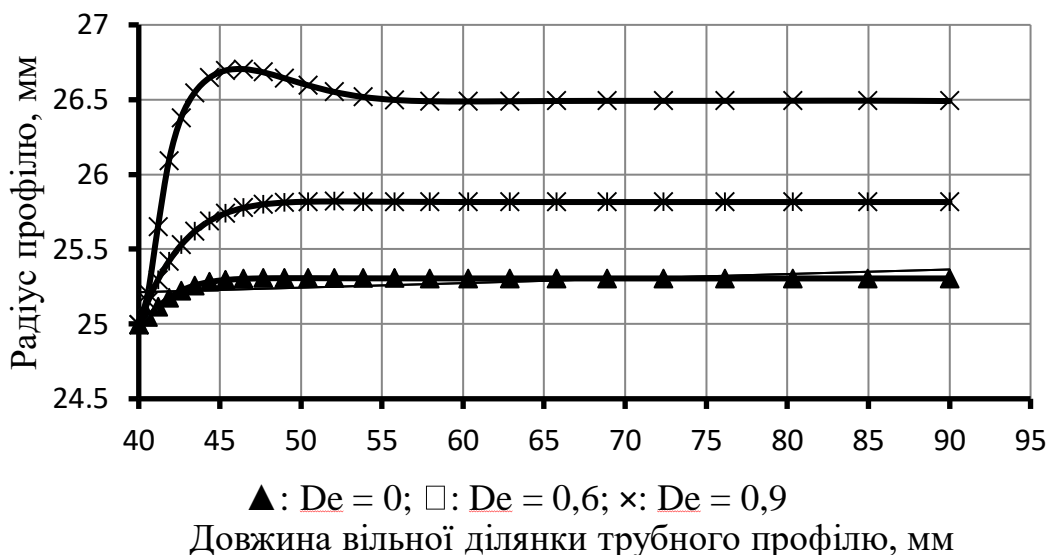


Рисунок 3.9 – Залежність зміни радіуса трубного профілю по довжині вільної ділянки екструдату

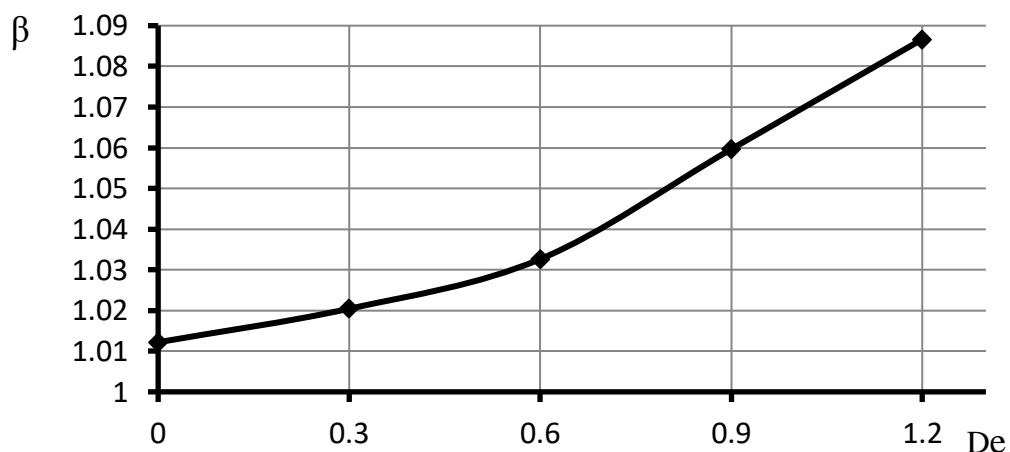


Рисунок 3.10 – Залежність величини розбухання  $\beta$  трубного профілю від числа  $De$

У разі, коли пружні властивості рідини відсутні, число ( $De = 0$  і величина розбухання екструдованого трубного профілю складає 3,5 %. Із збільшенням числа Дебори розбухання профілю збільшується і при  $De = 0,9$  воно становить 17 %, що

значно перевершує значення розбухання потоку ньютонівської рідини. Це пояснюється тим, що перед виходом з формуючого інструмента екструдера неньютонівська рідина має розвинений профіль зсувної течії, а на виході характер розподілу швидкості по перетину поступово вирівнюється і, в кінцевому рахунку, екструдований профіль розбухає і рухається без всяких напружень на зовнішній поверхні.

### 3.1.2 Течія через формуючий канал круглого поперечного перерізу

Геометричні розміри профілю: зовнішній діаметр  $D_{\text{зовн}}=0,015$  м, довжина формуючого каналу  $L_{\text{гол}}=0,04$  м; довжина вільного кінця  $L_{\text{проф}}=0,06$  м.

Геометрія круглого профілю має наступний вигляд:

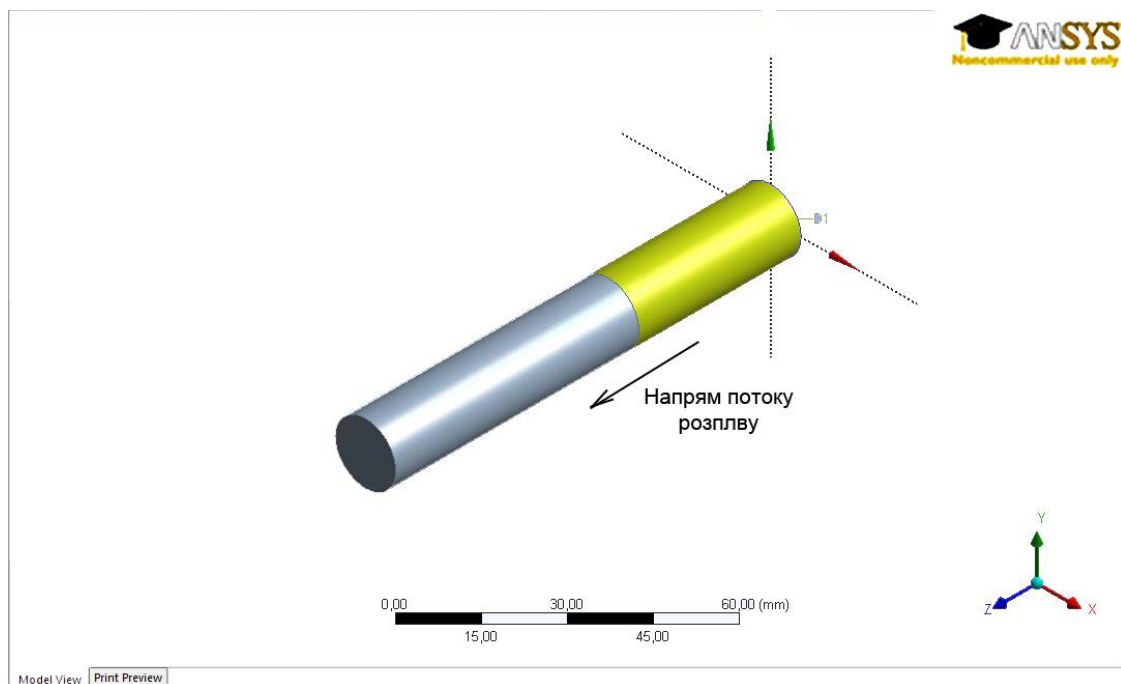


Рисунок 3.11 – Геометрія екструдованого профілю круглого поперечного перерізу

Для розрахунків методом скінчених елементів була побудована сіткова область з 18768 елементів. Було використане згущення сітки на межі головка-екструдат, оскільки нас цікавить саме ця область через протікання в ній перехідних процесів. Отримана сітка представлена на рисунку 3.12.

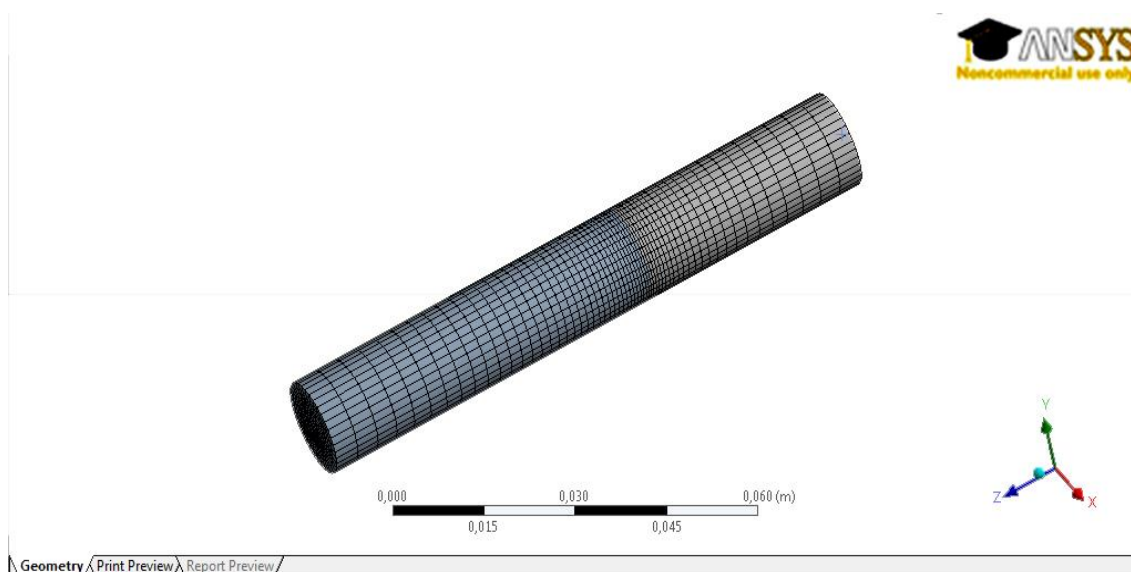


Рисунок 3.12 – Сітка для профілю круглого поперечного перерізу

Область моделювання з граничними умовами представлена на рисунку 3.13.

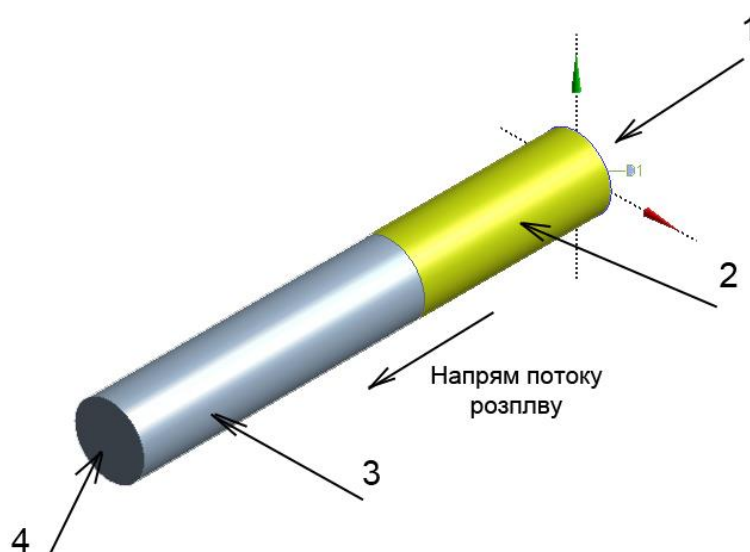


Рисунок 3.13 – Область геометрії профілю круглого поперечного перерізу з граничними умовами

1 – вхід (повністю розвинений потік розплаву); 2 – стінка (умова проковзування);  
3 – вільна поверхня ( $f_s = 0$ ,  $f_n = 0$ ,  $v_n = 0$ ); 4 – вихід ( $f_n = 0$ ,  $v_s = 0$ )

Розглянемо результати моделювання (рисунки 3.14-3.18).

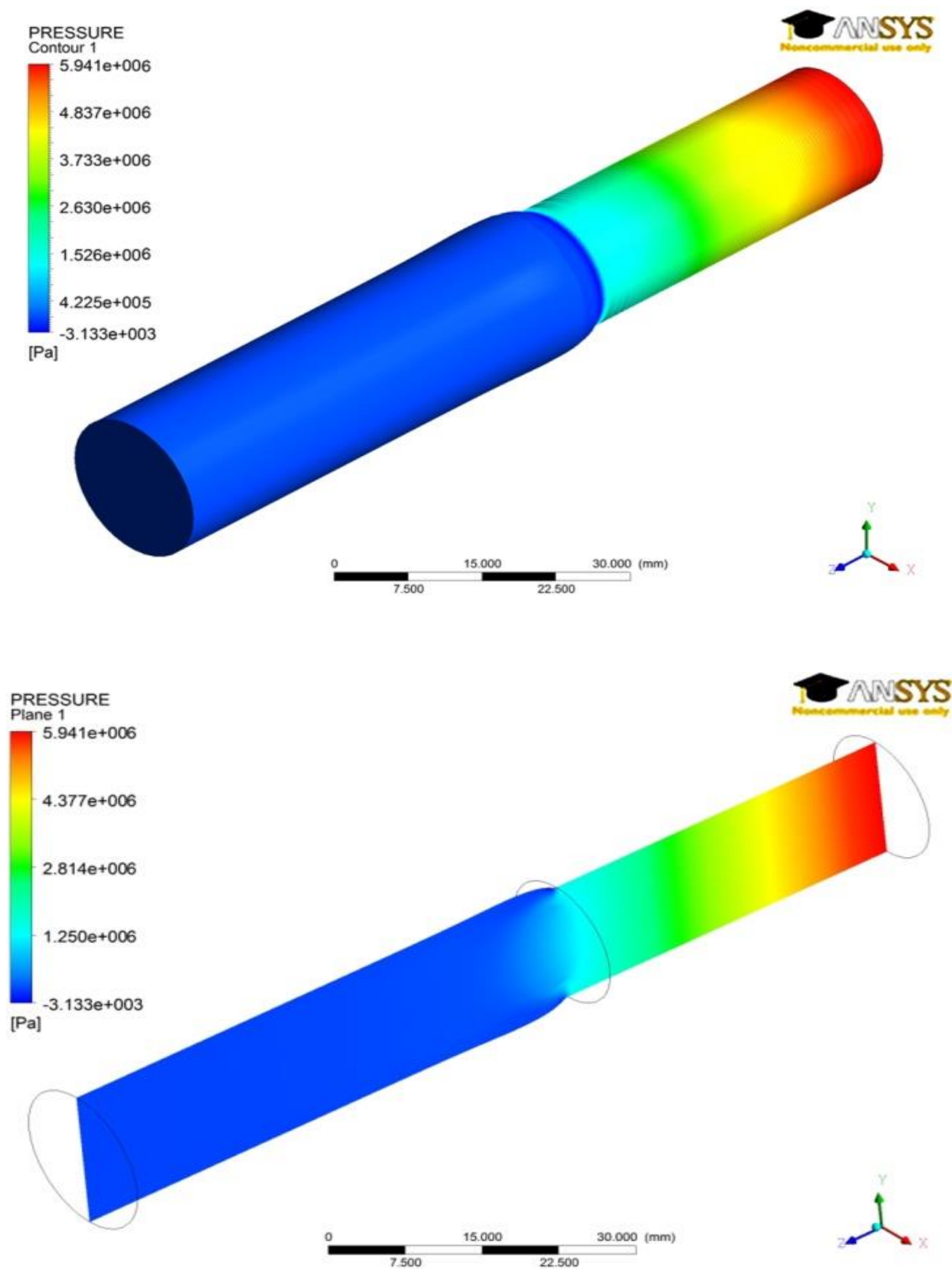


Рисунок 3.14 – Результати розрахунку тиску профілю круглого поперечного перерізу

Максимальне значення тиску дорівнює 5,9 МПа, яке досягається на вході в екструзійну головку.

Розглянемо поле швидкостей в зазорі, що представлено на рисунку 3.15.

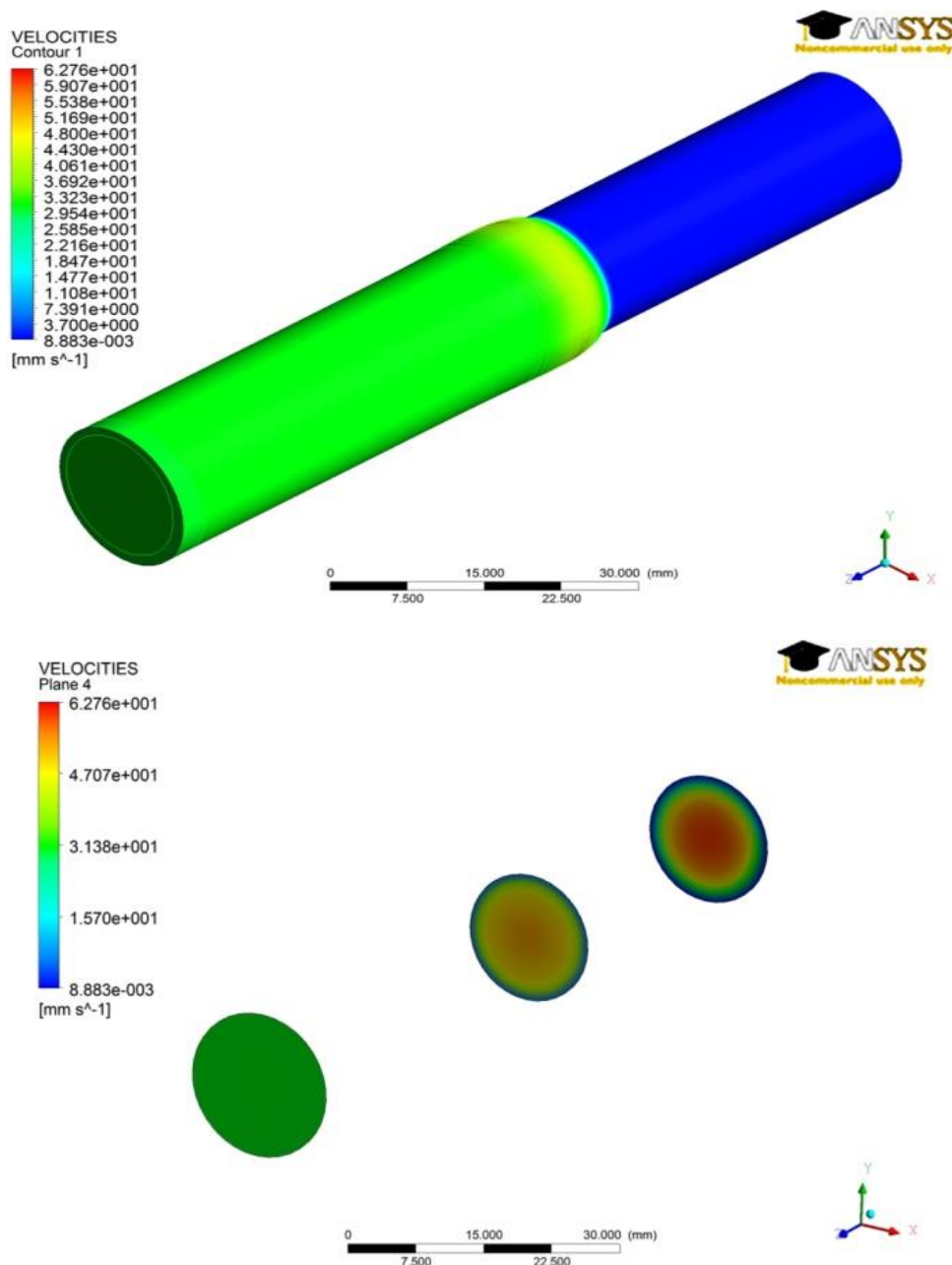


Рисунок 3.15 – Поле швидкостей профілю круглого поперечного перерізу

Максимальне значення швидкості досягається при вході в головку, а при виході з головки швидкість руху полімеру різко знижується, що пов'язано з тим, що моделюється процес формування в режимі вільної екструзії, тобто після виходу

з головки о обмежувальні стінки відсутні. Це видно з графіку на рисунку 3.16.

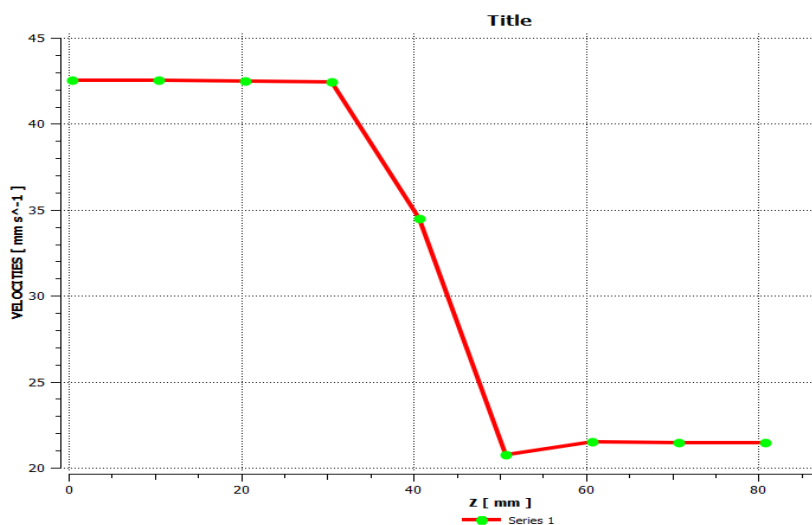


Рисунок 3.16 – Графік розподілу лінійної швидкості по довжині модельованої області

На рисунку 3.17 представлено контури поперечного перерізу круглого екструдату на різних відстанях від виходу з головки.

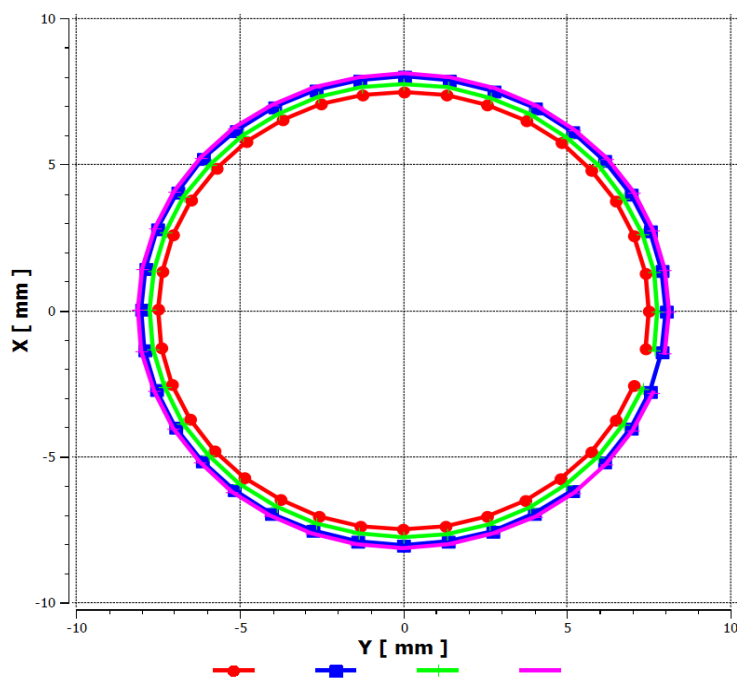


Рисунок 3.17 – Контури круглого екструдату в поперечному перерізі:

- – контур перерізу на виході з головки; ■ – контур перерізу на виході з головки через 2 мм; × – контур перерізу на виході з головки через 4 мм; - – контур стабілізованого перерізу розмірів екструдату



На рисунку 3.18 показаний графік розбухання в повздовжньому напрямі.

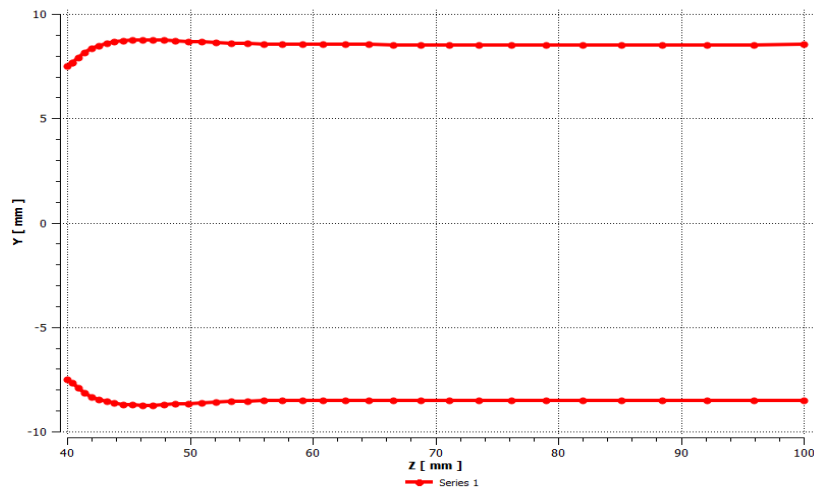


Рисунок 3.18 – Графік зміни форми круглого поперечного перерізу в повздовжньому напрямку

З графіку видно, що ефект розбухання проявляється до відстані в 4 мм від головки, після чого течія стабілізується.

Для оцінки зміни форми вільної поверхні показано результати досліджень зміни радіуса екструдованого профілю круглого поперечного перерізу, рисунок 3.19. Узагальнена залежність величини розбухання  $\beta$  для п'яти значень числа  $De$  на виході з формуючого каналу представлена на рисунку 3.20.

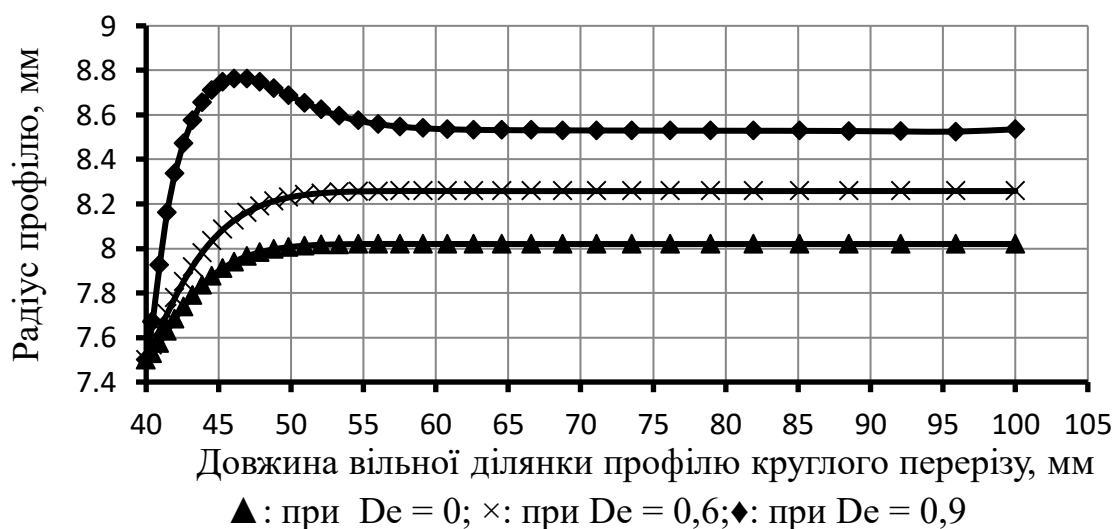


Рисунок 3.19 – Залежність зміни радіуса профілю круглого поперечного перерізу по довжині вільної ділянки екструдату

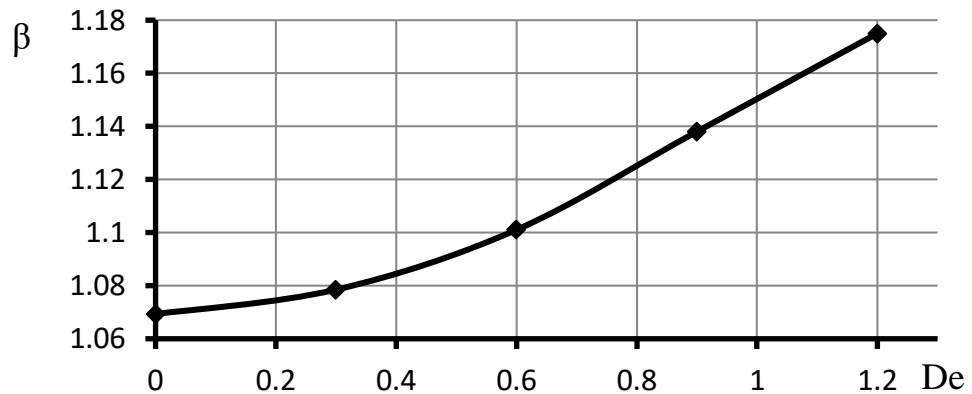


Рисунок 3.20 – Залежність величини розбухання  $\beta$  профілю круглого поперечного перерізу від числа  $De$

У разі, коли пружні властивості рідини відсутні, число  $De = 0$  і величина розбухання екструдованого профілю круглого поперечного перерізу складає 5,2 %. Із збільшенням числа Дебори розбухання профілю збільшується і при  $De = 0,9$  становить 12,5 %, що значно перевершує значення розбухання потоку ньютонівської рідини. Це пояснюється тим, що перед виходом з формуючого інструмента екструдера неньютонівська рідина має розвинений профіль зсувної течії, а на виході характер розподілу швидкості по перетину поступово вирівнюється і, в кінцевому рахунку, екструдований профіль розбухає і рухається без всяких напружень на зовнішній поверхні.

### 3.1.3 Течія через формуючий канал прямокутного поперечного перерізу

Геометрія профілю представлена на рисунку 3.21, сітка – на рисунку 3.22. Область має довжину 0,1 м, де  $L_{гол}=0,04$  м;  $L_{проф}=0,06$  м, висота пластинки – 0,0002 м. Область розбита на 12000 скінченних елементів.

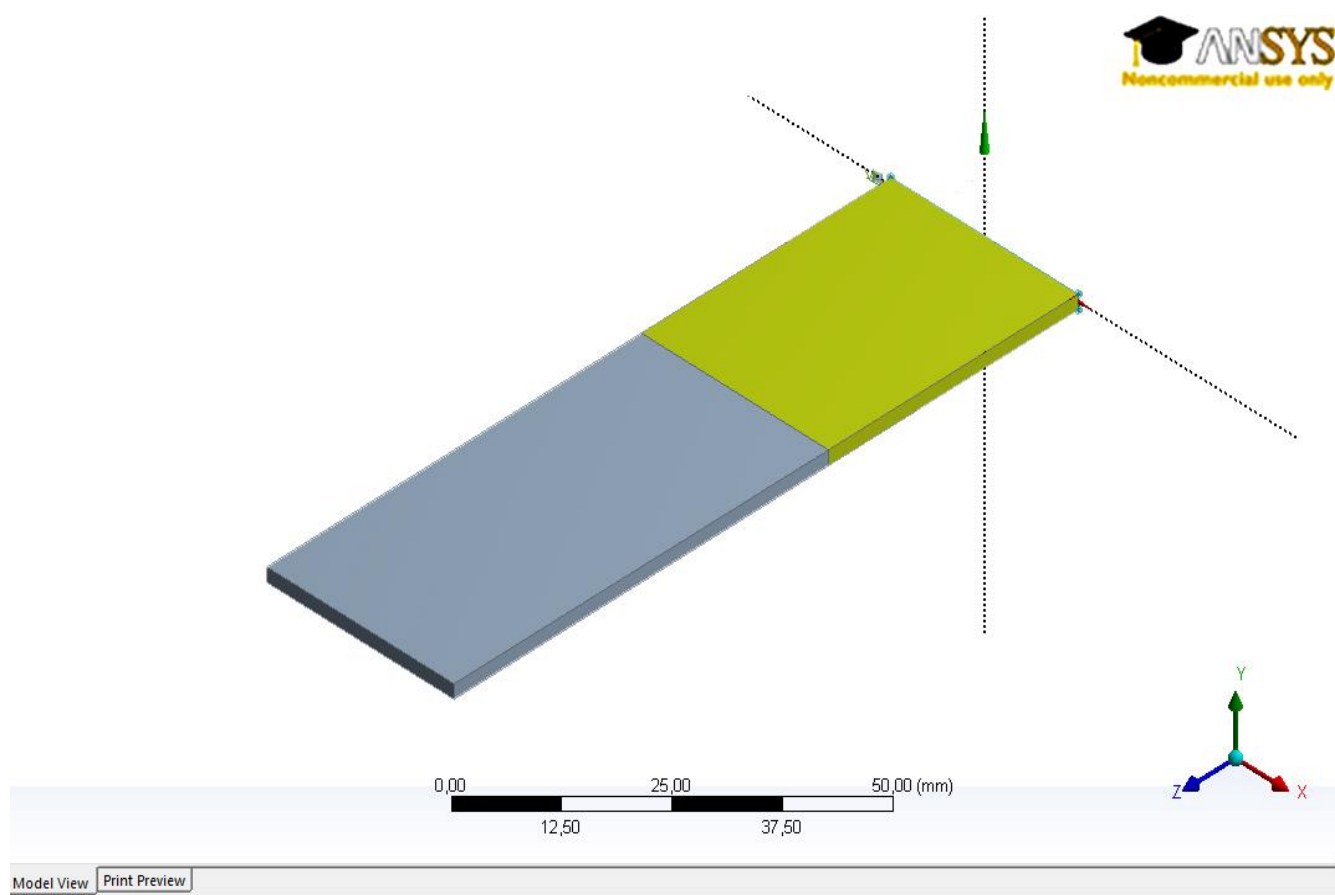


Рисунок 3.21 – Геометрія профілю прямокутного поперечного перерізу

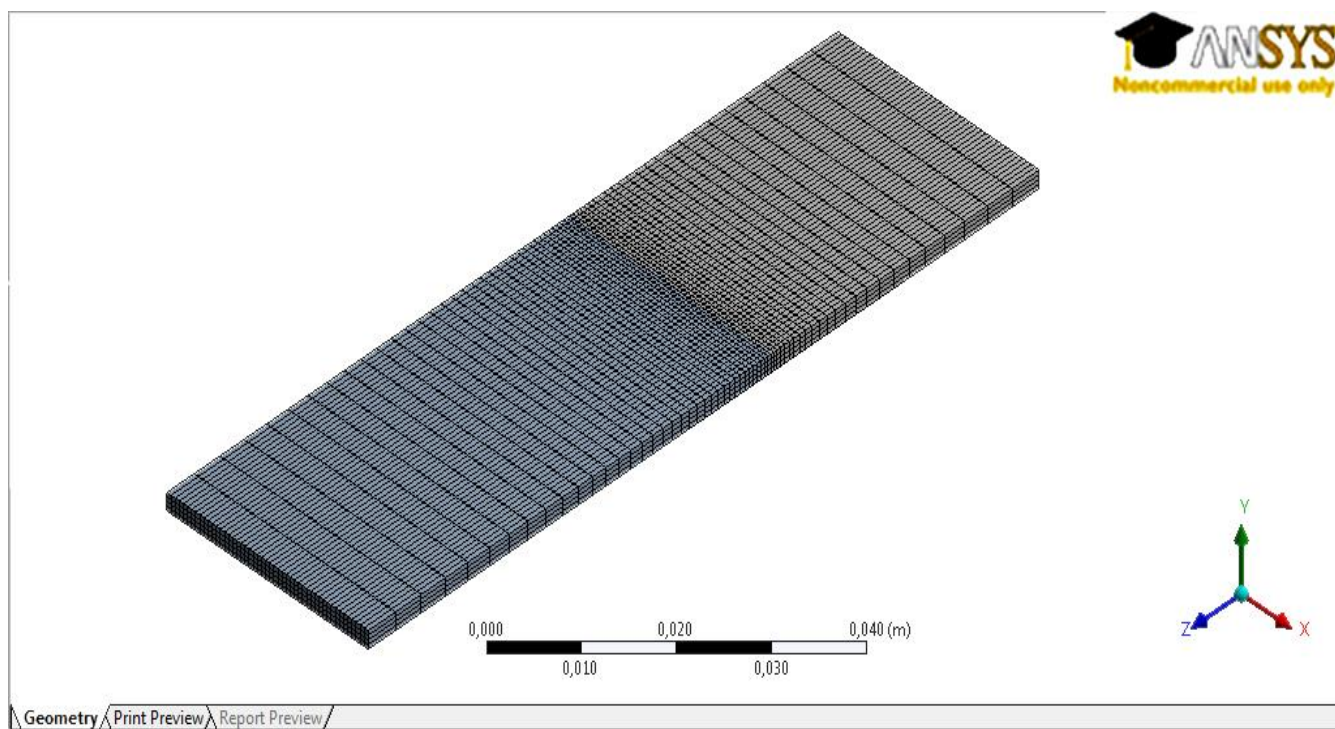


Рисунок 3.22 – Сітка для моделювання течії полімеру через прямокутний зазор

Область моделювання з граничними умовами представлена на рисунку 3.23.

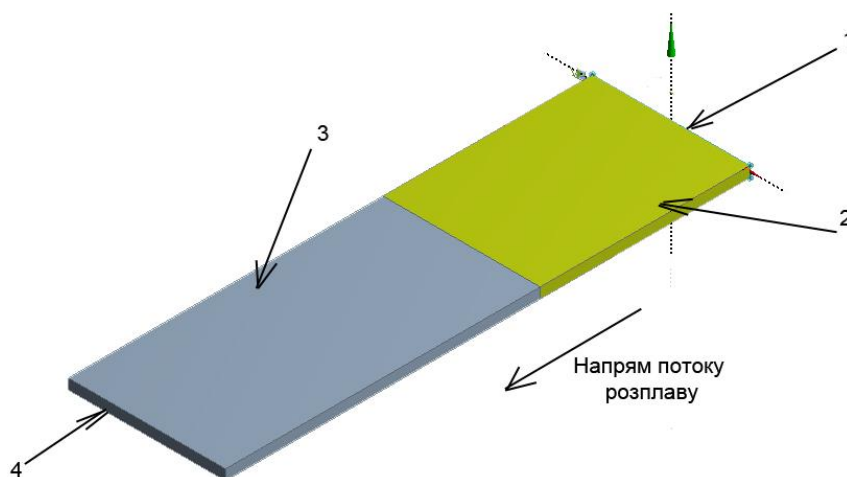


Рисунок 3.23 – Область геометрії профілю прямокутного поперечного перерізу з граничними умовами

1 – вхід (повністю розвинений потік розплаву); 2 – стінка (умова проковзування);  
3 – вільна поверхня ( $f_s = 0$ ,  $f_n = 0$ ,  $v_n = 0$ ); 4 – вихід ( $f_n = 0$ ,  $v_s = 0$ )

На рисунку 3.24 представлено розподіл тиску по довжині головки, максимальне значення досягається при вході в головку і становить 6 МПа.

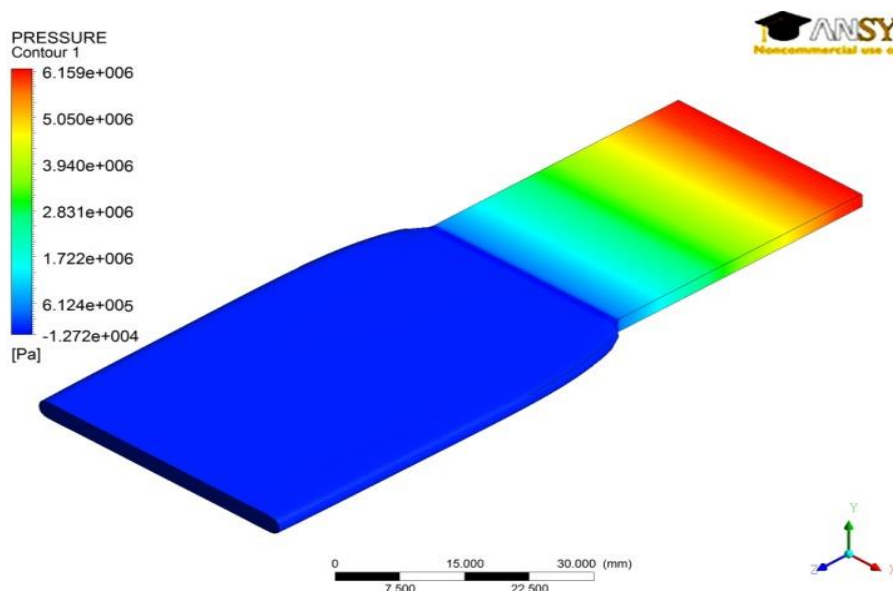


Рисунок 3.24 – Розподіл тиску по довжині головки

На рисунку 3.25-3.26 показаний розподіл швидкостей для геометрії типу «пластинка».

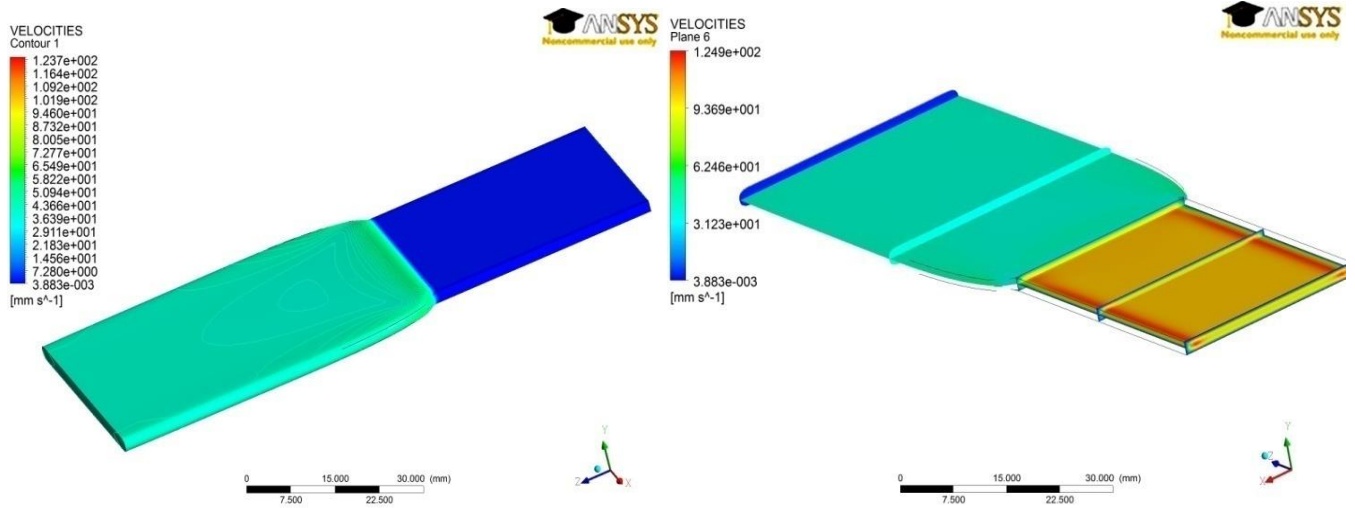


Рисунок 3.25 – Розподіл швидкостей для геометрії прямокутного поперечного перерізу

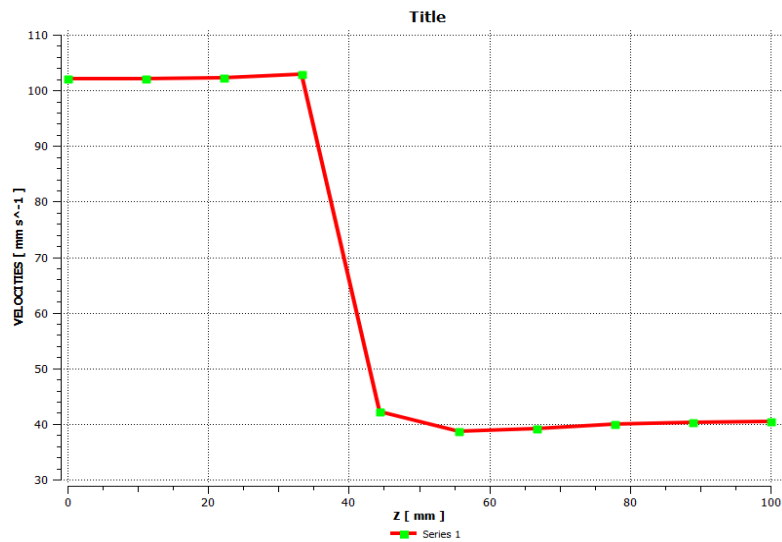


Рисунок 3.26 – Графік розподілу швидкостей для геометрії прямокутного поперечного перерізу

З рисунків 3.25-3.26 видно, що швидкість різко зменшується після виходу з формуючої головки і лінійно зменшується по довжині екструдованого профілю.

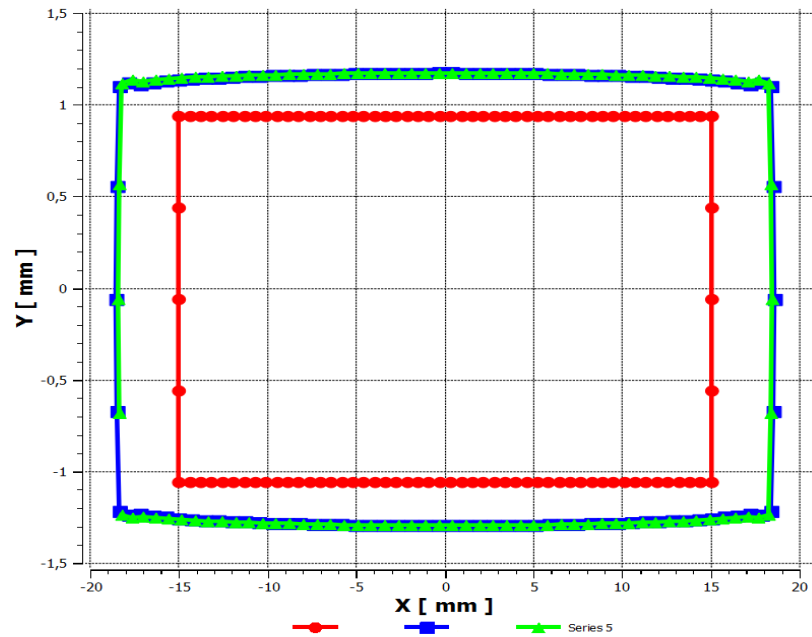


Рисунок 3.27 – Графік зміни форми профілю типу пластинка в поперечному напрямку

- – контур перерізу на виході з головки; ■ – геометрія екструдованого профілю з урахуванням ефекту розбухання через 25 мм відповідно; ▲ – контур стабілізованого перерізу розмірів екструдату

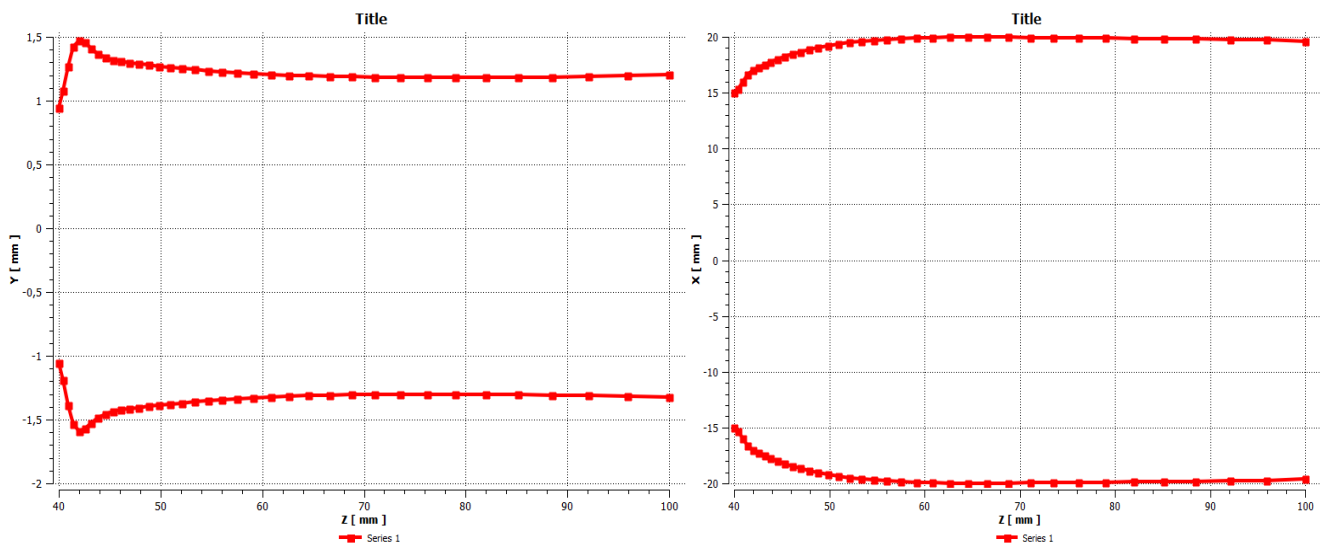
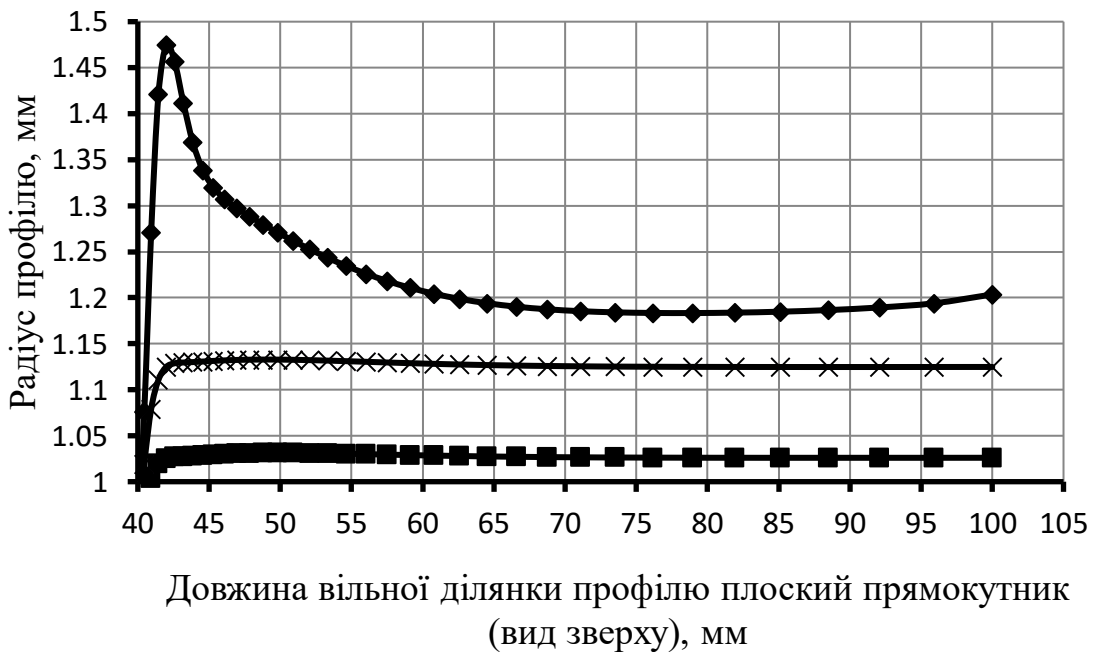
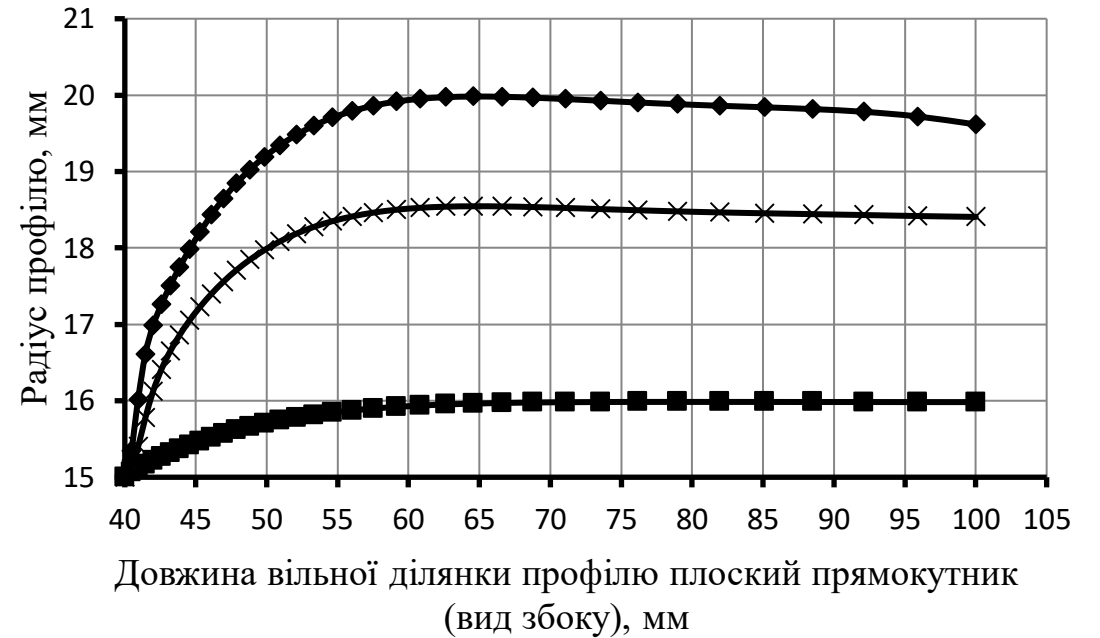


Рисунок 3.28 – Графік зміни форми типу пластинка в повздовжньому напрямі (вигляд збоку та зверху відповідно)

Для оцінки зміни форми вільної поверхні показано результати досліджень зміни радіуса екструдованого профілю прямокутного попеченого перерізу, рисунок

3.29 (вигляд збоку та зверху відповідно). Узагальнена залежність величини розбухання  $\beta$  для п'яти значень числа  $De$  на виході з формуючого каналу представлена на рисунку 3.30



■: при  $De = 0$ ; ×: при  $De = 0,6$ ;◆: при  $De = 0,9$

Рисунок 3.29 – Залежність зміни радіуса профілю прямокутного поперечного перерізу по довжині вільної ділянки екструдату (вигляд збоку та зверху відповідно)

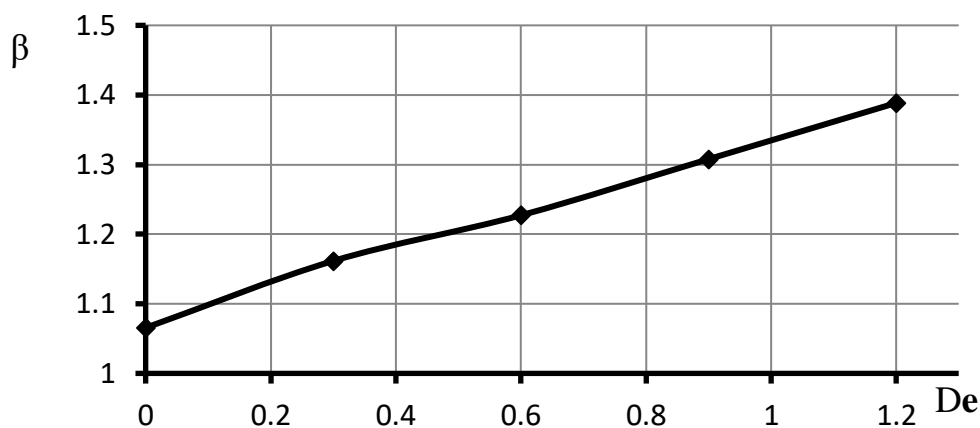


Рисунок 3.30 – Залежність величини розбухання  $\beta$  профілю прямокутного поперечного перерізу від числа  $De$

У разі, коли пружні властивості рідини відсутні, число  $De = 0$  і величина розбухання екструдованого прямокутного профілю складає 10 %, що відповідає експериментам Уайлла і Хілла [97]. Із збільшенням числа  $De$  розбухання профілю збільшується і при  $De = 0,9$  воно становить 19,9 %, що значно перевершує значення розбухання потоку ньютонівської рідини. Це пояснюється тим, що перед виходом з формуючого інструмента екструдера неньютонівська рідина має розвинений профіль зсувної течії, а на виході характер розподілу швидкості по перетину поступово вирівнюється і, в кінцевому рахунку, екструдований профіль розбухає і рухається без всяких напруження на зовнішній поверхні.

З графіку видно, що при підвищенні швидкості екструзії коефіцієнт розбухання профілю зростає.

### 3.1.4 Моделювання течії розплаву через формуючий канал порожнього квадратного поперечного перерізу

Геометричні розміри профілю: квадратний профіль  $0,04 \text{ м} \times 0,04 \text{ м}$ , товщина стінки  $0,002 \text{ м}$ , довжина головки  $L_{\text{гол}}=0,03 \text{ м}$ ;  $L_{\text{проф}}=0,05 \text{ м}$ . Геометрія представлена на рисунку 3.31.

Була побудована сіткова область, в якій було виконано згущення сітки на межі головки-екструдат, оскільки нас цікавить саме ця область через проходження



в ній перехідних процесів. Отримана сітка представлена на рисунку 3.29.

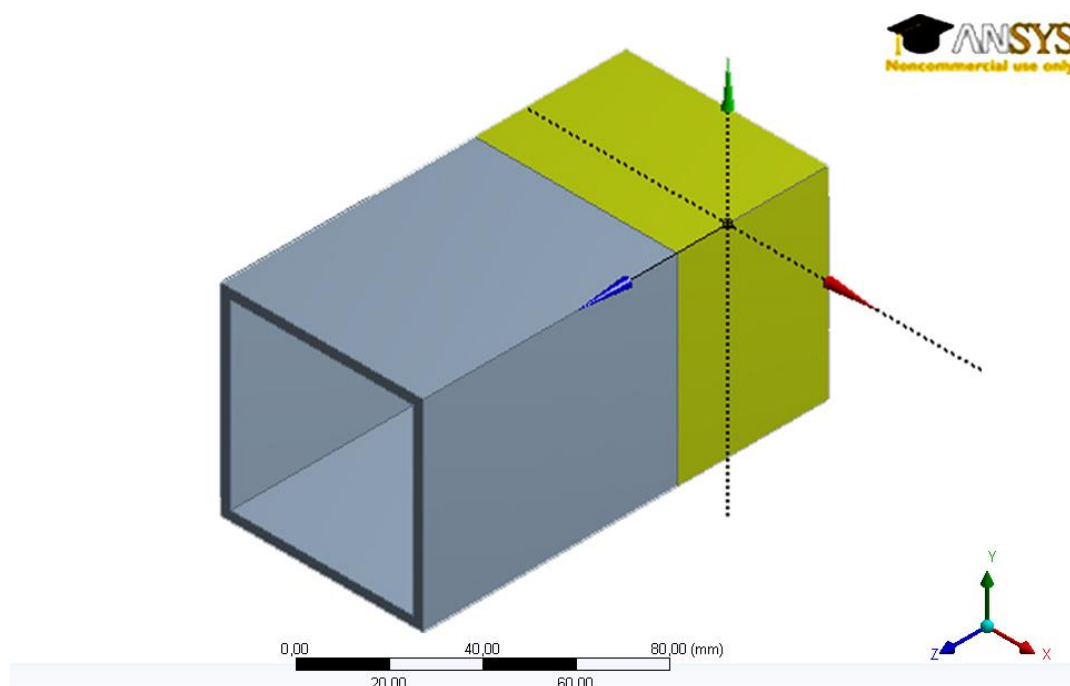


Рисунок 3.31 – Геометрія порожнього профілю квадратного поперечного перерізу

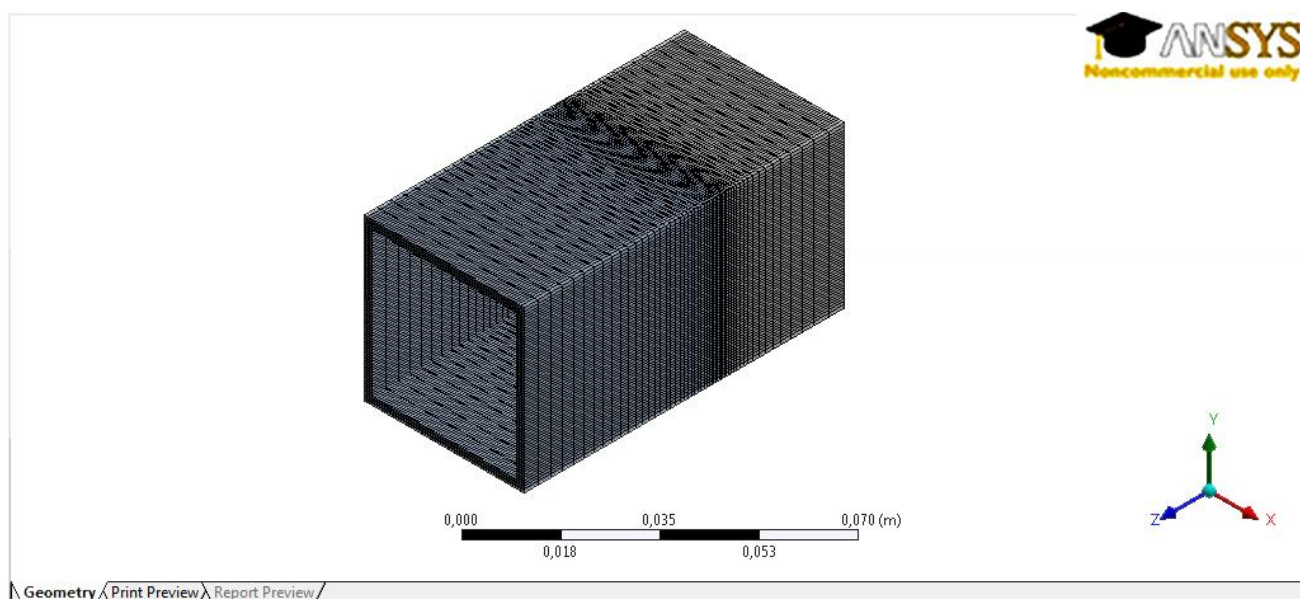


Рисунок 3.32 – Скінченно-елементна сітка для порожнього профілю квадратного поперечного перерізу

Область моделювання з граничними умовами представлена на рисунку 3.33.

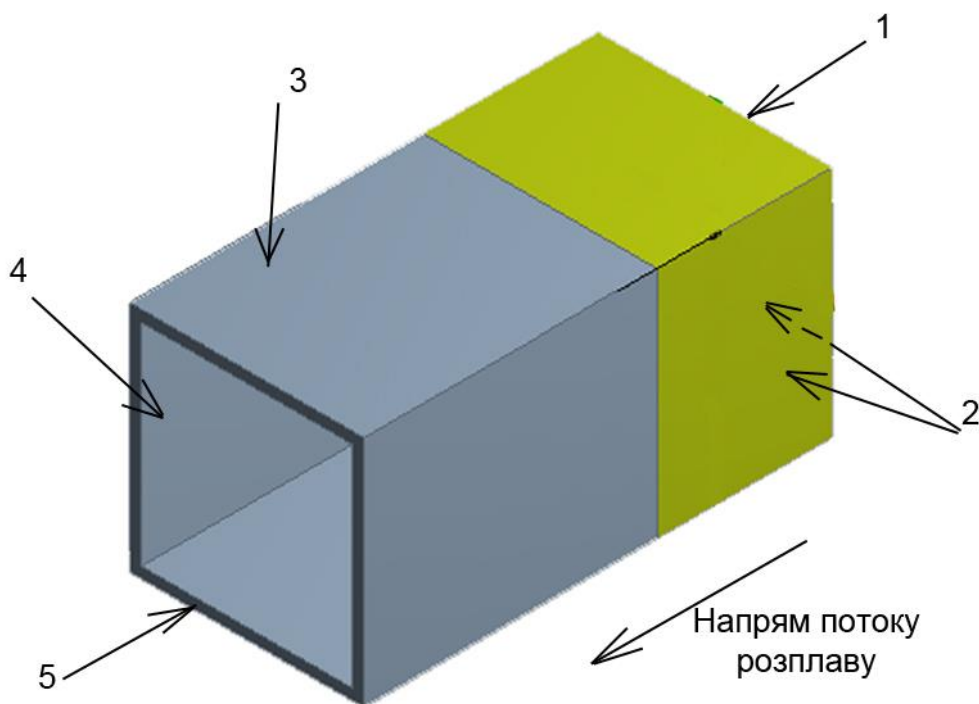
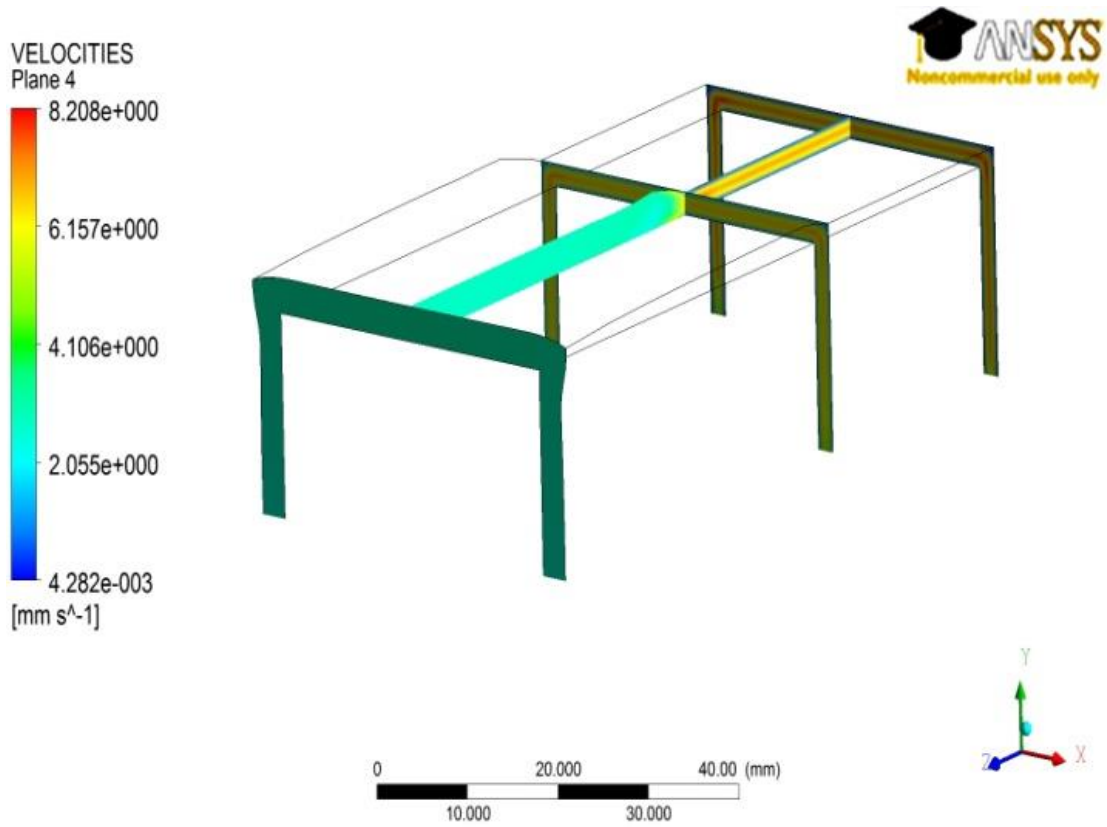


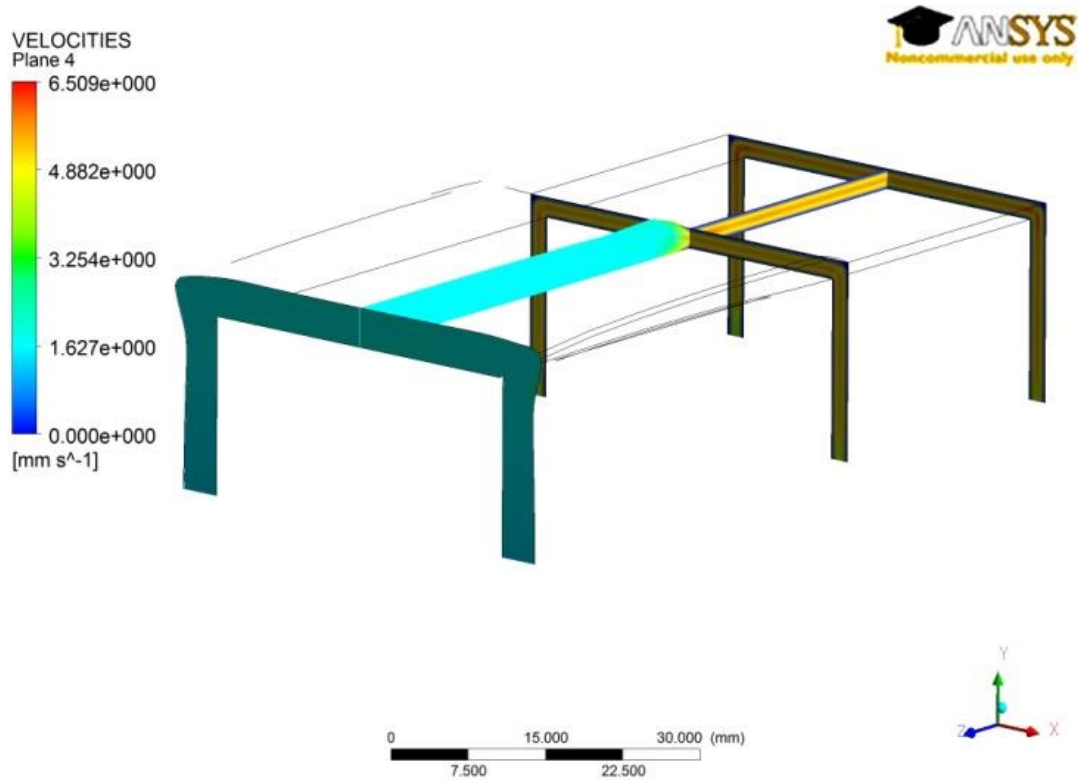
Рисунок 3.33 – Область геометрії порожнього профілю квадратного поперечного перерізу з граничними умовами

1. вхід (повністю розвинений потік розплаву); 2. стінка (умова проковзування);
3. вільна поверхня ( $f_s = 0$ ,  $f_n = 0$ ,  $v_n = 0$ ); 4. симетрія ( $v_n = 0$ ,  $f_s = 0$ );
5. вихід ( $f_n = 0$ ,  $v_s = 0$ )

Розраховане поле швидкостей представлено на рисунку 3.34 для випадку проковзування і повного прилипання відповідно. З підвищенням коефіцієнту тертя швидкість руху полімеру в головці знижується. Максимальні значення досягаються на виході з формуючого отвору на кутах, де утворюються так звані «застійні зони».



a)



b)

Рисунок 3.34 – Профілі швидкостей при різних значеннях коефіцієнту тертя  
а – при  $k=10000$ ; б –  $k=100000$

Для визначення умови проковзування полімеру в каналі формуючого інструменту використовували залежність [98].

Графік розподілу швидкості екструдату після виходу з головки показано на рисунку 3.35.

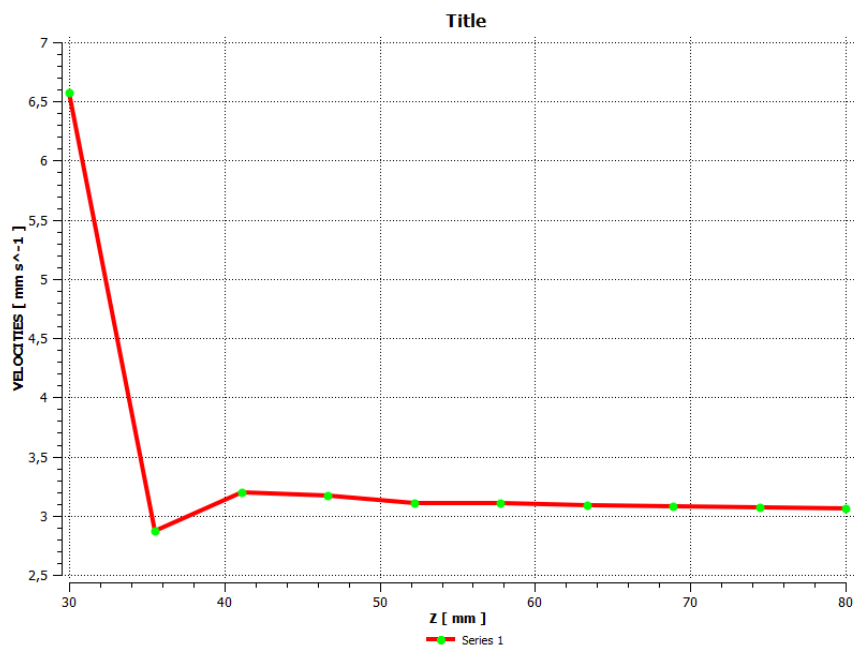


Рисунок 3.35 – Графік розподілу швидкості порожнього профілю квадратного поперечного перерізу по довжині модельованої області

Вигляд графіку на рисунку 3.35 подібний до оберненої залежності зміни перерізу екструдату по довжині. Швидкість поступово зменшується після виходу з формуючого отвору.

В той же час, за наявності пристінного проковзування швидкість розплаву по довжині каналу дещо зростає.

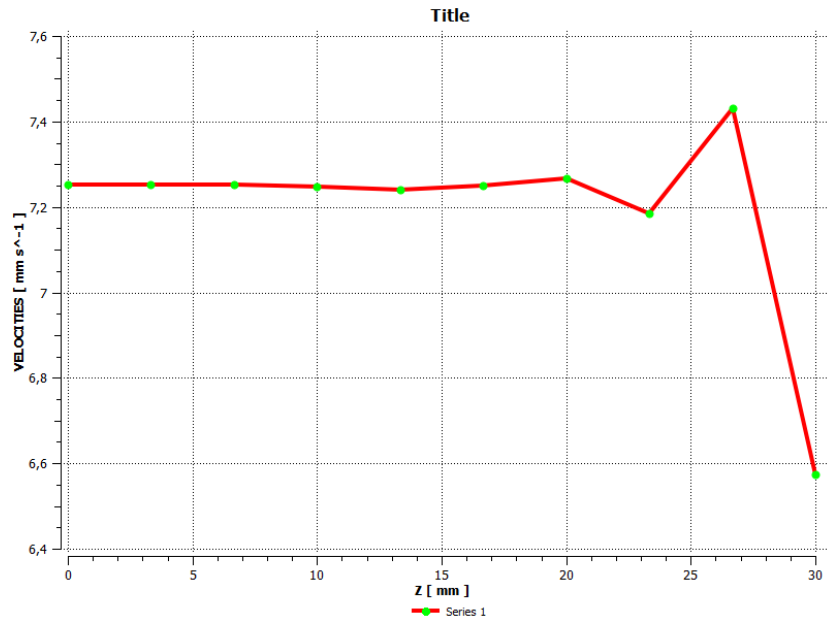


Рисунок 3.36 – Розподіл швидкості порожнього профілю квадратного поперечного перерізу в головці

На рисунку 3.36 видно, що урахуванням тертя матеріалу по стінках по довжині швидкість збільшується на 0,5 %.

Розглянемо розрахунки тиску для модельованої області з урахуванням проковзування і без проковзування відповідно (рисунок 37 а, б).

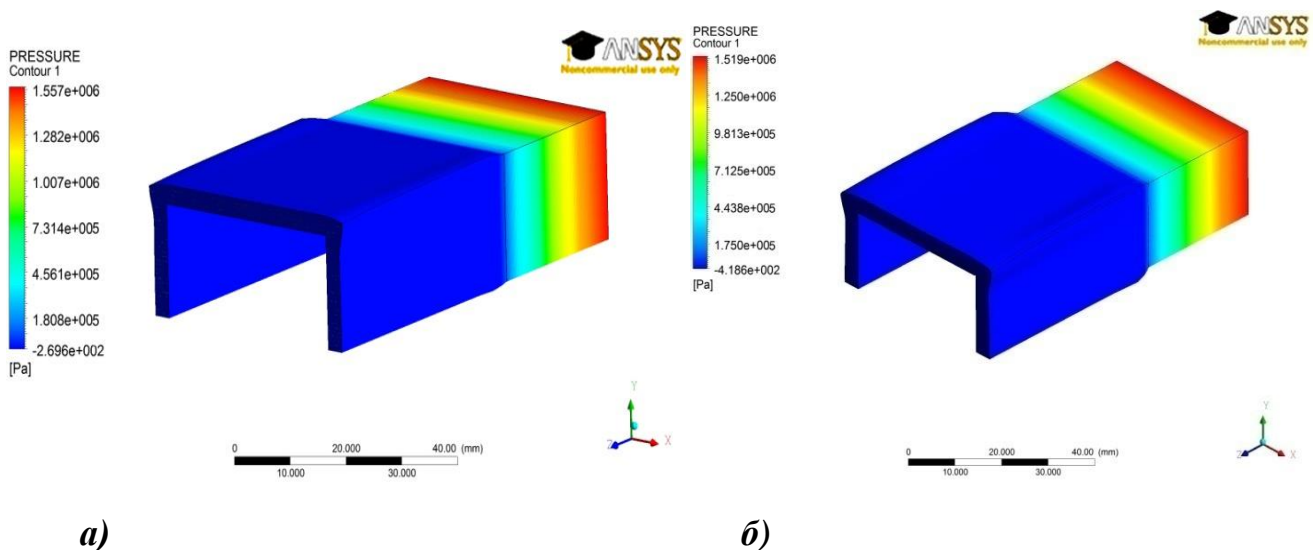


Рисунок 3.37 – Розподіл тиску порожнього профілю квадратного поперечного перерізу з урахуванням проковзування і без урахування

а –  $k=10000$ ; б –  $k=100000$

На рисунку 3.37 представлені графіки розподілу тиску при різних коефіцієнтах тертя  $k=10000$ ,  $k=100000$  і максимальне значення становить  $1,6 \cdot \text{МПа}$ , та  $1,5 \text{ МПа}$  відповідно.

На рисунку 3.38 представлено контури перерізу екструдату на різних відстанях від виходу з головки.

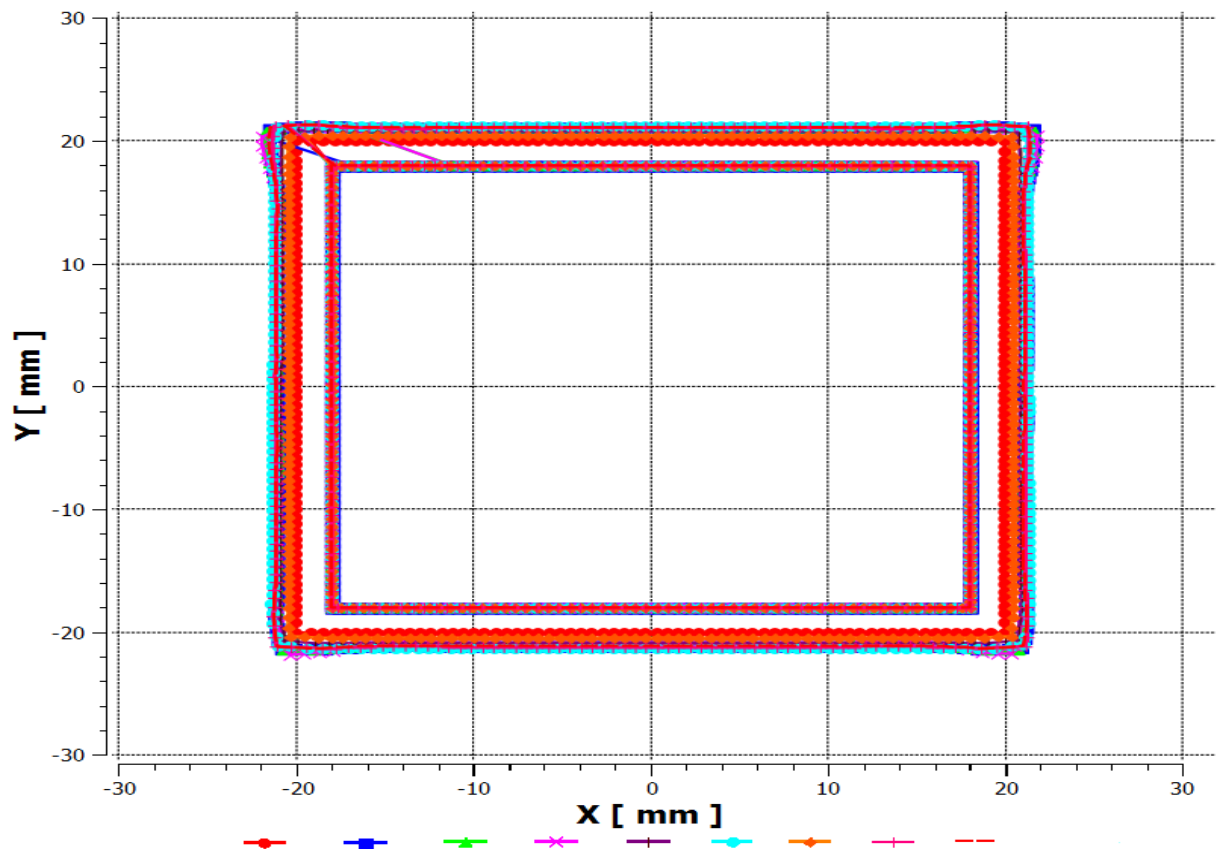


Рисунок 3.38– Контури порожнього профілю квадратного поперечного перерізу в поперечному перерізі

- – контур перерізу на виході з головки; ■ – контур перерізу через 30 мм після виходу з головки; ▲ – контур перерізу через 40 мм після виходу з головки; × – контур стабілізованого перерізу розмірів екструдату; | – контур перерізу через 3 мм після виходу з головки; 0 – контур перерізу через 5 мм після виходу з головки; ◆ – контур перерізу через 1,5 мм після виходу з головки;
- + – контур перерізу через 10 мм після виходу з головки; -- – контур перерізу через 20 мм після виходу з головки

На рисунку 3.39 представлено графік зміни форми профілю по довжині екструдованого виробу.

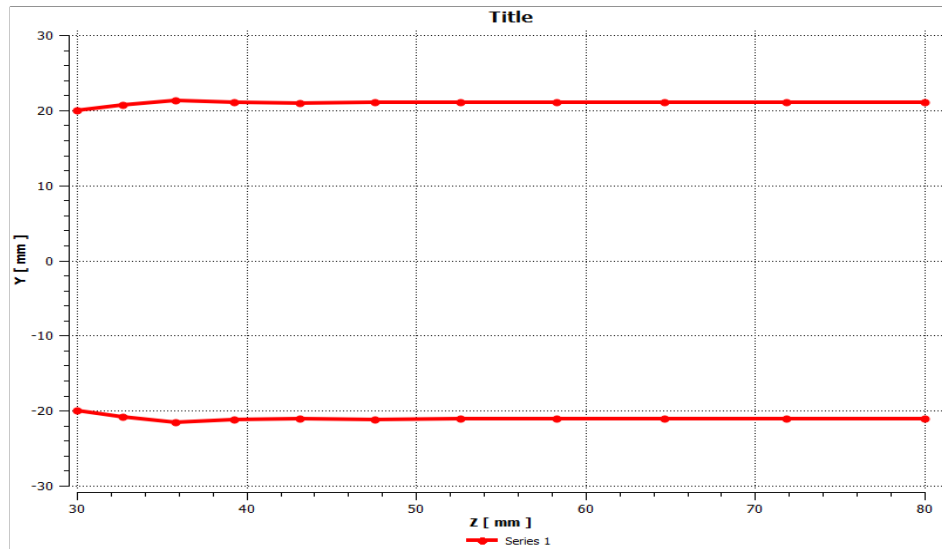


Рисунок 3.39 – Графік форми в повздовжньому напрямі

Для оцінки зміни форми вільної поверхні показано результати досліджень зміни радіуса екструдованого профілю квадратного поперечного перерізу, рисунок 3.40. Узагальнена залежність величини розбухання  $\beta$  для п'яти значень числа  $De$  на виході з формуючого каналу представлена на рисунку 3.41 (вигляд збоку та зверху відповідно).

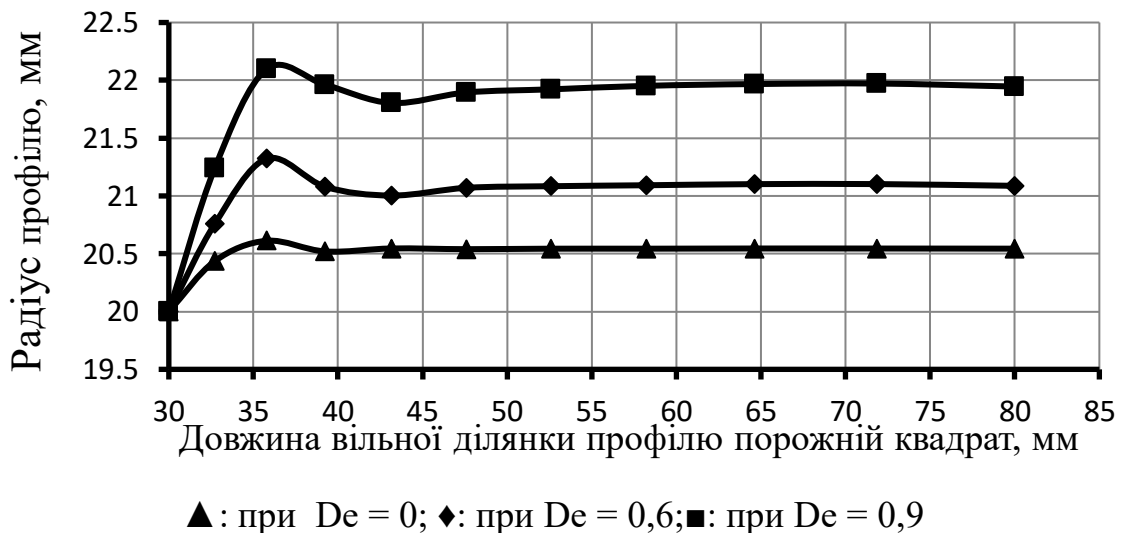


Рисунок 3.40 – Залежність зміни радіуса профілю квадратного поперечного перерізу по довжині вільної ділянки екструдату

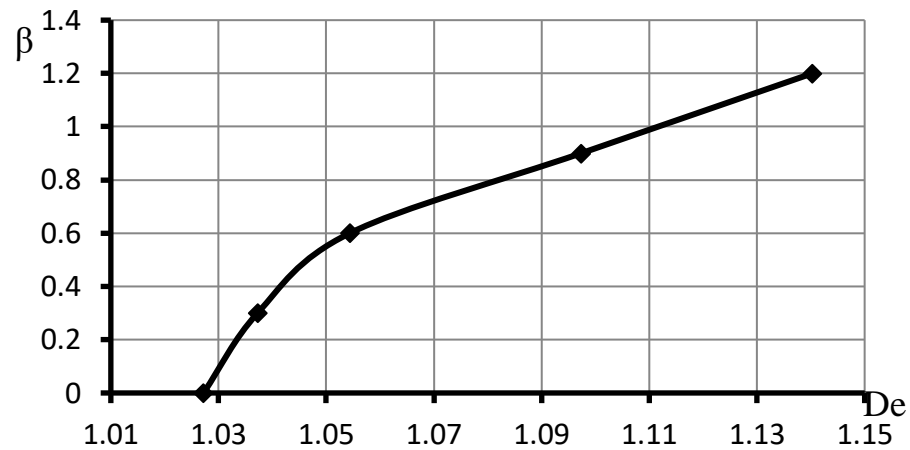


Рисунок 3.41 – Залежність величини розбухання  $\beta$  профілю квадратного поперечного перерізу від числа  $De$

У разі, коли пружні властивості рідини відсутні, число  $De = 0$  і величина розбухання екструдованого квадратного профілю складає 6,1 %. Із збільшенням числа  $De$  розбухання профілю збільшується і при  $De = 0,9$  воно становить 22 %, що значно перевершує значення розбухання потоку ньютонівської рідини. Це пояснюється тим, що перед виходом з формуючого інструмента екструдера неньютонівська рідина має розвинений профіль зсувної течії, а на виході характер розподілу швидкості по перетину поступово вирівнюється і, в кінцевому рахунку, екструдований профіль розбухає і рухається без всяких напружень на зовнішній поверхні.

### 3.2 Числовий експеримент для дослідження експериментального зразка профільних погонажних головок

Даний експеримент присвячений моделюванню тривимірного потоку неньютонівської рідини, яка протікає через екструзійну головку. Процес проектування починається із задавання форми виробу. Виріб являє собою Ш-подібний профіль (рисунок 3.42) прямокутного перерізу  $20 \text{ мм} \times 10 \text{ мм}$  з внутрішнім ребром товщиною 2 мм. Розглядається тільки вихідна ділянка формуючого каналу, яка є однією з найбільш важливих елементів у процесі екструзії, так як вона повинна компенсувати деформації екструдату після виходу з головки до



досягнення заданої форми [9].

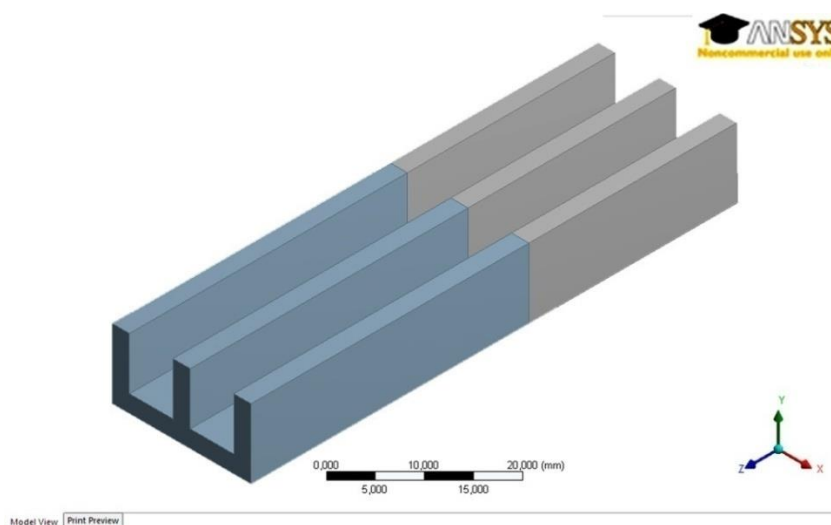


Рисунок 3.42 – Геометрична модель профілю при течії через Ш-подібний канал експериментальної головки

Геометричні розміри профілю: 20 мм x10 мм, довжина головки  $L_{\text{гол}}=0,3$  м; довжина вільного кінця  $L_{\text{проф}}=0,4$  м.

Задавалась марка матеріалу, робоча температура та граничні умови. Вид навантаження в даному випадку – швидкість руху рідини на вході в головку  $U_{\text{сер}}$ , яке визначали як

$$U_{\text{сер}} = \frac{Q}{f_{\text{ВХ}}}. \quad (3.1)$$

де  $Q$  – задана продуктивність,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $f$  – площа вхідного перерізу,  $\text{м}^2$ .

В кінцевому результаті була отримана розрахункова модель каналу, готова для обчислення, її загальний вигляд зображено на рисунку 3.43. Мінімальна необхідна кількість вузлів вибиралась з умови мінімальних змін (до 1 %) розподілу швидкостей на виході та відсутності нерівномірності швидкостей між елементами.

Для розрахунків методом скінчених елементів була побудована сіткова область з 33408 елементів. Було використане згущення сітки на межі головка-екструдат, оскільки об'єктом досліджень є саме ця область через проходження в ній

перехідних процесів.

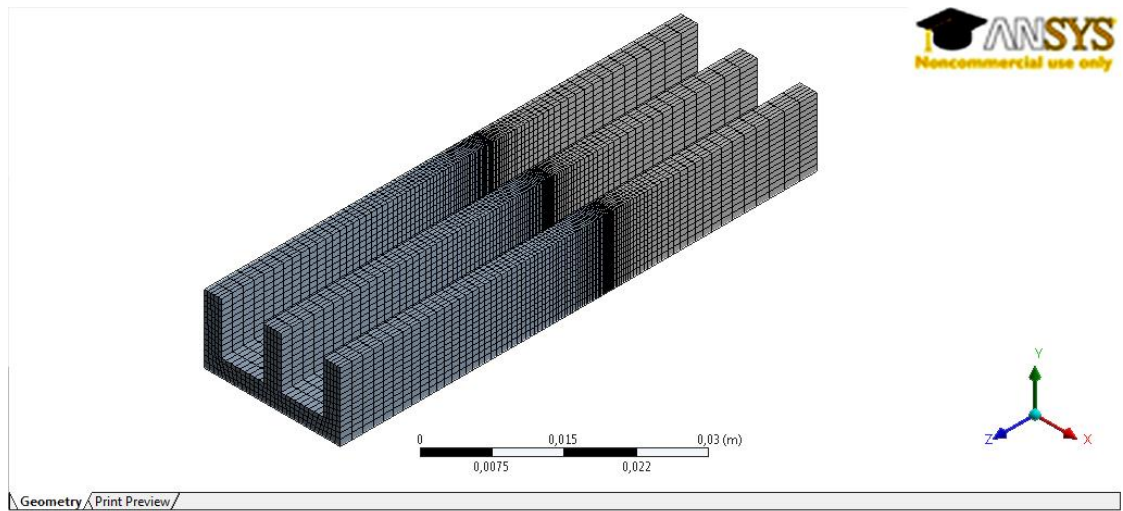


Рисунок 3.43 – Вихідна ділянка формуючого каналу головки Ш-подібної форми та вільна ділянка профілю з нанесеною розрахунковою сіткою скінченних елементів

Область моделювання з граничними умовами представлена на рисунку 3.44.

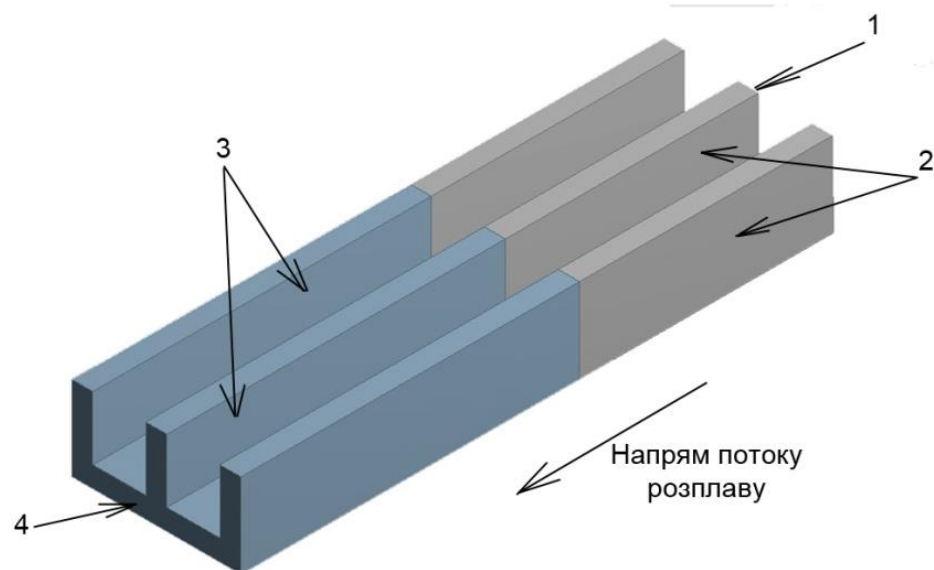


Рисунок 3.44 – Область геометрії профілю Ш-подібної форми з граничними умовами

1. вхід (повністю розвинений потік розплаву); 2. стінка (умова проковзування);
3. вільна поверхня ( $f_s = 0$ ,  $f_n = 0$ ,  $v_n = 0$ ); 4. вихід ( $f_n = 0$ ,  $v_s = 0$ )

Розглянемо результати моделювання (рисунок 3.45-3.52).

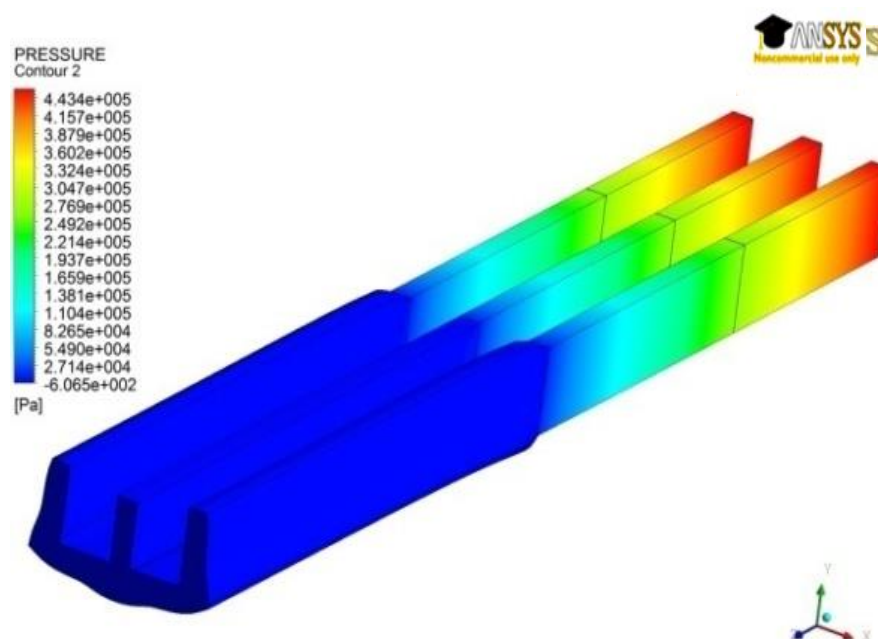


Рисунок 3.45 – Результати розрахунку тиску Ш-подібної форми

Максимальне значення тиску дорівнює  $4,434 \cdot \text{Па}$ , яке досягається на вході в екструзійну головку.

Розглянемо контури розподілу швидкостей в Ш-подібному зазорі, що представлено на рисунку 3.46.

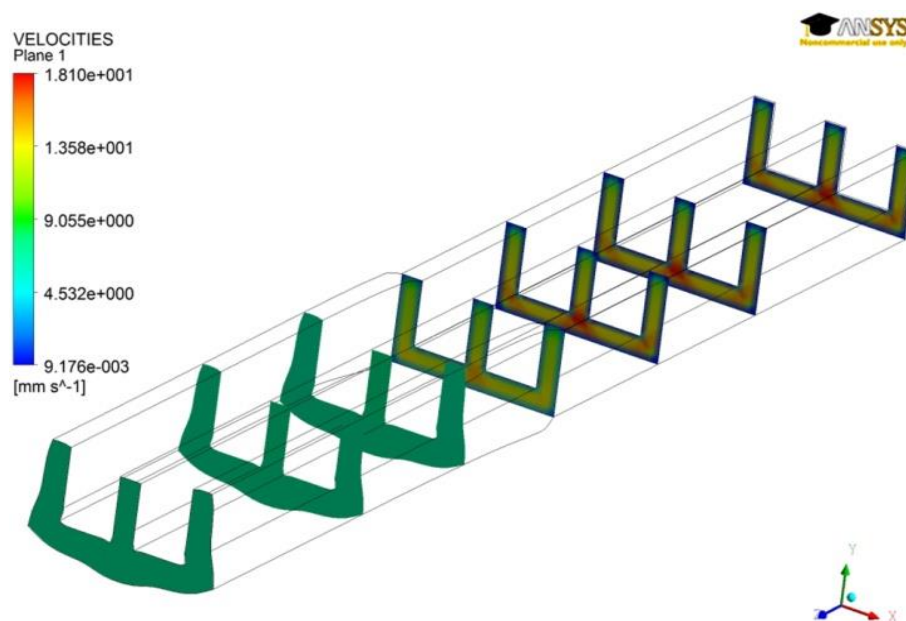


Рисунок 3.46 – Контури розподілу поля швидкостей Ш-подібної форми

На наведеному рисунку спостерігається поступове зменшення швидкостей внаслідок їх перебудови в поперечному напрямі, досягаючи постійного значення на деякій відстані від головки. Сумарний об'єм речовини при цьому зберігається.

Максимальне значення швидкості досягається при вході в головку, а при виході з головки швидкість руху полімеру різко знижується, що пов'язано з тим, що моделюється процес формування в режимі вільної екструзії, тобто після виходу з головки обмежувальні стінки відсутні. Це видно з графіку на рисунку 3.47.

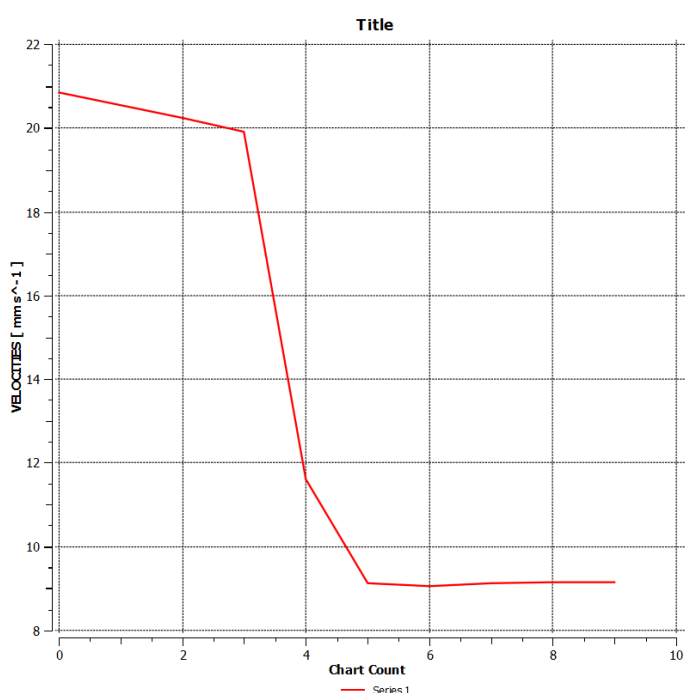


Рисунок 3.47 – Графік розподілу лінійної швидкості по довжині модельованої області Ш-подібної форми

На рисунку 3.48 представлено контури перерізу екструдату на різних відстанях від виходу з головки. 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.

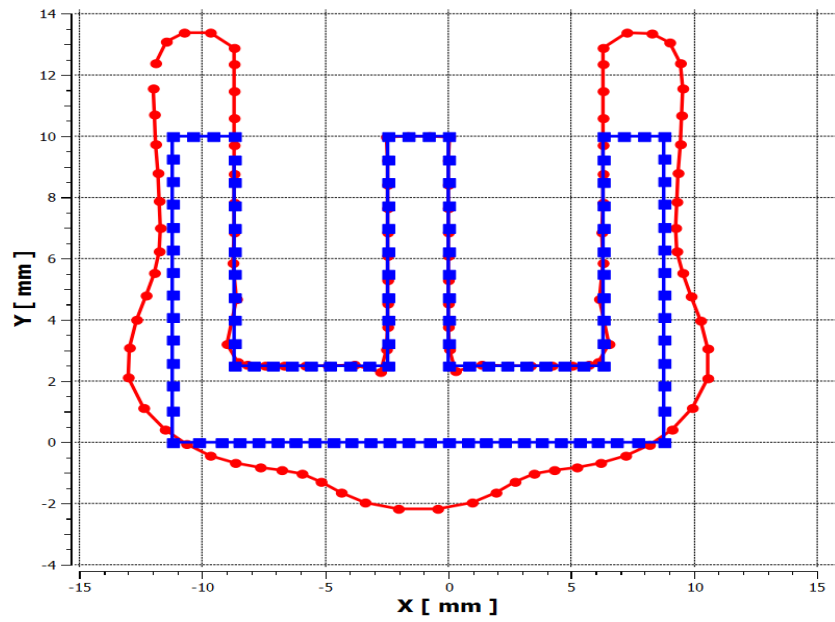


Рисунок 3.48 – Контури поперечних перерізів профілю на виході з формуючого каналу головки і стабілізованих розмірів екструдату Ш-подібної форми

■ – контур перерізу на виході з головки; ● – контур стабілізації перерізу екструдату

На рисунку 3.46 показаний графік розбухання в повздовжньому напрямі.

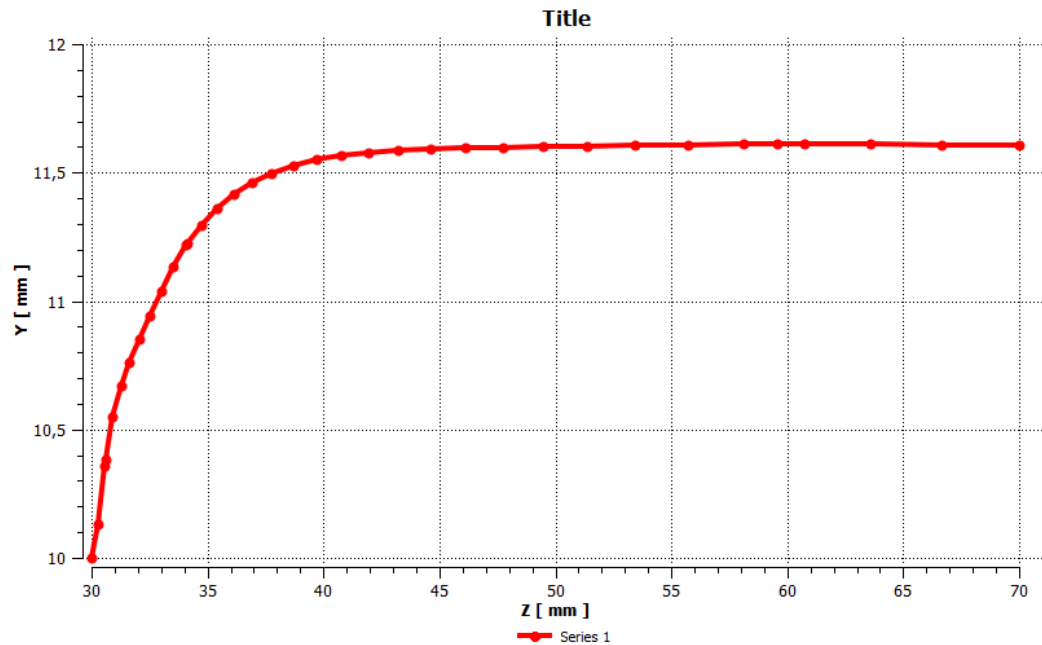


Рисунок 3.49 – Графік зміни форми екструдату Ш-подібної форми в повздовжньому напрямку

Як видно з графіку на рисунку 3.49, через 45 мм після виходу з головки течія стабілізується, розбухання складає 40%.

Розглянемо графіки розподілу швидкостей зсуву та лінійних швидкостей руху екструдату по довжині досліджуваної області. Вони представлені на рисунках 3.50 та 3.51.

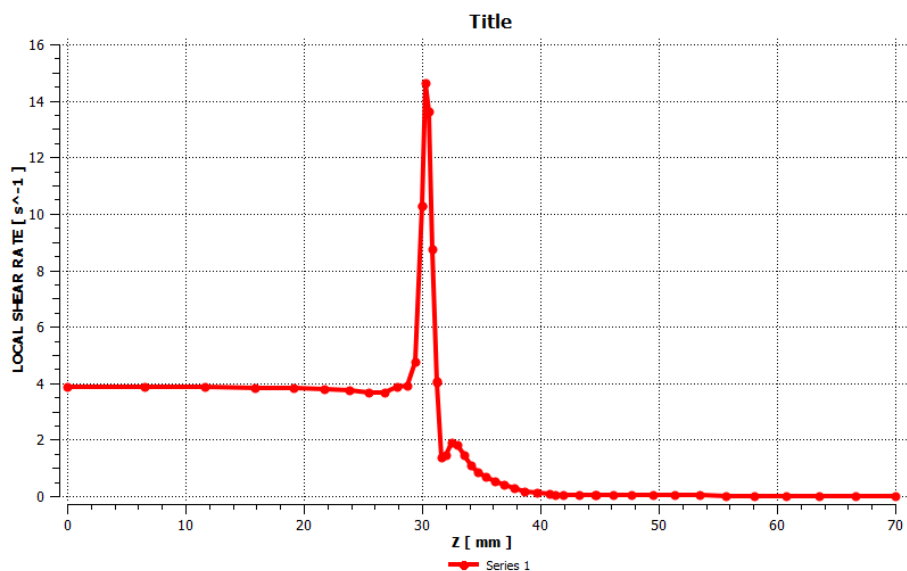


Рисунок 3.50 – Розподіл швидкостей зсуву по довжині формуючого каналу і вільної поверхні Ш-подібної форми

На рисунку 3.51 представлений розподіл швидкості зсуву по довжині моделі, максимальне значення досягається через деяку відстань після виходу з екструзійної головки, тобто з певним запізненням, що пов'язано з явищем релаксації. Коефіцієнт тертя в даному випадку прийнято  $k=10000$ .

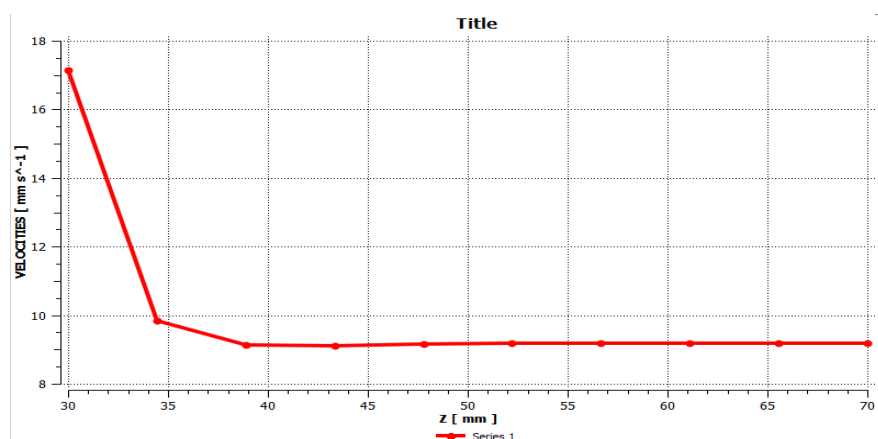


Рисунок 3.51 – Розподіл лінійних швидкостей по довжині вільної ділянки екструдату Ш-подібної форми

На наведеному графіку спостерігається поступове зменшення швидкостей внаслідок їх перебудови в поперечному напрямі, досягаючи постійного значення на деякій відстані від головки. Сумарний об'єм речовини при цьому зберігається.

Таким чином, врахування пружних властивостей рідини при моделюванні течії з використанням моделі ФТТ показує зростання стрибків тиску і напружень в області виходу з формуючого інструменту екструдера, а також дозволяє визначити межі області перебудови екструдованого профілю і здійснювати обґрунтований вибір параметрів формуючого інструменту.

Досліджено залежності швидкості екструзії від коефіцієнту тертя полімеру по стінці каналу. Для визначення умов проковзування полімеру в каналі формуючого інструменту використана залежність (2.2).

При врахуванні умови проковзування екструдату на стінці формуючого каналу спостерігається підсумкове розширення потоку на 16%, на ділянці  $z = 0 \dots 1$  за умов прилипання екструдату (швидкість течії матеріалу на стінці формуючого інструменту дорівнює нулю), підсумкове розбухання потоку на даній ділянці збільшується до 23 %.

Результати проведених числових експериментів залежності коефіцієнту розбухання від коефіцієнту тертя представлені на рисунку 3.52.

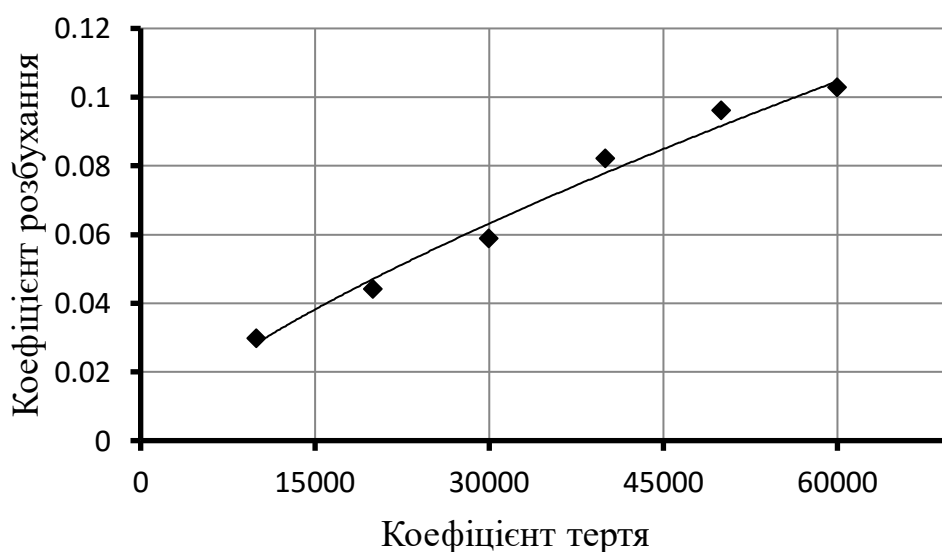


Рисунок 3.52 – Залежність зміни коефіцієнту розбухання від коефіцієнту тертя

З графіку на рисунку 3.52 видно, що при збільшенні коефіцієнта тертя явище розбухання полімерного профілю збільшується, ми отримуємо практично лінійну залежність.

Уздовж осі симетрії екструдованого профілю як для ньютонівської, так і для в'язкопружної рідини, перепад тиску в них на виході з формуючого отвору монотонно зменшується до нуля, тоді як на поверхні екструдованого профілю на виході тиск різко змінюється і приймає негативні значення на ділянці з  $z = 0 \dots 1$ . Причому зі збільшенням пружних властивостей рідини, перепад тиску на поверхні екструдованого профілю на цій ділянці збільшується.

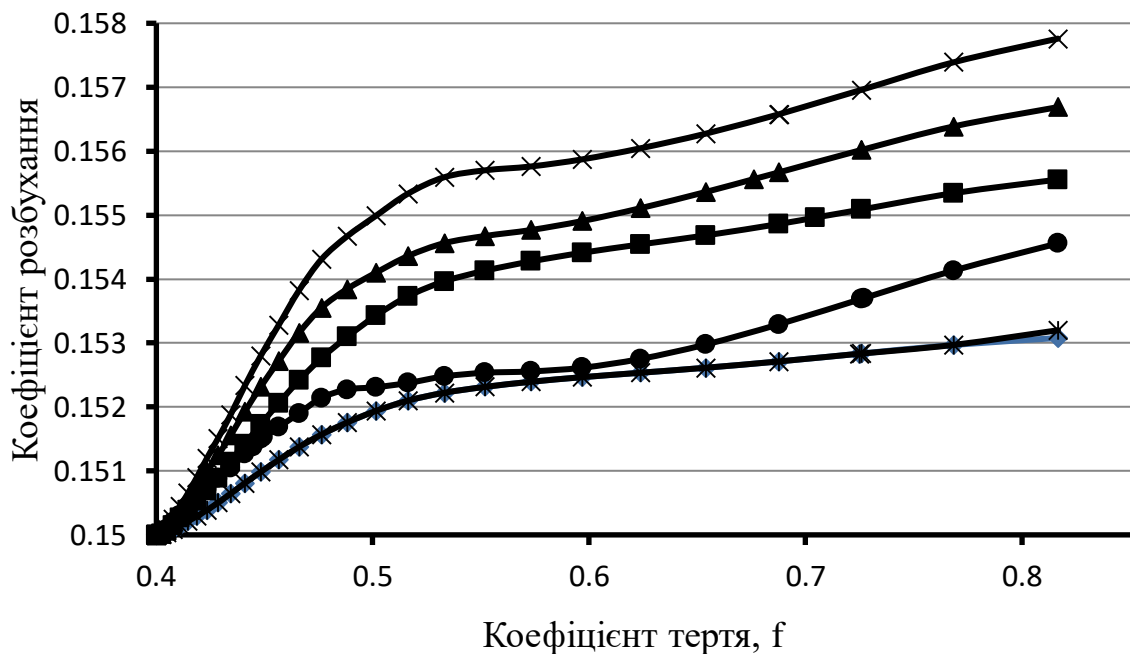


Рисунок 3.53 – Залежність зміни коефіцієнту розбухання від коефіцієнту тертя при постійній швидкості екструзії

◆ –  $f = 10000$ ; ■ –  $f = 50000$ ; ▲ –  $f = 75000$ ; × –  $f = 100000$ ; ∞ –  $f = 20000$ ;  
● –  $f = 40000$

З графіку можна зробити висновок, що зі зменшенням коефіцієнту тертя в головці течія екструдату після виходу з неї поводить себе більш стабільно, тобто менше проявляється ефект розбухання (з 5,3 % до 2 %).

Було проведено моделювання течії при різних значеннях лінійної швидкості розплаву на вході в головку.



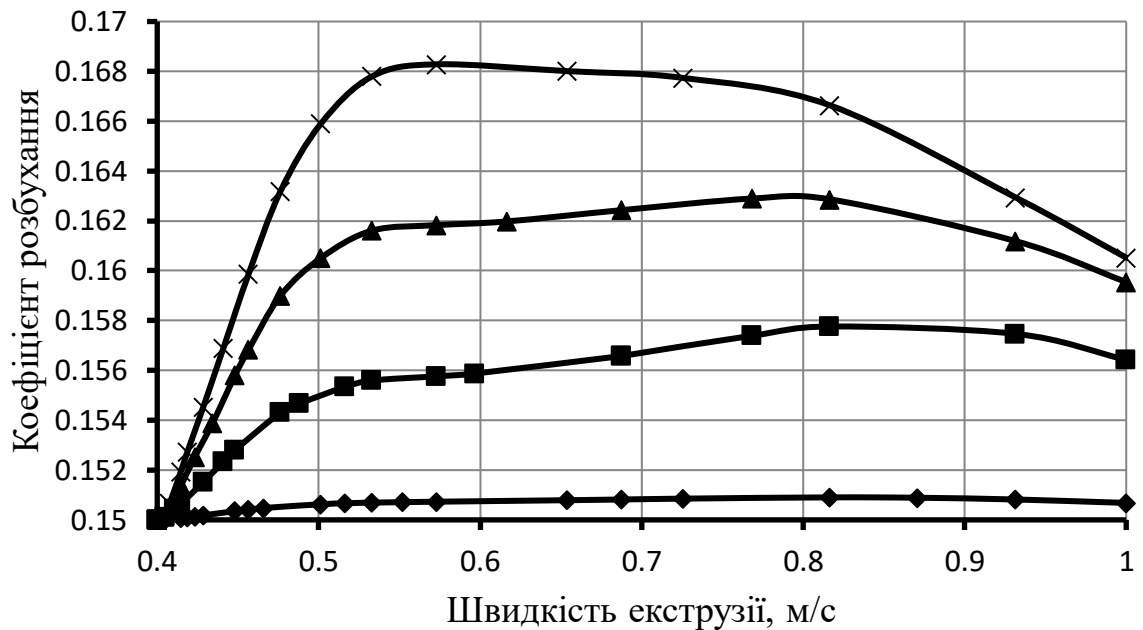


Рисунок 3.54 – Графік залежності коефіцієнту розбухання від швидкості екструзії  
 ◆ –  $V=0,01$  м/с; ■ –  $V=0,02$  м/с; ▲ –  $V=0,04$  м/с; × –  $V=0,08$  м/с

З рисунку 3.54 витікає, що зі збільшенням лінійної швидкості розплаву ефект розбухання збільшується.

Розглянемо результати моделювання Ш-подібного профілю з довжиною формуючого каналу, рекомендованого при конструюванні профільних погонажних головок, довжина каналу повинна в 10 разів бути більшою за товщину стінок виробу (рисунок 3.55). На рисунку 3.55 представлені результати розрахунку тиску, швидкості і контури перерізу екструдату в поперечному перерізу на виході з головки і в кінці екструдату.

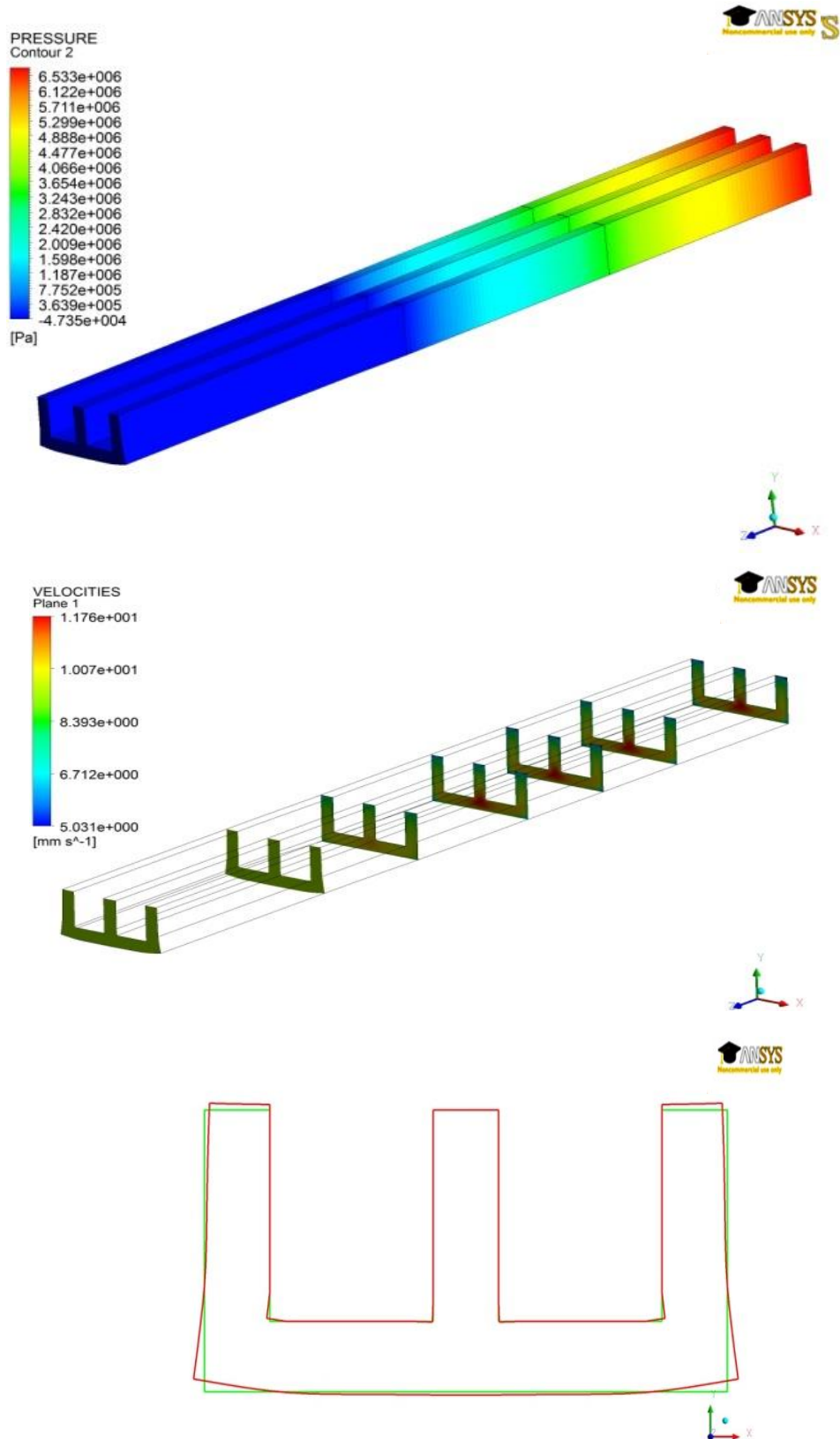


Рисунок 3.55 – Результати розрахунку тиску, швидкості і контури перерізу в поперечному перерізі на виході з формуючого каналу і стабілізації розмірів екструдату

Максимальне значення тиску дорівнює 6,5·МПа, яке досягається на вході в екструзійну головку перевищує значення тиску при меншій довжині формуючого каналу.

Зазвичай, довжину вихідного формуючого каналу обирають з міркувань мінімізації ефекту розбухання, при цьому її довжина, а отже і гідравлічний опір є досить великими. Зі зменшенням довжини формуючих каналів явище розбухання стає більш значним – форма екструдату спотворюється. Для досягнення заданої форми екструдату зі зменшенням довжини формуючого каналу необхідно компенсувати явище розбухання. Це дозволить зменшити перепад тиску в головці на 10-12 %, а відповідно енергетичні витрати на процес формування профільних погонажних виробів

Аналогічно до дослідження Ш-подібного зразка профільної погонажної головки, досліджувався зразок головки форми рамка. Для проведення числових досліджень була побудована тривимірна геометрична модель в пакеті SolidWorks у формі каналів головки, що досліджувалась (рисунок 3.56), а потім вона розбивалась на фрагменти за допомогою графічного інтерфейсу системи ANSYS Polyflow, задавалися граничні умови.

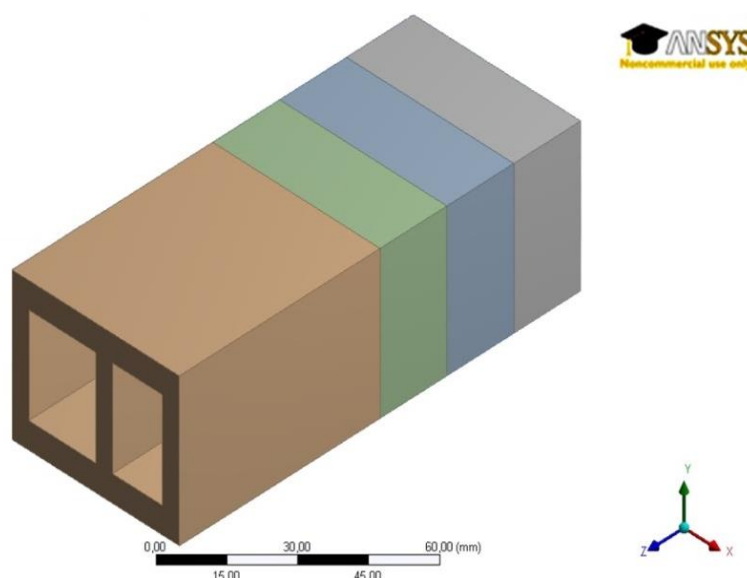


Рисунок 3.56 – Геометрична модель профілю при течії через канал форми рамка

Геометричні розміри профілю: 50 мм × 40 мм, довжина головки  $L_{\text{гол}}=0,5$  м;

довжина вільного кінця  $L_{\text{проф}}=0,5$  м.

В кінцевому результаті була отримана розрахункова модель каналу, готова для обчислення, її загальний вигляд зображено на рисунку 3.57. Обґрунтованість вибору сітки визначалась по зміні картини витрати на виході. Мінімальна необхідна кількість вузлів вибиралась з умови мінімальних змін (до 1 %) розподілу швидкостей на виході та відсутності нерівномірності швидкостей між елементами. Для розрахунків методом скінчених елементів була побудована сіткова область з 22408 елементів. Було використане згущення сітки на межі головка-екструдат, оскільки нас цікавить саме ця область через проходження в ній перехідних процесів.

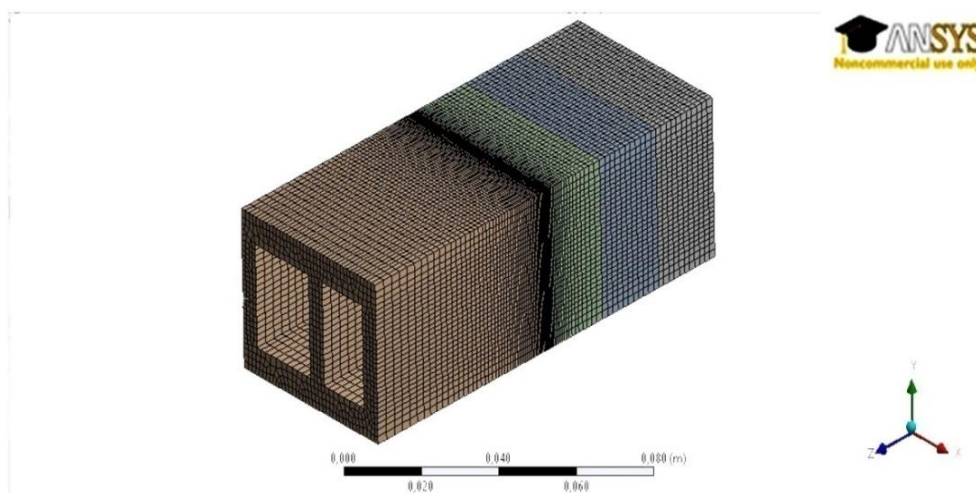


Рисунок 3.57– Канал головки форми рамка з нанесеною розрахунковою сіткою скінчених елементів

Область моделювання з граничними умовами представлена на рисунку 3.58.

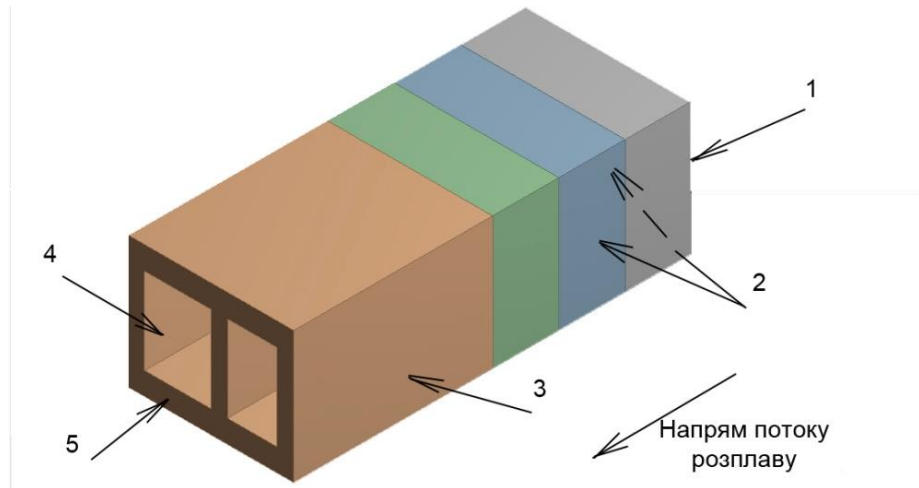


Рисунок 3.58 – Область геометрії профілю форми рамка з граничними умовами  
 1 – вхід (повністю розвинений потік розплаву); 2– стінка (умова проковзування);  
 3–вільна поверхня ( $f_s = 0$ ,  $f_n = 0$ ,  $v_n = 0$ ); 4–симетрія ( $v_n = 0$ ,  $f_s = 0$ );  
 5– вихід ( $f_n = 0$ ,  $v_s = 0$ )

Розглянемо результати моделювання (рисунки 3.59-3.63).

Максимальне значення тиску дорівнює 3,8·МПа, яке досягається на вході в екструзійну головку, рисунок 3.59.

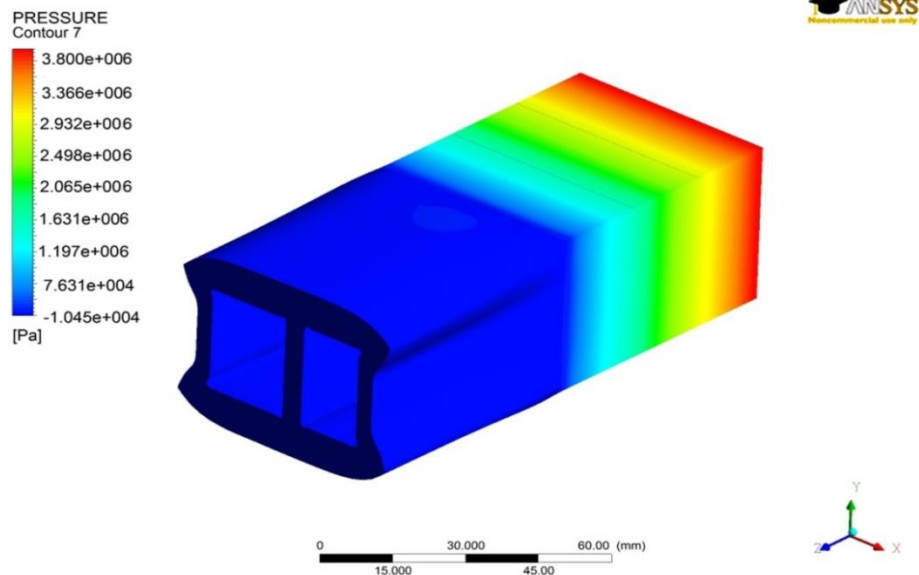


Рисунок 3.59 – Результати розрахунку тиску профілю форми рамка

Розглянемо поле розподілу швидкостей в формуючому каналі, рисунок 3.60.

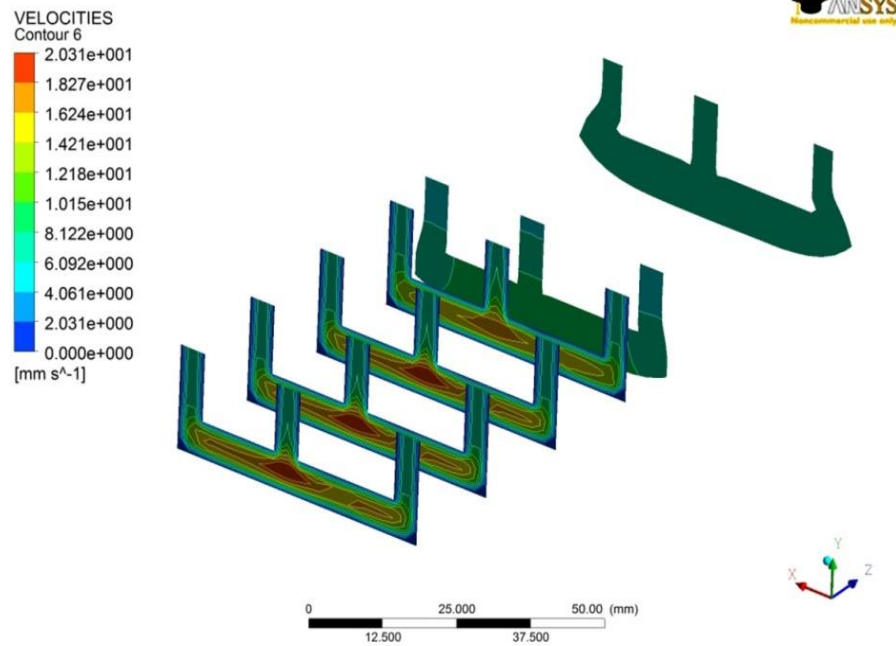


Рисунок 3.60 – Контури розподілу швидкостей форми рамка

На наведеному графіку спостерігається поступове зменшення швидкостей внаслідок їх перебудови в поперечному напрямі, досягаючи постійного значення на деякій відстані від головки. Сумарний об'єм речовини при цьому зберігається.

Максимальне значення швидкості досягається при вході в головку, а при виході з головки швидкість руху полімеру різко знижується, що пов'язано з тим, що моделюється процес формування в режимі вільної екструзії, тобто після виходу з головки обмежувальні стінки відсутні. Це видно з графіку на рисунку 3.61.

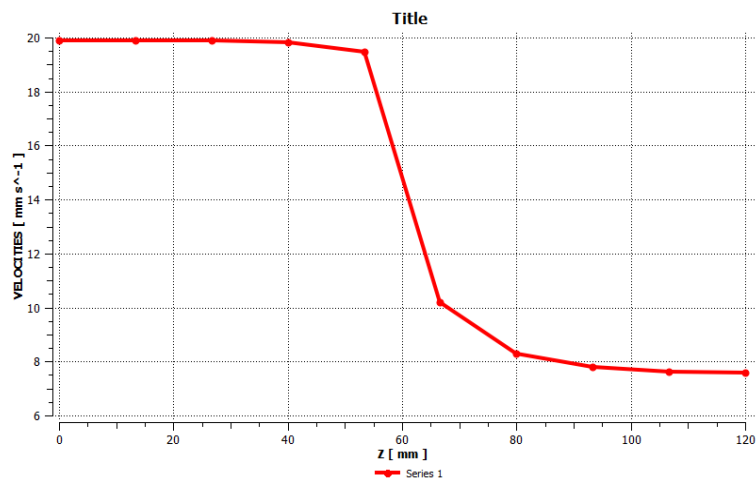


Рисунок 3.61 – Графік розподілу лінійної швидкості по довжині модельованої області профілю форми рамка

На рисунку 3.62 представлено контури перерізу екструдату на різних відстанях від виходу з головки.

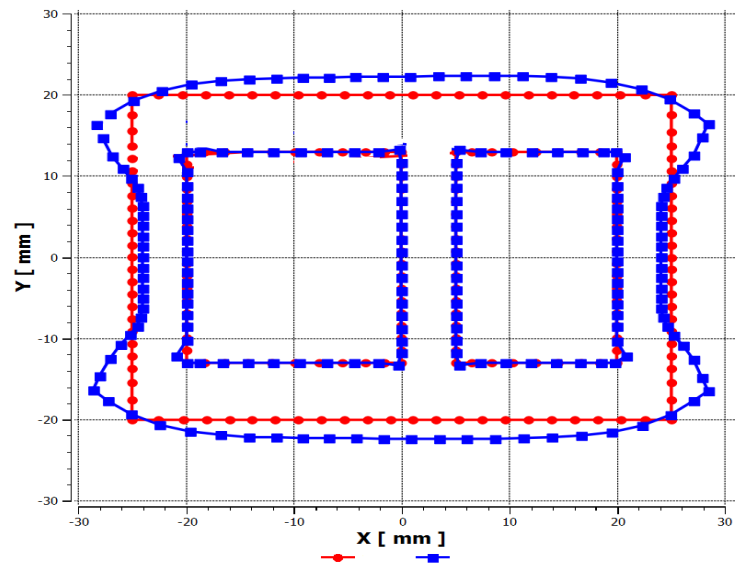


Рисунок 3.62 – Контури поперечних перерізів профілю на виході з формуючого каналу головки і стабілізованих розмірів екструдату форми рамка

- – контур перерізу на виході з головки; ■ – контур перерізу стабілізації розмірів екструдату

На рисунку 3.63 показаний графік розбухання профілю форми рамка в повздовжньому напрямі.

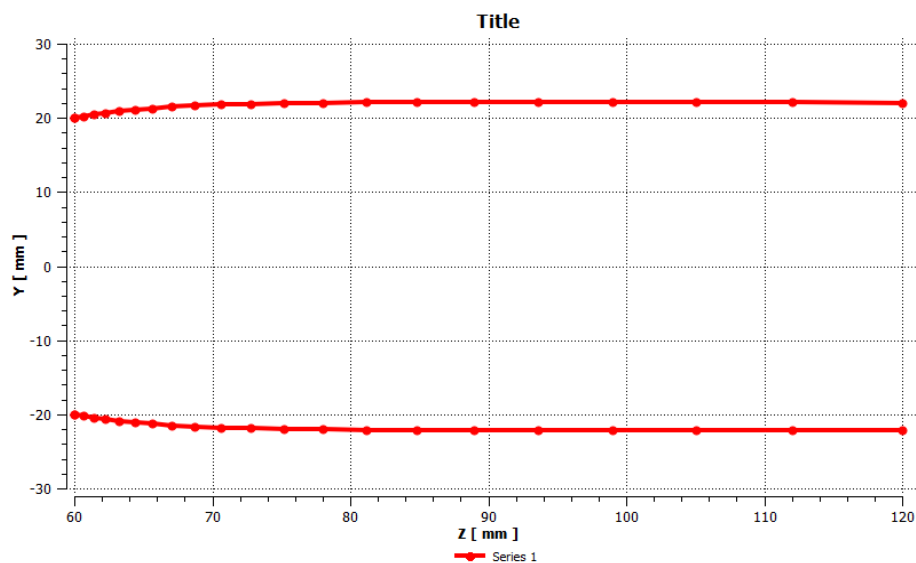


Рисунок 3.63 – Графік зміни форми рамка в повздовжньому напрямку

З графіку видно, що ефект розбухання проявляється до відстані в 10 мм.

Таким чином, врахування пружних властивостей рідини при моделюванні течії з використанням моделі ФТТ показує зростання стрибків тиску і напружень в області виходу з формуючого інструменту екструдера, а також дозволяє визначити межі області перебудови екструдованого профілю і здійснювати обґрунтований вибір параметрів формуючого інструменту.

Показано, що використання моделі ФТТ при моделюванні течії в'язкопружних рідин на виході з формуючого інструмента екструдера дозволяє розрахувати зміну перерізу екструдованого погонажного виробу.

Методика розрахунку профілів профільних погонажних екструзійних головок представлена в Додатку А.

### **3.3 Моделювання і числовий алгоритм проектування зразка каналу профільної погонажної головки методом оберненої екструзії**

Основним інструментом, що задає кінцеву форму екструдованих погонажних виробів, є екструзійна головка. Завдання моделювання полягає в розкритті можливостей уточненого проектування геометрії, за допомогою числового моделювання, формуючих каналів в екструзійних головках для виробництва пластикових профілів. Метою моделювання є визначення форми каналу головки, що приводить до збалансованої витрати на виході з головки, яка відповідає умовам отримання заданого виробу. Можливість модифікування форми каналу з використанням алгоритму оптимізації дозволяє проводити розрахунок геометрії формуючих каналів головок по заданих розмірах екструдованих виробів

Процес проектування починається із задавання форми виробу. Заданий виріб представляє собою двокамерний полий профіль (рисунок 3.64а) прямокутного перерізу 40 мм × 50 мм з внутрішнім ребром товщиною 5 мм. Так як головка симетрична, моделюється тільки половина формуючого каналу, як показано на рисунку 3.64б.

Розглядається тільки профіль формуючого каналу, який є одним з найбільш важливих елементів у процесі екструзії, так як він повинен компенсувати деформації екструдату після виходу з головки до досягнення заданої форми [9].



Формуючий канал розділений на чотири підобласті (як показано на рисунку 3.64б) для застосування конкретних алгоритмів для перебудови сітки в кожній підобласті при моделюванні профілю головки. Підобласті 1, 2 і 3 представляють собою канал головки де протікає розплав, в той час як підобласть 4 представляє екструдат, який знаходиться в контакті з повітрям.

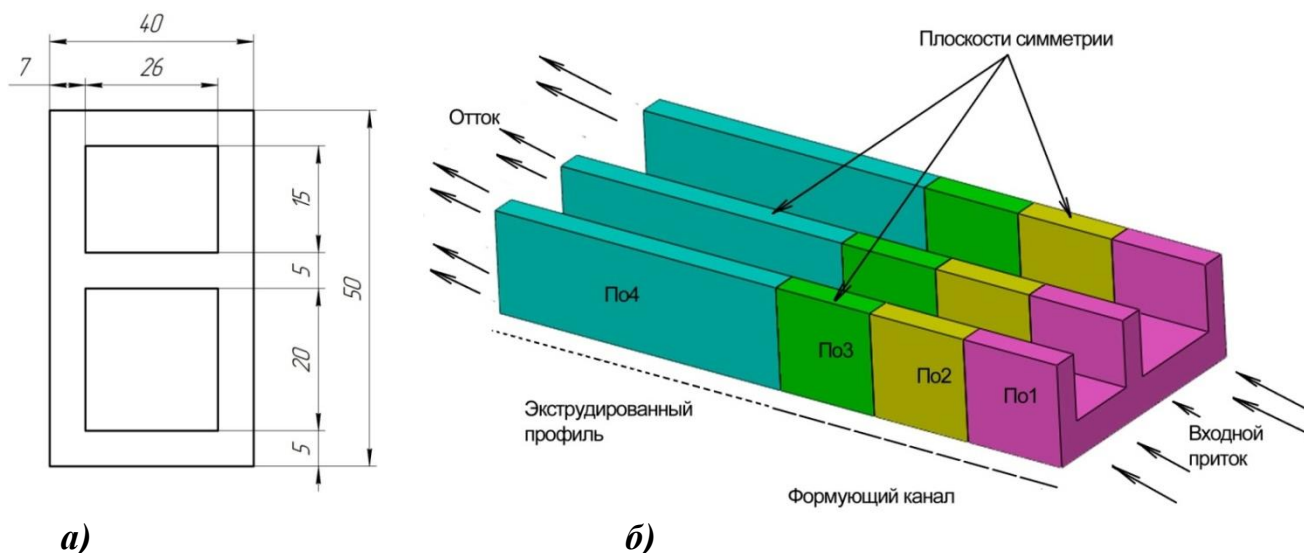


Рисунок 3.64 – Модель двокамерного полого профілю прямокутного поперечного перерізу

а) поперечний переріз екструдованого профілю; б) схема розбивки формуючого каналу головки і вільної ділянки екструдату

Геометрія формуючого каналу головки визначається шляхом розв'язання оберненої задачі моделювання, де цільовий профіль задається як форма екструдату у напрямку течії. Завдання полягає у визначенні необхідної геометрії формуючого каналу головки на виході, яка визначає вирівнювання швидкостей розплаву в області вільної поверхні і геометрію перетину формуючого профілю.

В якості перероблюваного матеріалу, використовуються ПЕВТ. Для опису залежності швидкості зсуву від в'язкості матеріалу, що переробляється застосовується модель в'язкості Берд-Карро [14]:

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \cdot \left(1 + (\lambda \cdot \dot{\gamma})^2\right)^{\frac{n-1}{2}} \quad (3.2)$$

де  $\eta$  – в'язкість, Па·с;  $\eta_0$  – в'язкість при нульовій швидкості зсуву, Па·с;  $\eta_\infty$  – в'язкість при нескінченній швидкості зсуву, Па·с;  $\lambda$  – час релаксації, с;  $n$  – ступеневий показник.

В даному дослідженні передбачається, що температура полімеру є постійною і рівною 180<sup>0</sup>С, а параметри при цій температурі, пов'язані з моделлю в'язкості Берд-Карро рівні:  $\eta_0 = 5630$  Па·с,  $\lambda = 0,32$  с,  $n = 0,64$ . Потік розплаву полімеру нестисливий [7,13,14]. Гравітаційними і інерційними силами нехтуємо. Рівняння руху дає баланс між силами в'язкості і тиску [13].

Сталий профіль швидкості течії полімеру на вході в головку моделюється для витрати  $Q = 10000$  мм<sup>3</sup>/с. На стінках головки застосовується гранична умова відсутності проковзування.

### **Результати моделювання та їх аналіз.**

Моделювання проводилося для умов отримання наведеної на рисунку 3.64а конфігурації полого профілю. На першому етапі моделювання проводили без урахування можливості компенсації розбухання екструдату і інших ефектів, що показано на рисунку 3.65. Неправильна форма остаточного виробу обумовлена наявністю локальних ділянок непостійного тиску і швидкості течії потоку по довжині перетину формуючого каналу головки. Це обумовлює формування в процесі екструзії профілю спотвореної форми і з різною товщиною стінок (5 і 7 мм). Різниця локальних товщини обумовлено неоднорідністю швидкостей потоку полімеру по товщині перетину (до 20 мм / с), що показано на рисунку 3.65. На підставі результатів, отриманих при першому моделюванні, наступним кроком була реалізація алгоритму Polyflow для вирішення оберненої задачі екструзії, яка полягає у визначенні геометрії формуючого каналу головки для забезпечення бажаної форми екструдованого профілю. Для того, щоб отримати задану остаточну форму екструдату програма дозволяє методом ітерацій, змінювати геометрію формуючого каналу на довжині 60 мм. Результати такого ітераційного моделювання представлені на рисунках 3.65– 3.66. При розгляді кожної ділянки каналу можна простежити особливості перебігу полімеру і визначити області з уповільненим рухом полімерного матеріалу, що може призвести до спотворення форми екструдованого виробу або ж до його локального розкладання.

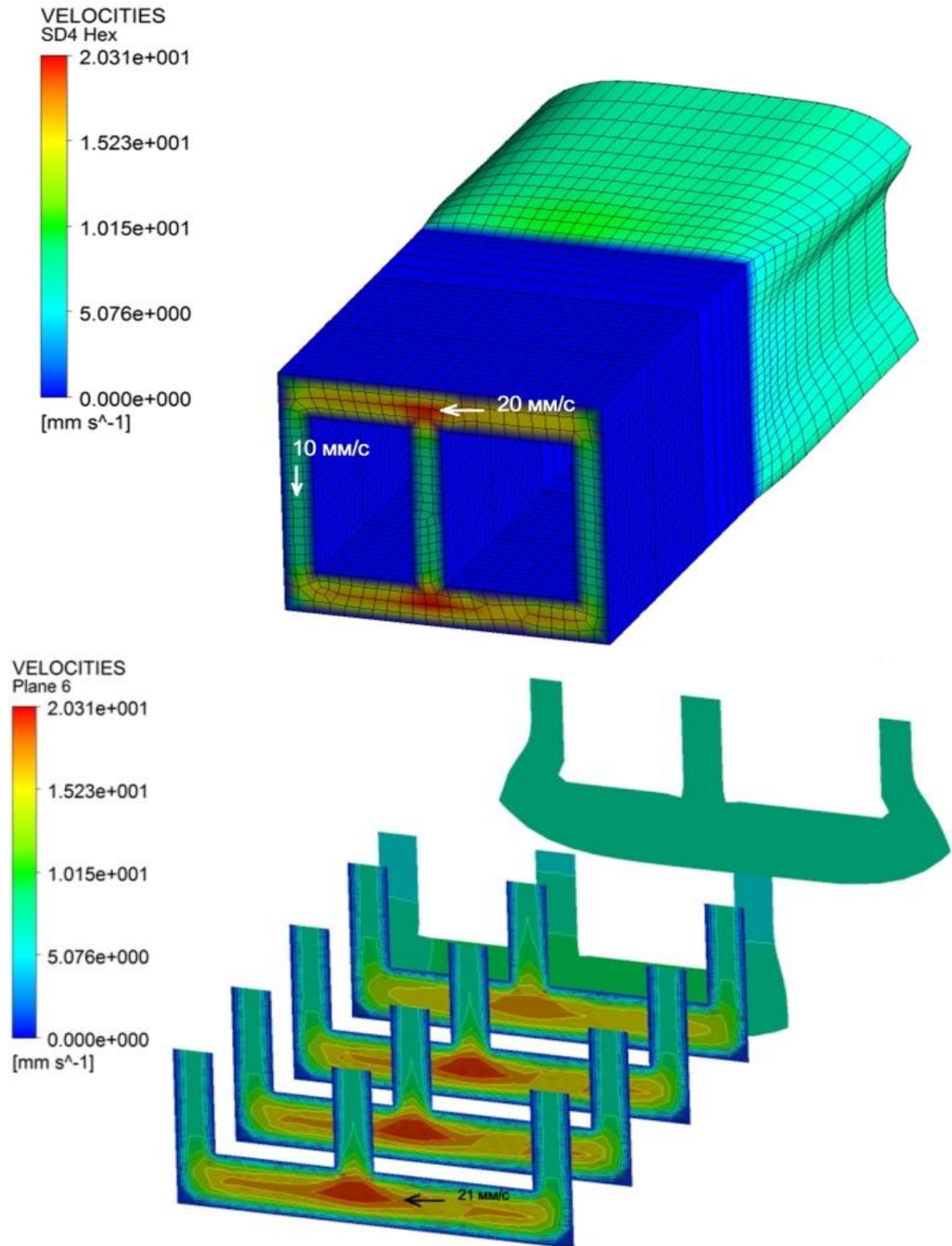
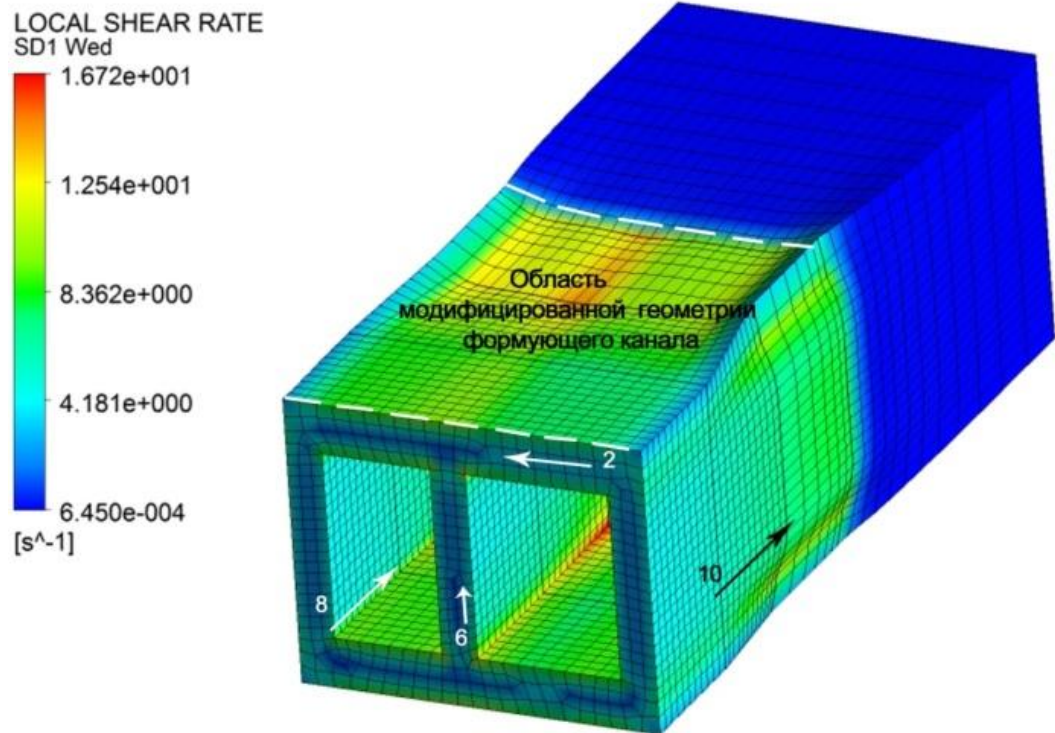
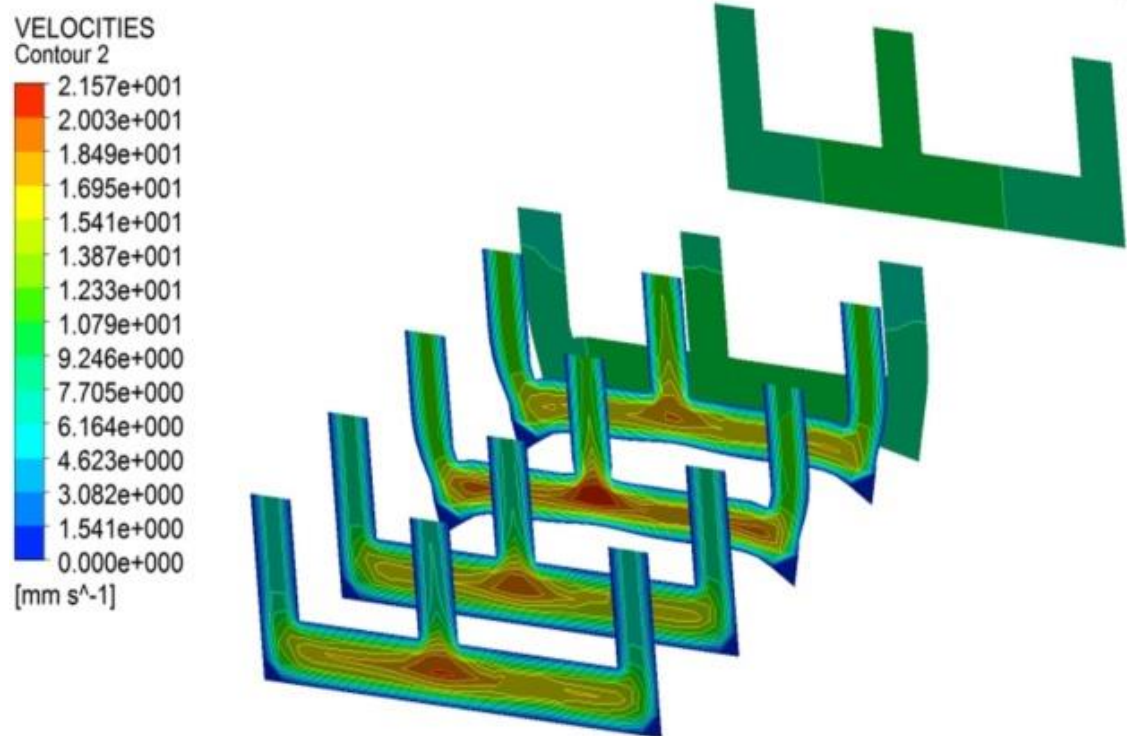


Рисунок 3.65 – Розподіл швидкостей в різних перетинах формуючого каналу головки і вільної ділянки екструдату без оптимізованої геометрії формуючого каналу



а)



б)

Рисунок 3.66 – Розподіл локальної швидкості зсуву і швидкості (а, б) для формирующего канала головки з оптимізованою геометрією каналу

Щоб уникнути цього розглянута методика моделювання дозволяє проводити уточнення геометрії формуючого каналу головки і отримання екструдованого профілю заданої форми.

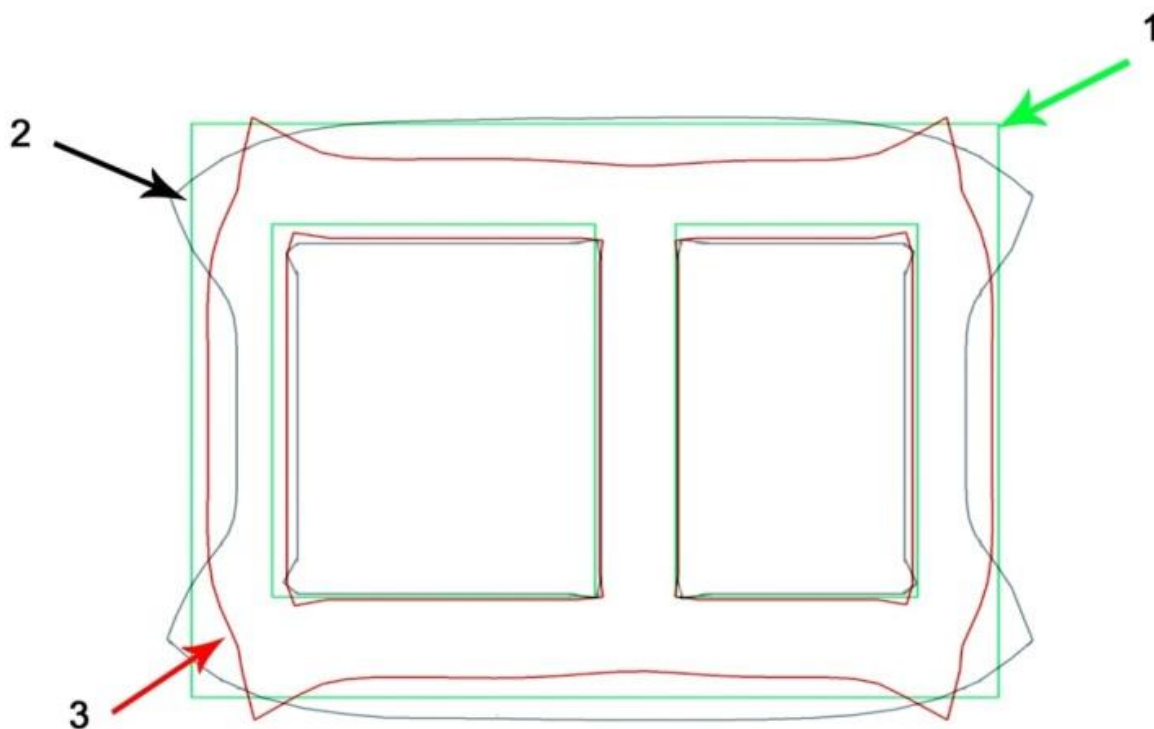


Рисунок 3.67 – Поперечні вихідні перетини області формуючого каналу головки неоптимізованої і оптимізованої форми

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

На рисунку 3.67 показані варіанти неоптимізованої і оптимізованої геометрії вихідної області формуючого каналу головки і можливість прогнозування геометрії тільки останньої ділянки формуючого каналу. Обчислювальна потужність програмного гідравлічного 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.

### 3.3.1 Моделювання і числовий алгоритм проектування L-"подібного"

## **однокамерного полого профілю методом оберненої екструзії**

У процесі виробництва екструзійних погонажних профільних виробів не достатньо внесення змін в задані технологічні параметри процесу екструзії, наприклад, температурний режим або швидкість обертання шнеку для компенсування недосконалості розмірів продукції. Геометрія екструдованих профілів в значній мірі залежать від нерівномірного набухання. У разі погонажних кутових і інших несиметричних профілів, або наприклад, квадратних профілів явище розбухання екструдату зумовлює необхідність виконання формуючих каналів дещо іншої геометрії, при якій розплав, виходячи з цієї необхідної, але неортогональної форми, буде розбухати в бажану, ортогональну квадратну геометрію виробу.

Фільери для виробництва відкритих екструзійно-погонажних профілів, таких як U-подібних або L-подібних, не є аксіально-симетричні, на відміну від трубних форм. Відкриті профілі більш схильні до нерівномірного охолодження, і, таким чином, можуть генерувати залишкові напруження в затверділому екструдаті, які спричиняють спотворення форми екструдату. Критичним правилом проектування відкритих профілів є забезпечення постійної товщини стінок по всьому поперечному перетину продукту. Більш тонкі секції виробів твердіють швидше, коли більш товщі секції все ще залишаються неповністю затверділими. В результаті буде спостерігатись додаткова теплова усадка на більш товстих ділянках і, таким чином, викривлення кінцевого продукту. Проблеми викривлення профільних виробів можуть бути вирішені шляхом створення нової форми поперечного перерізу з більш рівномірною товщиною. Поперечний переріз виробу буде затвердівати більш рівномірно і невелика залишкова напруження буде в пастці твердого екструдату.

Розвиток потужної обчислювальної техніки і досвідчених числових технік дозволяє моделювати, аналізувати і оптимізувати тривимірні екструзійні процеси зі складною геометрією, включаючи нелінійну і в'язкопружну поведінку полімеру. Числове моделювання має потужності для розкриття важливих внутрішніх

параметрів процесу екструзії, таких як швидкість, напруження зсуву, розподіл тиску і температури, що неможливо зробити експериментально.

Основним інструментом, що задає кінцеву форму екструдованих погонажних виробів, є екструзійна головка. Завдання числового моделювання полягає в уточненому проектуванні геометрії формуючих каналів екструзійних головок для виробництва пластикових профілів. Метою моделювання є визначення форми каналу головки, що призведе до збалансування витрат на виході з головки, і забезпечення умови отримання заданого профілю виробу. Можливість модифікування форми каналу з використанням алгоритму оптимізації дозволяє проводити розрахунок геометрії формуючих каналів головок по заданих розмірах екструдованих виробів

Процес проектування починається із задавання форми виробу. Заданий виріб представляє собою L-подібний однокамерний полий профіль (рисунок 3.68а) 15 мм × 30 мм з внутрішнім ребром товщиною 1,5 мм.

Розглядається тільки профіль формуючого каналу, який є одним з найбільш важливих елементів у процесі екструзії, так як він повинен компенсувати деформації екструдату після виходу з головки і забезпечити його задану геометрію. Формуючий канал розділений на дві підобласті (як показано на рисунку 3.64б) для забезпечення можливості застосування алгоритмів для перебудови сітки в кожній підобласті при моделюванні їх профілів. Перша підобласть представляє собою канал головки де протікає розплав, в той час як друга підобласть представляє собою екструдований профіль, який знаходиться в контакті з повітрям.

Метою моделювання є визначення форми каналу головки, що призводить до збалансованої витрати і забезпечує відповідну форму цільового профілю екструдату на виході з головки. Геометрія формуючого каналу головки визначається шляхом розв'язання оберненої задачі моделювання, де цільовий профіль задається як форма екструдату у напрямку течії. Завдання полягає у визначенні необхідної геометрії формуючого каналу головки на виході, яка забезпечує вирівнювання швидкостей розплаву в області вільної поверхні і геометрію перетину формуючого профілю.

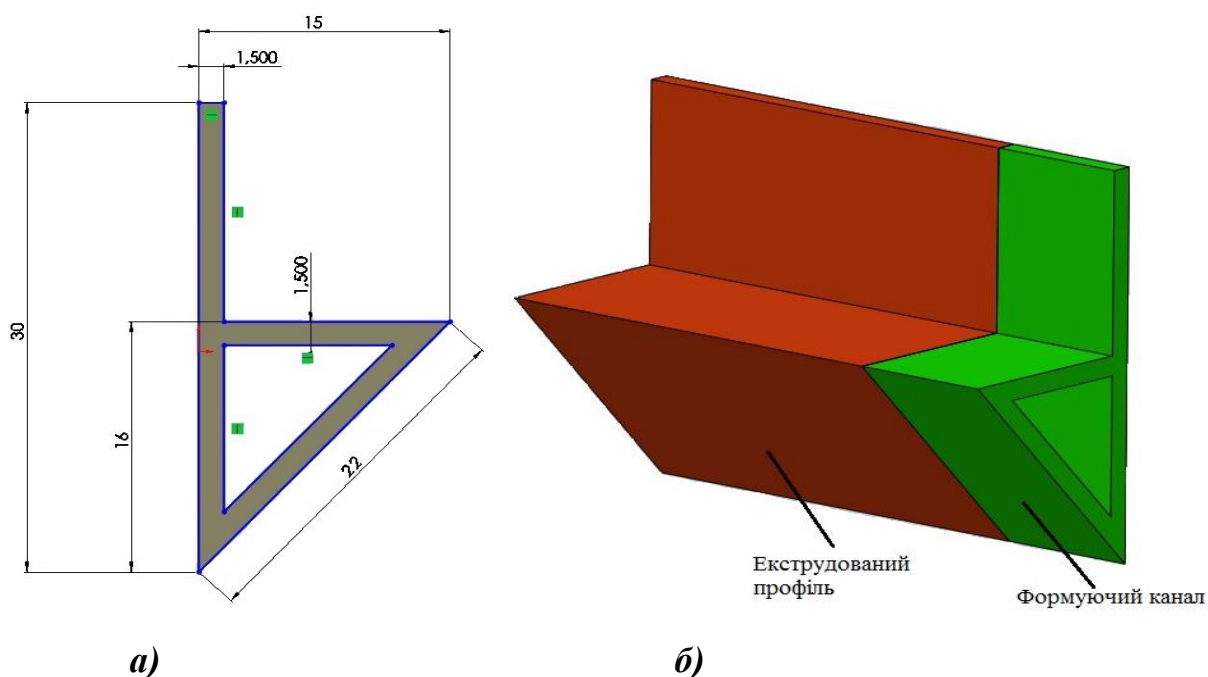


Рисунок 3.68 – Модель L-подібного однокамерного полого профілю  
 а) поперечний перетин екструдованого профілю, б) схема розбивки на ділянки формуючого каналу головки і вільної ділянки екструдату, який витікає з неї

В якості перероблюваного матеріалу, використовується ПВХ марки SorVyl. Для опису залежності швидкості зсуву від в'язкості перероблюваного матеріалу застосовується модель в'язкості Берд-Карро [98].

В даному дослідженні передбачається, що температура полімеру є постійною і рівною  $180^{\circ}\text{C}$ , а параметри при цій температурі, пов'язані з моделлю в'язкості Берд-Карро рівні:  $\eta_0 = 1000 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;  $\eta_{\infty} = 1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;  $\lambda = 0,5 \text{ с}$ ;  $n = 0,75$ . Потік розплаву полімеру нестисливий [100,101,105].

Гравітаційними і інерційними силами нехтуємо. Рівняння руху дає баланс між силами в'язкості і тиску [101].

Сталий профіль швидкості течії полімеру на вході в головку моделюється для витрати  $Q = 2580 \text{ мм}^3/\text{с}$ . На стінках головки застосовується гранична умова відсутності проковзування.

Розроблені і враховані тільки останні дві ділянки формуючого каналу для моделювання потоку, оскільки вони мають найбільший вплив на форму екструдованого профілю [106,107]. Для моделювання необхідні наступні вхідні дані [106] :



1. Геометрична модель формуючого каналу головки: а. двовимірний профіль вхідної ділянки формуючого каналу; б. двовимірний профіль цільової форми екструдату; с. довжина предканалу, довжина формуючого каналу і довжина поверхні вільного потоку після виходу з головки.

2. Термомеханічні властивості розплаву полімеру: щільність, теплоємність і теплопровідність.

3. Реологічні властивості полімерного розплаву: неньютонівська в'язкість в залежності від швидкості зсуву і температури, і в'язкопружні властивості матеріалу.

4. Умови процесу: температура розплаву на вході, масова витрата у каналі головки (або тиск на вході), температура стінки головки швидкість екструдату на виході з головки.

### **Результати моделювання та їх аналіз**

Моделювання проводилося для умов отримання наведеної на рисунку 3.68 конфігурації порожнього профілю. На першому етапі моделювання проводили без урахування можливості компенсації розбухання екструдату і інших ефектів, що показано на рисунку 3.69. Неправильна форма остаточного виробу обумовлена наявністю локальних ділянок непостійного тиску і швидкості течії потоку по довжині перетину формуючого каналу головки. Це обумовлює формування в процесі екструзії профілю спотвореної форми і з різною товщиною стінок. Різниця локальних товщин обумовлена неоднорідністю швидкостей потоку полімеру по товщині перетину, що показано на рисунку 3.69. На підставі результатів, отриманих при першому моделюванні, наступним кроком була реалізація алгоритму Polyflow для вирішення оберненої задачі екструзії, яка полягає у визначенні геометрії формуючого каналу головки для забезпечення бажаної форми екструдованого профілю. Для того, щоб отримати задану остаточну форму екструдату програма дозволяє методом ітерацій, змінювати геометрію формуючого каналу на довжині 60 мм. Результати такого ітераційного моделювання представлені на рисунках 3.69– 3.70. При розгляді кожної ділянки каналу можна простежити особливості течії полімеру і визначити області з уповільненим рухом полімерного матеріалу, що може призвести до спотворення форми екструдованого виробу або до локальної деструкції полімеру в ньому.

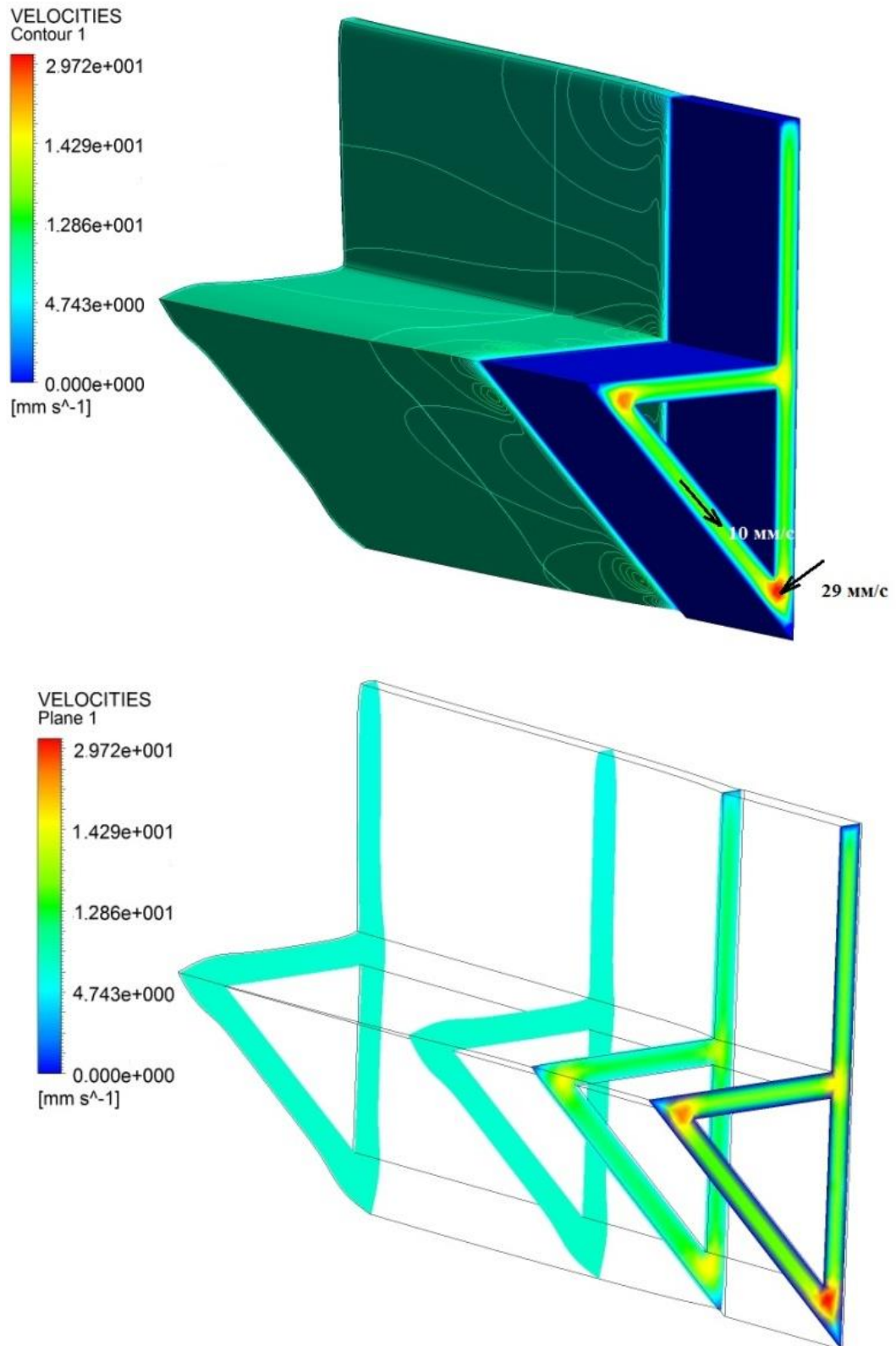
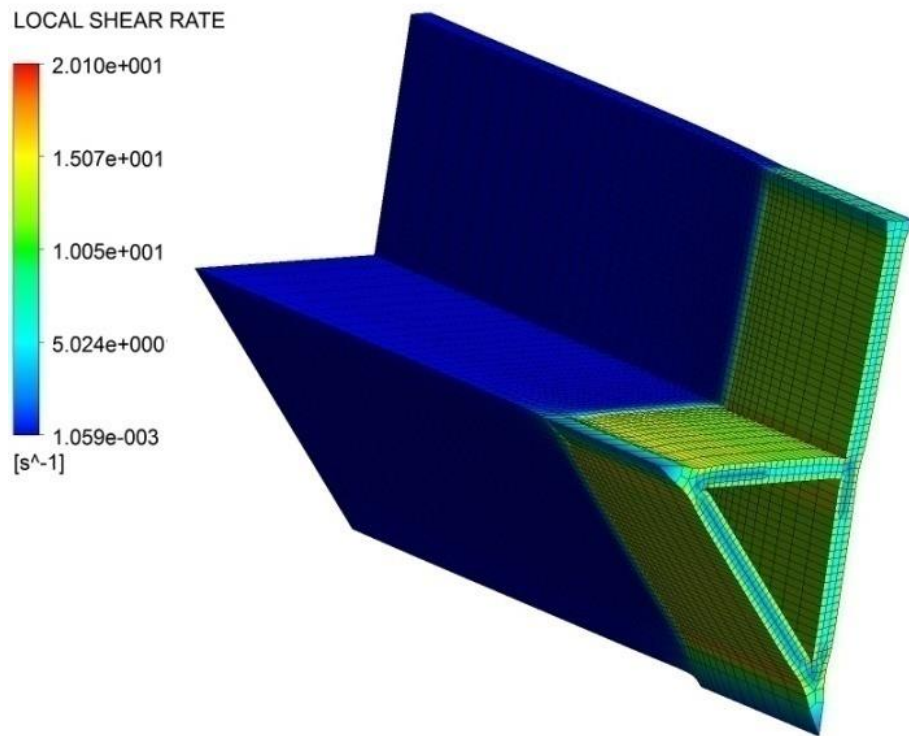
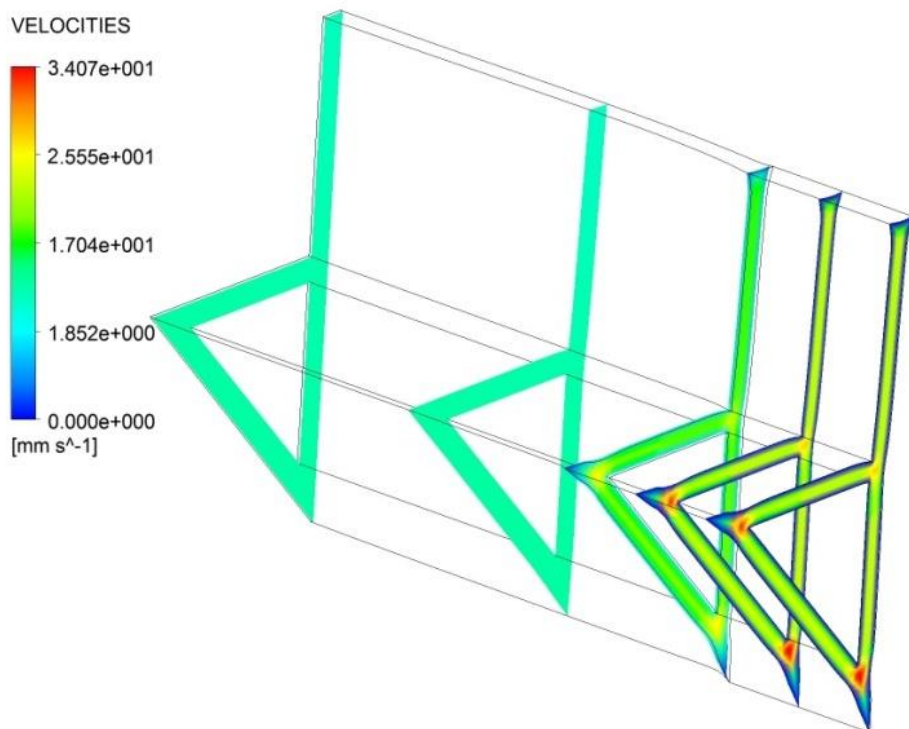


Рисунок 3.69 – Розподіл швидкостей в різних перетинах формуючого каналу головки і вільної ділянки екструдату без оптимізованої геометрії формуючого каналу



a)



б)

Рисунок 3.70 – Розподіл швидкості зсуву і лінійної швидкості (а, б) для формуючого каналу головки з оптимізованою геометрією каналу

Деформація екструдату при зміні геометрії каналу є результатом перегрупування швидкостей, що відбуваються на виході з головки. Частинки, що рухаються від високошвидкісних ділянок головки мають сповільнитися, у той час як частинки, що надходять з низько швидкісних ділянок, мають прискоритися. На ділянках, де потік рідини має високу швидкість поперечний переріз екструдату збільшується, і навпаки потік рідини з низькою швидкістю зменшує його поперечний переріз.

Щоб уникнути цього, розглянута методика моделювання дозволяє проводити уточнення геометрії формуючого каналу головки і отримання екструдованого профілю заданої форми.

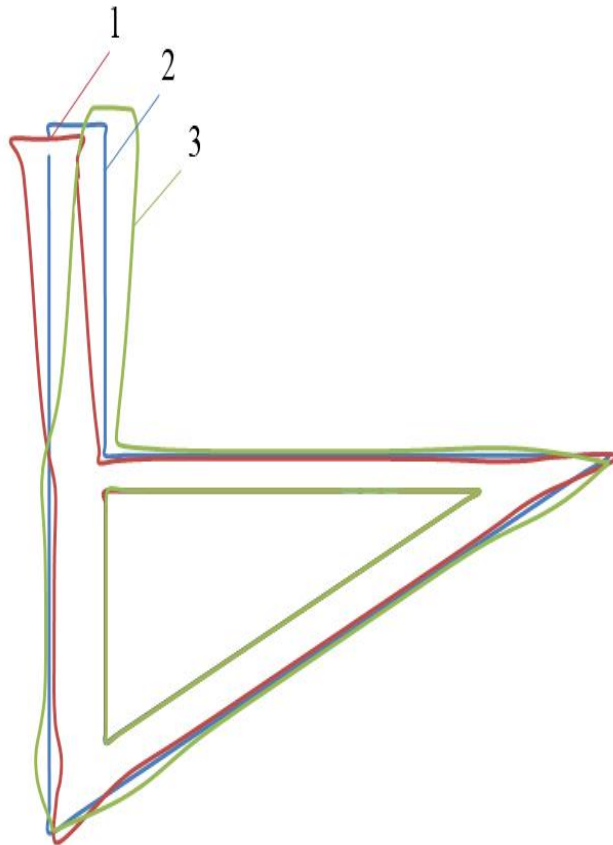


Рисунок 3.71 – Поперечні вихідні перетини області формуючого каналу головки неоптимізованої і оптимізованої форми

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

На рисунку 3.71 показані варіанти неоптимізованої і оптимізованої геометрії вихідної області формуючого каналу головки і можливість прогнозування геометрії тільки останньої ділянки формуючого каналу.

Розрахункова область нагадує реальну тривимірну геометрію і поверхню вільного потоку після виходу з формуючого каналу головки, де перерозподіл швидкості (зрівнювання) і релаксації напружень спостерігаються на короткій відстані від виходу з головки. Кінцевий елемент моделі формуючого каналу і ділянка вільної поверхневої складається з 39130 шестигранних елементів і 49938 вузлів. Розрахункова область повинна мати відповідні граничні умови для відображення реальних умов, що присутні у розплаві, який проходить через головку екструдера і виходить у вільну поверхню потоку [107]. Комерційна програма реалізує алгоритм оберненої задачі екструзії, який обчислює форму вихідного перерізу головки, необхідний для досягнення розмірів цільового профілю на виході з вільної поверхні. Програма обчислює форму каналу головки, яка дасть змогу отримати форму зданого цільового профілю після ефекту розбухання екструдату [106, 107].

Обчислювальна потужність програмного комплексу Polyflow дозволяє здійснювати також прогнозування геометрії в предканалі і в формуючому каналі для випадків 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.

Методика проведення розрахунку каналів профільних погонажних екструзійних головок методом оберненої екструзії представлена в Додатку Б.

### **3.4 Висновки до розділу 3**

Створена методика експериментальних досліджень реологічних параметрів матеріалу і характеру ефекту розбухання полімерного матеріалу після виходу з формуючого інструменту. Досліди є відтворюваними, однорідність результатів

підтверджується, що свідчить про те, що прийняті методики досліджень забезпечують відтворюваність експериментів.

В ході числових та натуральних експериментів встановлена кореляція між ними, що підтверджує адекватність розробленої аналітичної моделі та створеної в середовищі програми "Ansys Polyflow" скінченоеlementної моделі, на якій проводились числові експерименти. Результати проведених числових досліджень процесу зміни конфігурації струменя на виході з формуючого інструменту екструдера є основою для уточненого моделювання процесів екструзії розплавів полімерів при проектуванні нових екструзійних головок. Результати також можуть бути застосовані для обґрунтування доцільних режимів процесу екструзії з метою поліпшення якісних характеристик погонажних виробів.

Проектування екструзійних головок для отримання екструдованих полімерних профілів є складним завданням, оскільки остаточний розмір профілю екструдату залежить не тільки від геометричної форми конструкції головки, але і від властивостей пластмас і технологічних параметрів процесу екструзії. Процес проектування повинен охоплювати вплив кожного конструктивного елементу екструзійних головок (приєднувальний ділянку, адаптер, перехідною ділянку і предканал) на особливості перебігу полімеру в формувальному каналі та формування остаточної геометрії формованого виробу. Останні дві ділянки відіграють найбільш значну роль на етапі екструзійного формування.

Інженерне моделювання дозволяє вирішувати в виробництві найважливіші питання виробництва екструзійного інструменту, економію засобів і часу при їх розробці. Перелік переваг, отриманих шляхом внесення цих змін:

- ♦ краща якість продукції за рахунок більш рівномірного охолодження і усадки: рівність продукції.
- ♦ Зменшення витрат матеріалів шляхом видалення товстих, непотрібних ділянок: економія матеріальних витрат.
- ♦ збільшення швидкості охолодження за рахунок зменшеної температури екструдованого профілю.

Розроблена методика забезпечує вирішення оберненої задачі процесу екструзії, тобто за умови відомих параметрів одержуваного екструзією виробу проектувати необхідну конфігурацію фільтри екструзійної головки. Методика передбачає використання багатоваріантних розрахунків області з методами перебудови сітки, найбільш придатних для 3D обернених задач екструзії. Нелінійна задача вирішується за допомогою схеми еволюції для забезпечення збіжності задачі.

Конструювання екструзійної головки є складним завданням, так як розміри екструдованого продукту залежать не тільки від конструкції головки, але від властивостей полімеру і параметрів процесу екструзії. Нижче наведені загальні рекомендації по конструкції екструзійної головки:

- забезпечення збалансованого потоку розплаву на виході з головки екструдера;
- зведення до мінімуму перепаду тиску, необхідного для забезпечення збалансованого потоку, що дасть можливість забезпечити максимальну швидкість масової витрати з найменшим розміром необхідного екструдера;
- забезпечення управління пристроям потоку в головці з метою оптимізації розподілу потоку;
- раціоналізувати проходження потоку в формуючому каналі, щоб уникнути зон застою потоку. Такі області полегшують розкладання полімерного розплаву з тривалою витримкою при підвищених температурах;
- використання модульної конструкції з складених пластин для технологічності, зручного збирання та розбирання, а також зручності модифікації і очищення;
- довжина формуючого каналу повинна перевищувати товщину продукту (або зазору) не менше ніж в 10 разів для полегшення релаксації напружень в розплаві полімеру всередині головці;
- уникати товстих і нерівномірних товщин стінки екструдату для досягнення кращого контролю балансу потоку в головці, звести до мінімуму

використання матеріалу, скоротити час охолодження, а також звести до мінімуму постекструзійну деформацію виробів;

- уникати або звести до мінімуму порожнисті профілі, та як вони збільшують вартість виготовлення головок і ускладнюють подальший процес охолодження екструдату.

Конструкція головки повинна включати відповідні функції регулювання, які будуть встановлені (або оновлені) в процесі екструзії для компенсування недосконалості кінцевого продукту, тобто охолодженого екструдату. Для незмінної геометрії головки, регулювання недосконалості профілю може бути досягнуто шляхом зміни параметрів процесу екструзії, таких як температура, швидкість потоку, швидкість охолодження,  $i =$  або натяжна швидкість. Тим не менш, важливо оптимізувати конструкцію головки для внесення необхідних корективів. За рахунок інтеграцій комп'ютерного моделювання з емпіричними даними і вдосконалення моніторингу екструзійно-вимірювальних приладів, процес проектування головки може бути поліпшений. Кращий метод конструювання головок надає поліпшення якості продукту і скорочення часу для розробки та оптимізації процесу екструзії, що призводить до зниження матеріальних витрат. Важливо, що комп'ютерне моделювання та емпірична інженерія екструзії синергістичні в природі. У них є свої виключні сильні і слабкі сторони, які можуть замінити один одного, але, якщо вони інтегровані належним чином, то це може істотно поліпшити конструкцію екструзійних головок.

За результатами моделювання опубліковано статті [108-119], отримано свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір [120, 121] та зроблено доповіді на науково-практичних конференціях [122-126].



## 4 ВПРОВАДЖЕННЯ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

В процесі виконання досліджень за темою дисертаційної роботи було розроблено нові конструкції екструзійних головок, а також на базі здійсненого числового моделювання проведено уточнення моделей переробного обладнання ТОВ «НВП «ІНКОС» та ТОВ «Крок-95» (м. Чернігів). Акти впровадження результатів додаються, додаток В.

### 4.1 Коефіцієнта динамічної в'язкості

Розроблена корисна модель [127] належить до способів визначення коефіцієнта динамічної в'язкості пристінного шару розплавів термопластичних полімерів, і може бути використана в дослідженні реологічних властивостей полімерів.

В основу корисної моделі поставлена задача підвищення достовірності розроблюваного способу визначення коефіцієнта динамічної в'язкості пристінного шару розплавів термопластичних полімерів, шляхом врахування такої важливої реологічної характеристики розплавів термопластичних полімерів, як їх коефіцієнт пристінного тертя біля твердої стінки віскозиметричного каналу, що приведе до уточнення розрахунків параметрів течії в технологічному обладнанні розплавів полімерів, особливо тих, що здатні утворювати поблизу твердої стінки пристінний шар зниженої в'язкості.

Спосіб визначення коефіцієнта динамічної в'язкості пристінного шару розплавів термопластичних полімерів з урахуванням коефіцієнта пристінного тертя, відповідно до якого задають температуру  $T$  розплаву термопластичного полімеру, вимірюють швидкість руху  $V$  розплаву термопластичного полімеру у сталому режимі біля твердої стінки віскозиметричного каналу, при цьому коефіцієнт динамічної в'язкості пристінного шару розплаву термопластичного полімеру визначають експериментально-розрахунковим шляхом, який відрізняється тим, що експериментально визначають коефіцієнт пристінного тертя  $f$

між твердою стінкою віскозиметричного каналу та розплавом термопластичного полімеру у залежності від сили опору переміщенню останнього, експериментально вимірюють густину  $\rho$  розплаву термопластичного полімеру, розраховують швидкість зсуву  $\dot{\gamma}$  розплаву термопластичного полімеру поблизу твердої стінки віскозиметричного каналу у залежності від швидкості руху  $V$  розплаву термопластичного полімеру у сталому режимі та його температури  $T$ .

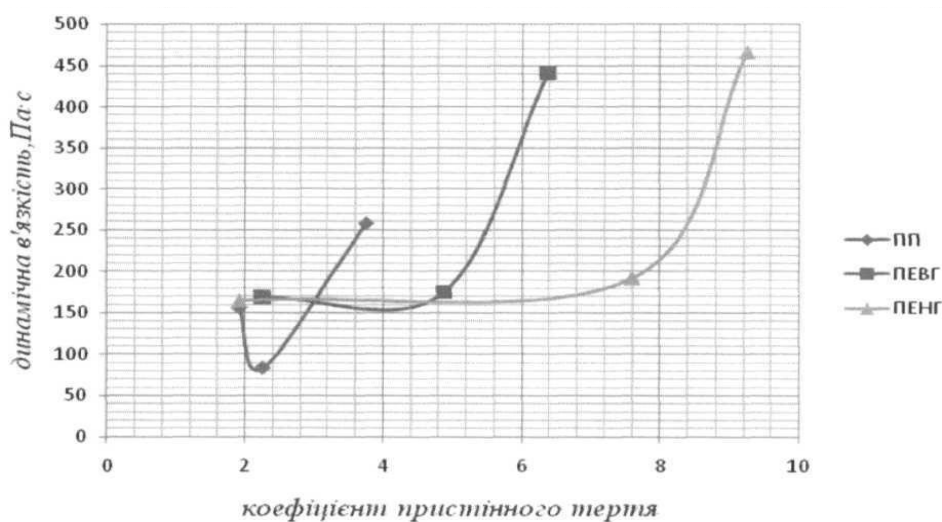


Рисунок 4.1 – Графік залежності коефіцієнту пристінного тертя від динамічної в'язкості

## 4.2 Коефіцієнт тертя

Розроблена корисна модель [128] відноситься до способів визначення коефіцієнта тертя для пари «термопластичний полімер – сталь», і може бути використана в дослідженні триботехнічних властивостей полімерів, зокрема, термопластичних.

В основу корисної моделі поставлена задача підвищення достовірності й універсальності розроблюваного способу визначення коефіцієнта тертя ковзання пари «термопластичний полімер – сталь» у залежності від температури та від досліджуваного термопластичного матеріалу, шляхом встановлення відповідної експериментально-статистичної залежності, що приведе до скорочення часових та матеріальних витрат на визначення відповідного коефіцієнту при варіюванні температури у заданому діапазоні.

Розроблений спосіб ілюструється на рисунку 4.2 і рисунку 4.3, де на рисунку 4.2 зображено розрахункову схему для визначення коефіцієнта тертя ковзання, а на рисунку 4.3 зображено графічну залежність коефіцієнта тертя ковзання поліетилену високої об'ємної густини марки ПЕВГ 18802-020 від температури. На рисунку 4.2 прийняті наступні позначення:  $F_{тер}$  — сила тертя (показання динамометра), Н;  $F_{прит}$  — сила притискання, Н;  $V$  — швидкість руху полімерного зразка, м/с; на рисунку 4.3 на осі абсцис позначено температурний діапазон (60 — 200) °С.

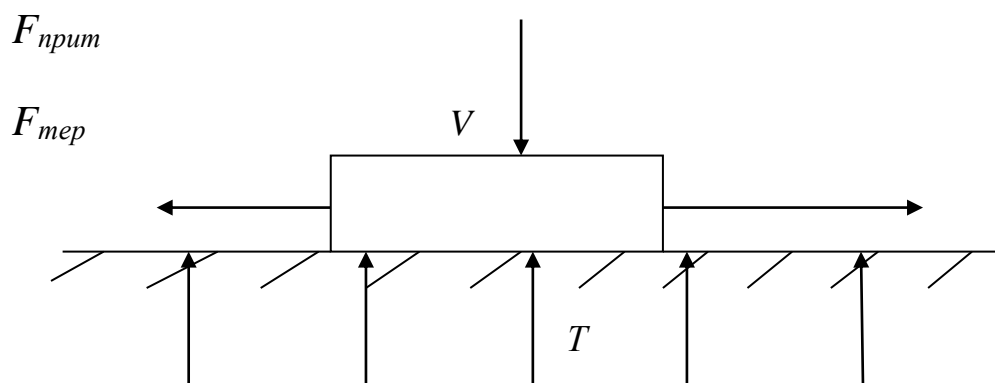


Рисунок 4.2 – Розрахункова схема для визначення коефіцієнту ковзання

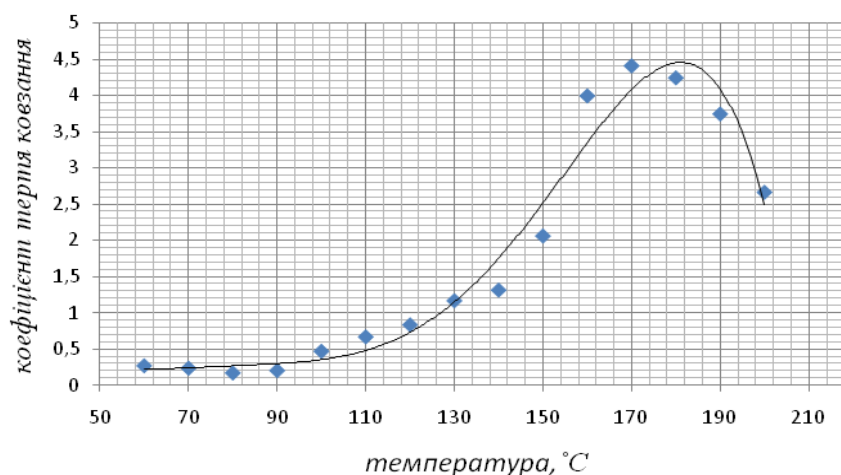


Рисунок 4.3 – Графічна залежність коефіцієнта тертя ковзання поліетилену високої об'ємної густини марки ПЕВГ 18802-020 від температури

◆ — експериментальні дані

### 4.3 Ефективний гідравлічний радіус

Розроблена корисна модель [129] належить до способів визначення ефективного гідравлічного радіуса при течії розплавів полімерів у каналах

довільного перетину, і може бути використана в дослідженні реологічних властивостей розплавів полімерів.

В основу корисної моделі поставлена задача підвищення достовірності способу визначення ефективного гідравлічного радіуса при течії розплавів полімерів у каналах довільного перерізу шляхом експериментально-теоретичного врахування неінваріантності залежності дотичних напружень на стінках каналів, в яких протікає розплав полімеру, від градієнта швидкості розплаву.

Спосіб визначення ефективного гідравлічного радіуса при течії розплавів полімерів у каналах довільного перетину, що полягає у визначенні геометричних параметрів каналів, а саме їх довжини і поперечного перерізу, і реологічних властивостей розплаву полімеру у вигляді динамічної в'язкості, з наступною побудовою розрахунково-експериментальної кривої течії розплаву полімеру в досліджуваному каналі заданої геометрії, який відрізняється тим, що здійснюють побудову експериментальної кривої течії досліджуваного розплаву полімеру в модельному каналі, наприклад, прямокутної форми з розмірами перерізу (2×32) мм, задають об'ємну витрату  $Q$  течії розплаву полімеру в довільному  $i$ -му каналі, визначають гідравлічний радіус  $R_{Gi}$   $i$ -го каналу. Визначають ефективний градієнт швидкості на стінці  $i$ -го каналу по залежності  $\Gamma_{Rp}$ . Після цього по експериментальній кривій течії для модельного каналу визначають величину напруження зсуву  $\tau_x$ , яке відповідає значенню градієнта швидкості на стінці  $i$ -го каналу  $\Gamma_{Rp}$ , а як ефективний гідравлічний радіус при течії розплавів полімерів у каналах довільного перетину приймають реологічний радіус  $R_{Ri}$   $i$ -го каналу.

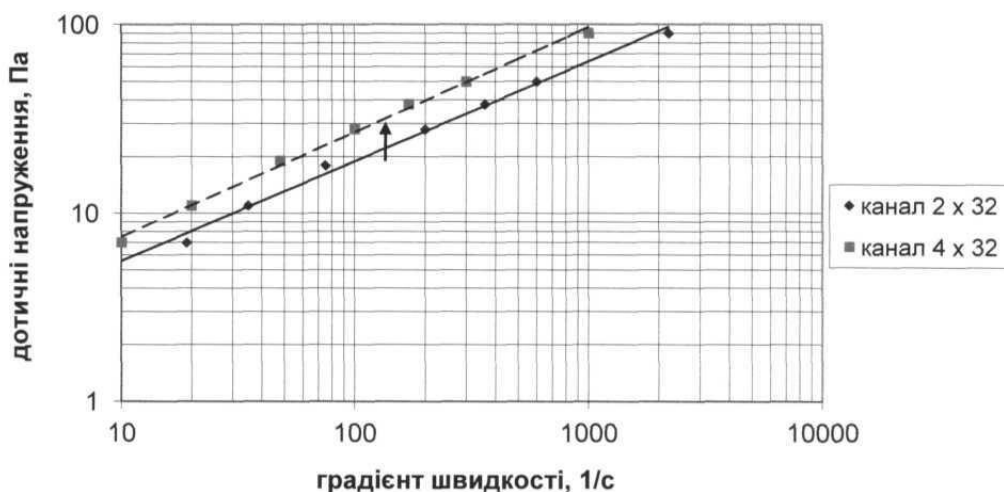


Рисунок 4.4 – Графічна залежність градієнта швидкості від дотичного напруження

#### 4.4 Реологічні параметри течії

Розроблена корисна модель [130] належить до способів визначення реологічних параметрів течії розплавів термопластичних полімерів в каналах довільної геометрії і може бути використана при дослідженні реологічних властивостей розплавів полімерів при їх течії у каналах довільного перетину, зокрема напружень зсуву і ефективного градієнта зсуву, а також гідралічного та реологічного радіусів.

В основу корисної моделі поставлена задача підвищення достовірності способу визначення реологічних параметрів течії розплавів термопластичних полімерів в каналах довільної геометрії шляхом виконання ефективної послідовності процедур реалізації способу, зокрема вибору еталонного каналу і визначення реологічних властивостей при течії розплавів термопластичних полімерів всередині нього.

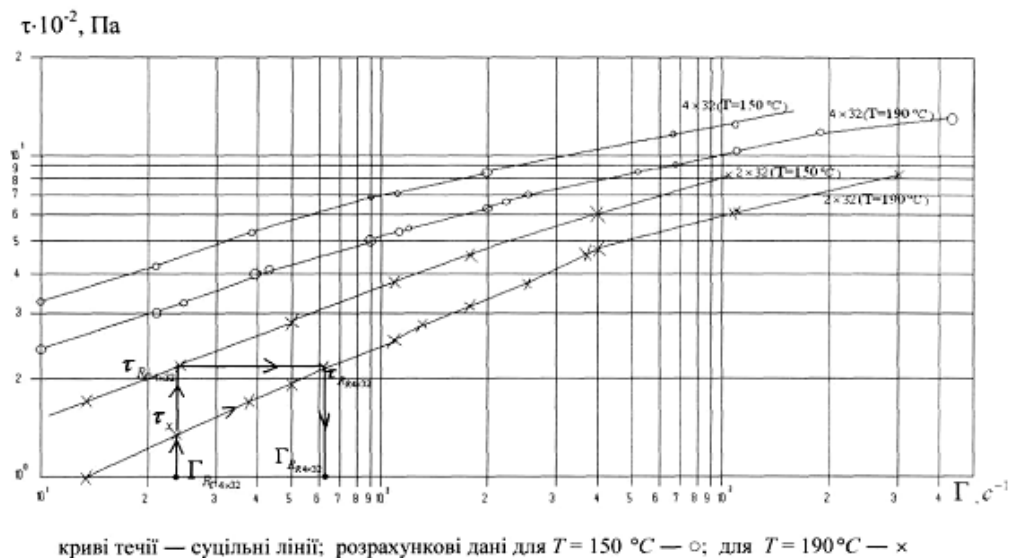


Рисунок 4.5 – Криві течії довільного і-го каналу

#### 4.5 Приведення кривих течії в каналах наперед заданої геометрії розплавів

Розроблена корисна модель [131] належить до способів приведення кривих течії в каналах наперед заданої геометрії розплавів термопластичних полімерів,

неінваріантних відносно гідравлічного радіуса каналу, до інваріантного виду, і може бути використана при дослідженні реологічних властивостей розплавів полімерів при їх течії у каналах довільного перерізу.

В основу корисної моделі поставлена задача підвищення достовірності способу приведення кривих течії в каналах наперед заданої геометрії розплавів полімерів, неінваріантних відносно гідравлічного радіуса каналу, до інваріантного виду шляхом виконання ефективної послідовності процедур реалізації способу.

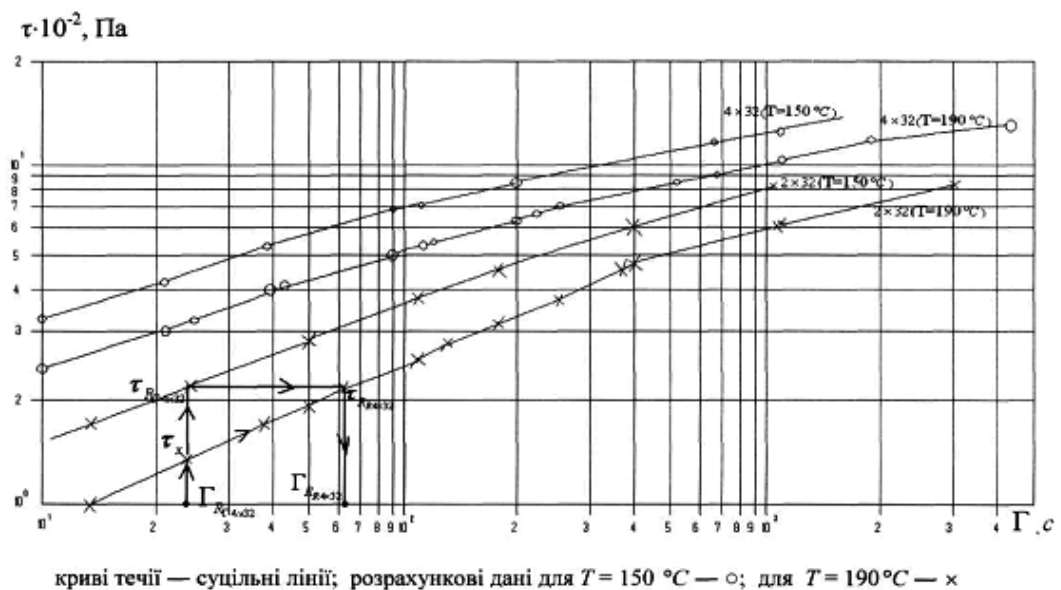


Рисунок 4.6 – Криві течії довільного і-го каналу

#### 4.6 Головка екструзійна

Розроблена [132] конструкція екструзійної головки (рисунок 4.7) дозволяє забезпечити поглинання пульсацій розплаву, що призводить до зменшення кількості виробів з дефектами поверхні. Це вирішується шляхом встановлення демпфуючого та пружного елементів з можливістю поглинання пульсацій розплаву та зміни площі поперечного перерізу каналу, по якому рухається розплав.

Кільцева екструзійна головка (рисунок 4.7) містить матрицю 1, що формує зовнішню поверхню полімерного виробу, та дорн 2, що формує внутрішню поверхню виробу. Дорн 2 і матриця 1 закріплені в дорнотримачі 3, утворюючи канал 4 для протікання розплаву з вихідною ділянкою 5, причому матриця може

рухатись зворотно-поступально вздовж осі, змінюючи переріз каналу 4. На матриці 1 встановлено пружний 6 і демпфуючий 7 елементи, що передають зусилля від неї на кришку 8.

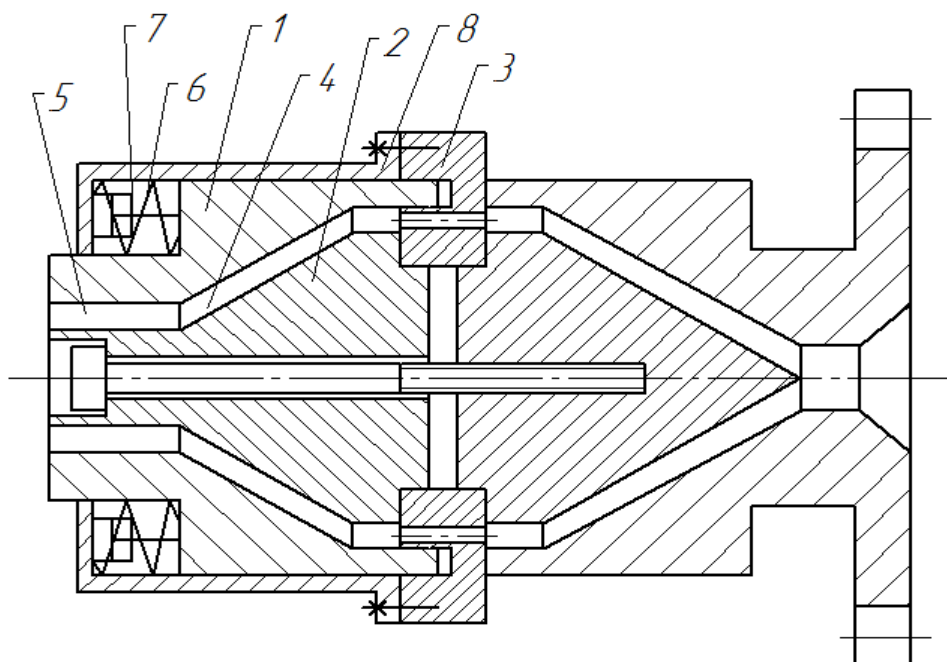


Рисунок 4.7 – Конструкція екструзійної головки

Розплав, що входить у головку, потрапляє в канал 4 між внутрішньою поверхнею матриці 1 та зовнішньою поверхнею дорна 2, утворюючи перепад тиску, що призводить до утворення сили, яка переміщує матрицю 1 в осьовому напрямку. При цьому поперечний переріз каналу 4 збільшується, а тиск в ньому починає зменшуватись. Матриця 1, переміщуючись в осьовому напрямку, передає зусилля на кришку 8 через демпфер 7, який зменшує швидкість переміщення, і пружину 6, яка намагається відвести матрицю в початкове положення. Так як процес відбувається безперервно, то матриця виконує зворотно-поступальні рухи, тим самим поглинаючи пульсації.

#### 4.7 Головка екструзійна

Розроблена [133] конструкція екструзійної головки (рисунок 4.8) дозволяє забезпечити поглинання пульсацій розплаву, що призводить до зменшення кількості виробів з дефектами поверхні. Це вирішується шляхом виконання

дорнотримача з двох частин з можливістю зворотно-поступального руху однієї частини відносно іншої, матриця і вихідна частина дорну закріплені на рухомій частині дорнотримача таким чином, що довжина каналу має можливість змінюватись.

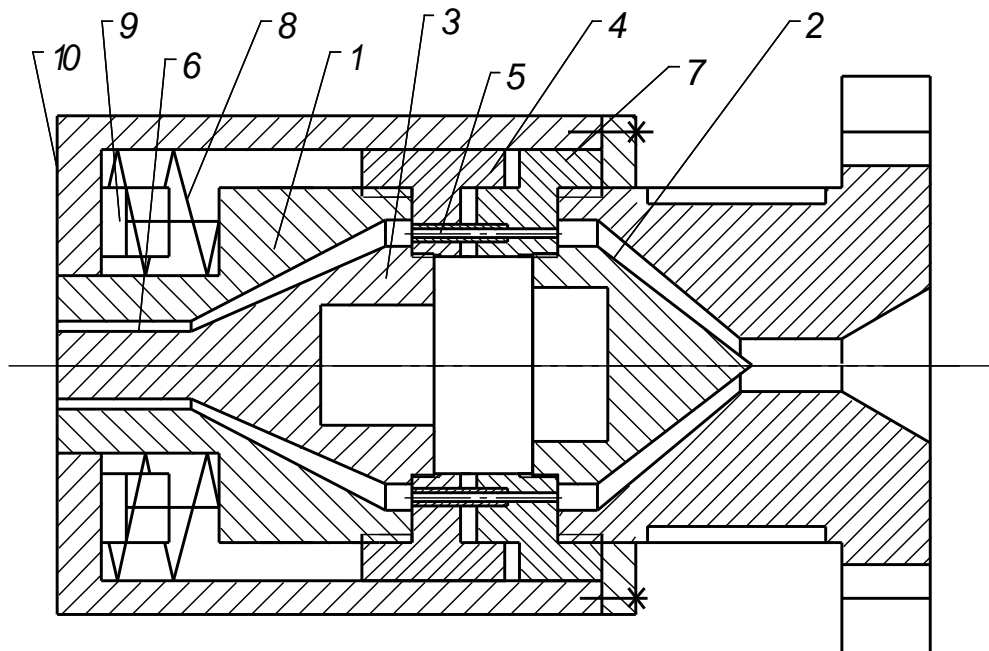


Рисунок 4.8 – Конструкція екструзійної головки

Кільцева екструзійна головка (рисунок 4.8) містить матрицю 1, що формує зовнішню поверхню полімерного виробу, та дорн, що формує внутрішню поверхню виробу і який складається з вхідної частини 2 та вихідної частини 3. Вихідна частина дорну 3 і матриця 1 закріплені в рухомій частині дорнотримача 4, утворюючи канал 5 для протікання розплаву з вихідною ділянкою 6, причому матриця 1 і вихідна частина дорну 3 можуть рухатись зворотно-поступально вздовж осі, відносно нерухомої частини дорнотримача 7, змінюючи довжину каналу 5. На матриці 1 встановлено пружний 8 і демпфуючий 9 елементи, що передають зусилля від неї на кришку 10. Корисна модель працює таким чином. Розплав, що входить у головку, потрапляє в канали 5 та 6, при цьому між вихідною частиною дорна 3 та вхідною частиною 2, утворюючи перепад тиску, що призводить до утворення осьової сили, яка переміщує матрицю 1 з вихідною частиною дорна 3 і рухомою частиною дорнотримача 4 відносно нерухомої частини дорнотримача 7.



При цьому довжина каналу 5 збільшується, а тиск в головці починає зменшуватись. Матриця 1, переміщуючись в осьовому напрямку, передає зусилля на кришку 10 через демпфер 9, який зменшує швидкість переміщення, і пружину 8, яка намагається відвести матрицю в початкове положення. Так як процес відбувається безперервно, то матриця з вихідною частиною дорна виконує зворотно-поступальні рухи, тим самим поглинаючи пульсації.

#### **4.8 Апробація результатів числового моделювання і експериментального випробування в промислових умовах**

З метою перевірки достовірності числового моделювання оберненої задачі екструзії для обчислення форми вихідного перерізу головки, необхідного для досягнення розмірів цільового профілю на виході з вільної поверхні, була розроблена і виготовлена вдосконалена конструкція екструзійної головки для виробництва L – подібного однокамерного порожнього погонажного профілю типорозміру 30 мм × 15 мм, з товщиною стінки 1,5 мм та проведено експериментальне дослідження в умовах діючого наукового виробничого підприємства «ІНКОС», м. Чернігів. В даному розділі описується процес проведення натурального експерименту та його результати при виготовленні погонажного профільного виробу.

Експериментальна установка описана в розділі 2.4.

Експериментальні дані по отриманню профілю приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Експериментальні дані

Назва параметру	Досліджуваний матеріал
	ПВХ
Типорозмір профілю, мм/мм	30x15
Продуктивність, кг/год	16,6
Оберти черв'яка, об/хв	25,7

Продовження таблиці 4.1

Час формування виробу (довжиною 2,75 м), с	97,7
Вага виробу, г/шт	220
Молекулярна маса ПВХ при температурі приведення	1500
Температура твердого полімеру	30° С
Коефіцієнт температурної залежності в'язкості	0.0001
Динамічна в'язкість в каналі профільюючої матриці, Па·с	1500
Коефіцієнт фільтрної витяжки полімеру	1,1
Густина розплаву ПВХ, кг/м <sup>3</sup>	1600

Дослідженню піддавалася композиція ПВХ виробництва Німеччини марки SorVul та виробництва України. Слід зазначити, що аналогічні дослідження, проведенні на інших марках сировини показали, що залежно від рецептури композиції експлуатаційні і технологічні параметри процесу можуть значно відрізнятися.

До технологічних параметрів переробки пластмас методом екструзії відносяться: температура по зонам екструдера, тиск розплаву, температура зон головки, швидкість обертання двигуна дозатора, швидкість обертання двигуна приводу черв'яка.

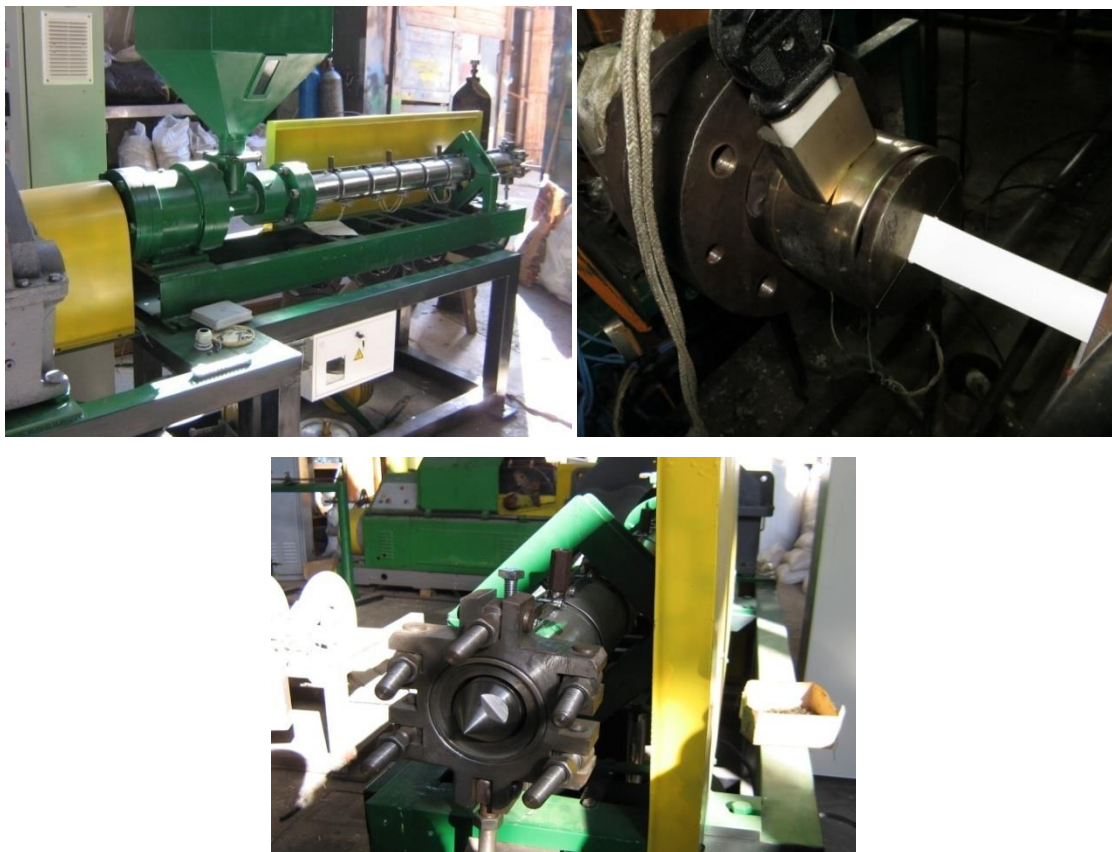


Рисунок 4.9 – Фотографії промислового обладнання процесу експерименту

Профільні екструзійні головки зазвичай зроблені з серії зібраних пластин з каналами, для формування складного переходу від кільцевого вихідного перерізу з екструдера до заданої кінцевої конфігурації вихідної ділянки формуючого каналу головки. Конструкція із складених пластин робиться для полегшення виробництва і в міру необхідності дозволяє корегування частин.

Складені пластини профілю головки як правило, мають такі елементи:

- Пластина адаптер: формує перехід від круглого вихідного перерізу з екструдера для апроксимації форми профілю і спрощений перехід від пластини адаптера до предпластини вхідного отвору.
- Предпластина: надає значне регулювання потоку за рахунок зменшення товщини в зонах сильного потоку і збільшення товщини в ділянках з низькою швидкістю потоку в головці, щоб зробити потік більш рівномірним.
- Пластина формуючого кінцевого перерізу головки: забезпечує суцільний поперечний переріз, який, як правило, в 10 разів більше, ніж товщина екструдованого продукту, для забезпечення явища релаксації в'язкопружних

напружень в розплаві перед виходом з екструзійної головки (зменшує розбухання екструдату) і утворює форму екструдату на виході з головки. Вихідний профіль має необхідну форму для компенсації деформації екструдату після виходу з головки (розбухання і просадка).

### **Методика проведення експерименту**

Під час проведення експериментальних досліджень в якості досліджуваного матеріалу використовувалися гранульований зразок полімерного матеріалу марки SorVyl виробника Німеччина.

Процес проведення експерименту описаний у розділі 2.4.

За результатами даного експерименту здійснювалась перевірка достовірності числового моделювання оберненої задачі екструзії для обчислення форми вихідного перерізу головки, необхідного для досягнення розмірів цільового профілю на виході з вільної поверхні.

Експериментально отриманий вихідний профіль при оптимізованій геометрії формуючого каналу головки показаний на рисунку 4.10. Дослідний формуючий канал формує екструдат, який являє собою L-подібний однокамерний полий профіль зі сторонами однакової товщини.

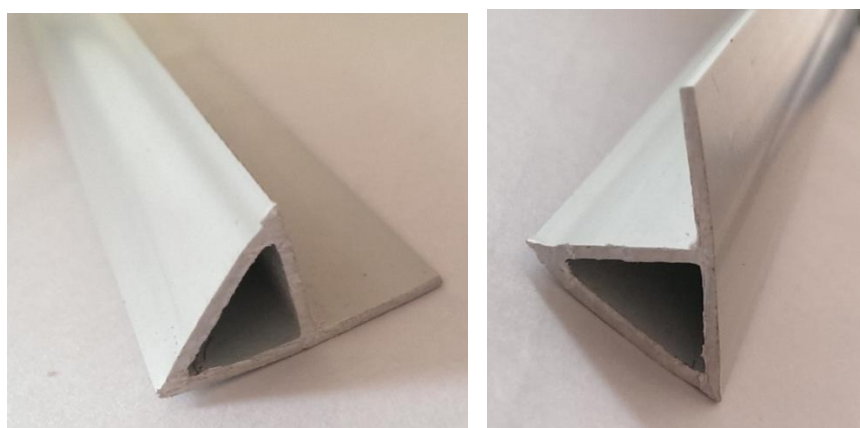


Рисунок 4.10 – Геометрія експериментального зразка L – подібного однокамерного порожнього погонажного профілю

Геометричні розміри профілю уточненої геометрії формуючого каналу головки відповідають заданим формам цільового профілю: 30 мм × 15 мм, товщина

стілки 1,5 мм, довжина головки  $L_{\text{гол}} = 0,3$  м; довжина вільного кінця  $L_{\text{проф}} = 0,6$  м.

Зібрані пластини головки для виробництва L-подібного однокамерного порожнього профілю показані на рисунку 4.11. На цьому рисунку в розібраному вигляді показані пластини головки, поперечний переріз зібраної головки.

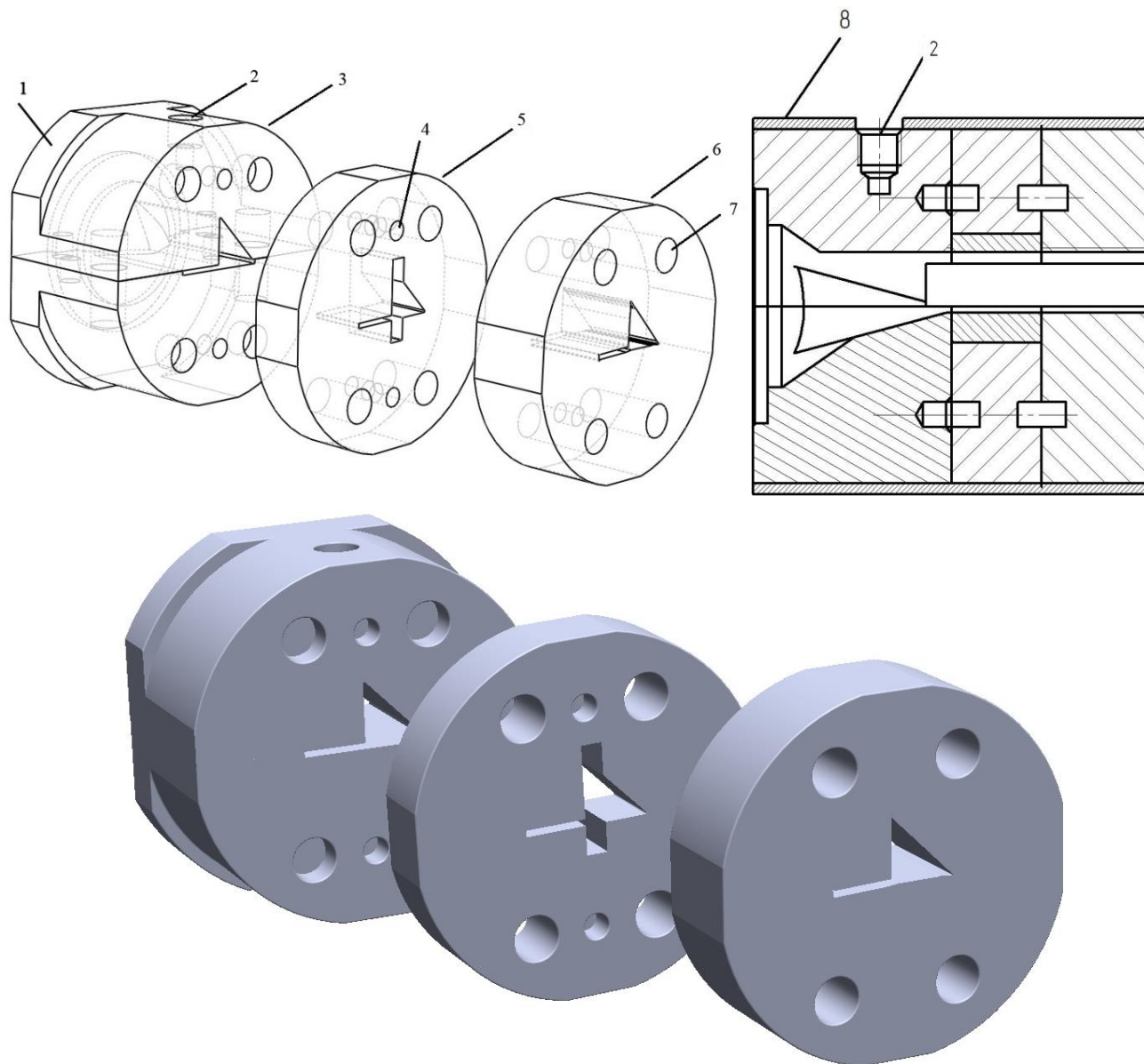


Рисунок 4.11 – Змодельована головка для виробництва L-"подібного" однокамерного порожнього профілю: а) розібраний вид; б) вид в розрізі  
 1 – монтажна пластина, 2 – отвір для термопари; 3 – пластина адаптер, 4 – отвір під розстановку штифтів; 5 – предпластина; 6 – пластина формуючого кінцевого перерізу головки, 7 – отвір під болт, 8 – стрічковий нагрівач

На рисунку 4.12 показана експериментально змодельована пластина формуючого кінцевого перерізу головки, вихідний профіль має необхідну форму

для компенсації деформації екструдату після виходу з головки (розбухання і просадка) і отримання екструдованого профілю заданої форми.

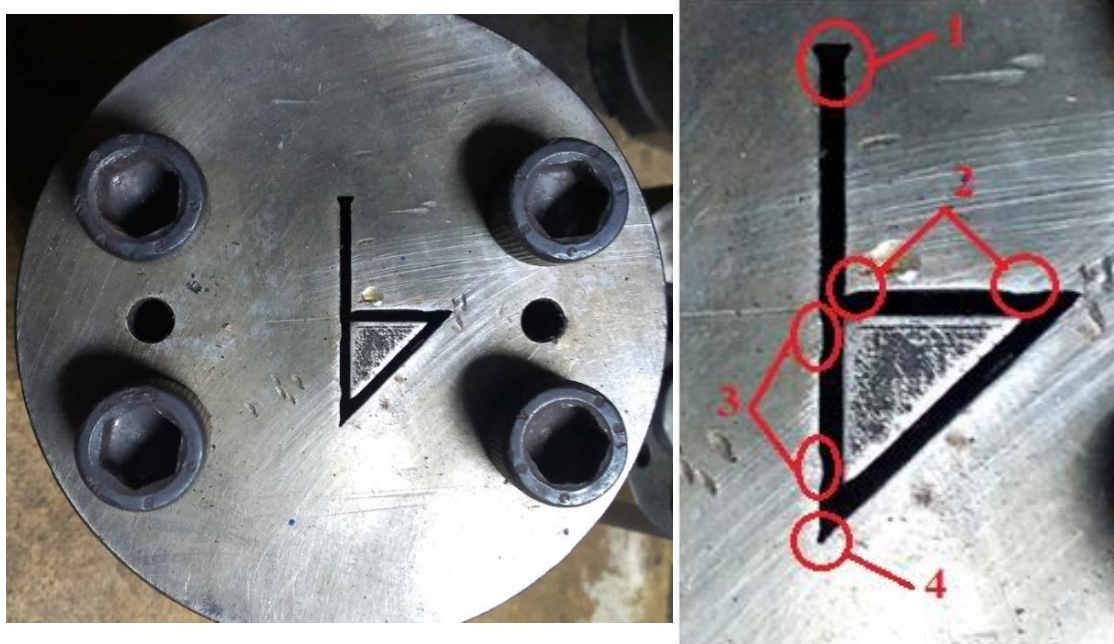


Рисунок 4.12– Кінцевий переріз експериментально змодельованої головки для виробництва L – подібного однокамерного порожнього погонажного профілю  
1 – область з розширеними краями; 2,3 – область зі впадинами; 4 – область з впадиною і витягнутим кутом

Результат натурного експерименту і числового моделювання задачі оберненої екструзії для обчислення форми вихідного перерізу головки при течії в'язкопружного розплаву полімеру підтверджує доцільність і можливість використання даної методики для досягнення розмірів цільового профілю на виході з вільної поверхні, при моделюванні течії розплаву полімеру різного типу погонажного профілю на виході з формуючого каналу інструменту екструдера.

#### 4.9 Впровадження результатів науково-технічних розробок

Було розроблено та передано до використання на ТОВ «НВП «ІНКІС» науково-технічний продукт у вигляді методики автоматизованого проектування та 3D-моделей обладнання для виготовлення полімерних виробів, в якому застосовано

сучасний підхід до проектування та моделювання з урахуванням пристінних ефектів.

Створені тривимірні моделі конструкцій та вузлів дозволяють більш точно обґрунтувати вибір їх геометричних і конструктивних параметрів та уникнути багатьох помилок, характерних при використанні традиційного підходу.

Було встановлено, що використання запропонованої методики автоматизованого проектування і конструктивних пропозицій дозволяє вдосконалити технологічні параметри процесів та конструкції робочих органів, за яких забезпечується підвищена продуктивність та якість виробів за умов зниження енергоємності процесів їх виробництва.

Очікуваний економічний ефект від впровадження технічних пропозицій з удосконалення конструктивного оформлення обладнання для виготовлення полімерних погонажних виробів при його виробництві ТОВ «НВП «ІНКОС» складає 362 тисячі грн. на рік, ТОВ "Крок-95" складає 180 тис. грн на рік.

#### **4.10 Висновки до розділу 4**

Розроблено конструкції екструзійних головок, що дозволяють компенсувати вплив пульсацій розплаву, які виникають внаслідок дії пристінних ефектів.

На розроблені конструкції отримано патенти України на корисну модель [127-133].

За результатами дисертаційної роботи розроблено конструкцію екструзійної головки, конструктивні пропозиції з уточненого профілювання формуючого інструменту методом вирішення оберненої задачі екструзії було передано та впроваджені на виробництві ТОВ НВП "ІНКОС" та ТОВ "Крок-95" (м. Чернігів) при проектуванні та виготовленні переробного обладнання.

## **ВИСНОВКИ**

1. Встановлено, що існуючі в'язкопружні реологічні моделі та методики врахування при розрахунку умов проковзування і в'язкопружних властивостей течії розплаву полімеру у формуючих каналах інструменту мають необхідну доцільність використання найбільш реалістичної і якісної реологічної моделі, яка враховує явище розбухання. Практичне освоєння нових технологій і модернізація існуючих потребує детального вивчення течій розплавів полімерів у каналах, характерних для формуючих інструментів промислових екструдерів, що використовуються при виробництві полімерно-погонажних виробів.

2. Встановлено реологічну модель для моделювання вязкопружної течії в профільних екструзійних головках. Експериментально визначені реологічні константи дозволяють точніше здійснювати розрахунок параметрів процесу течії в'язкопружної рідини в формуючому каналі та враховувати ефекти розбухання розплаву полімеру в зоні вільної поверхні на виході з формуючого інструменту, що дає можливість передбачити неоднорідність та властивості полімерних виробів.

3. Розроблена методика експериментальних досліджень реологічних параметрів матеріалу і характеру ефекту розбухання полімерного матеріалу після виходу з формуючого інструменту. Досліди є відтворюваними, однорідність результатів підтверджується, що свідчить про те, що прийняті методики досліджень забезпечують відтворюваність експериментів.

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. Результати проведених досліджень дозволяють використовувати результати числового моделювання зміни конфігурації поперечного перерізу профільних виробів складної геометрії з урахуванням в'язкопружних ефектів і на цій основі здійснювати корегування конфігурації формуючих каналів з метою забезпечення заданої конфігурації і розмірної точності перерізу полімерних профілів.



5. Прогнозування геометрії останньої ділянки формуючого каналу дало можливість отримати варіант оптимізованої геометрії вихідної області формуючого каналу головки і задану цільову форму виробу.

6. Розроблена методика моделювання процесу вільної екструзії дозволила реалізувати алгоритм проектування формуючих каналів головки методом вирішення оберненої задачі профілювання. В дисертаційній роботі наведено також варіанти проектного розрахунку формуючих каналів головки для різних полімерних погонажних виробів.

7. Розроблена методика забезпечує вирішення оберненої задачі процесу екструзії, тобто за умови відомих параметрів одержуваного екструзією виробу проектувати необхідну конфігурацію фільтри екструзійної головки. Методика поєднує наближену аналітичну та уточнену скінченно-елементну моделі, дозволяє здійснювати проектний розрахунок конфігурації формуючих каналів екструзійних головок для формування виробів з полімерних матеріалів з врахуванням залежності реологічних властивостей. 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.

8. Аналіз результатів розрахунків показує, що геометрія формуючих каналів головки, побудована за методикою, викладеній в даній роботі, дозволяє зменшити розбухання екструдату на виході з 14 – 18 % до 9 %.

9. Розроблено конструкцію екструзійної головки за результатами проектного розрахунку геометрії головки, конструктивні пропозиції з уточненого профілювання формуючого інструменту методом "оберненої екструзії" було передано та впроваджені на виробництві ТОВ НВП "ІНКОС" та ТОВ "Крок-95" (м. Чернігів).

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Tanner R. I. Rheology: an historical perspective / R. I. Tanner, K. Walters. – Elsevier, Amsterdam, 1998. – 268 p.
2. Spencer R. S. On the flow instabilities of a molten polymer / R. S. Spencer, R. E. Dillon // J Colloid Sci. – 1949. – V.4. – P. 241-253.
3. Bagley E. B. Effect of die geometry on polymer melt fracture and extrudate distortion / E. B. Bagley, H. P. Schrieber // Trans. Soc. Rheol. – 1961. – V.5. – P. 341-353.
4. Tordella J. P. Capillary flow of molten polyethylene – a photographic study of melt fracture / J. P. Tordella // Trans. Soc. Rheol. – 1957. – V.1. – P. 203.
5. Han C. D. Studies of converging flows of viscoelastic polymer melts / C. D. Han, L. H. Drexler. // J. Appl. Polym. Sci. – 1973. – V.17. – P. 2329–2354.
6. Han C. D. The Flow of High Polymers /C. D. Han, K. U. Kim. // Polym.Eng.Sci. – 1971. – V.11. – P. 395-401.
7. Xue S. C. Three dimensional numerical simulations of viscoelastic flows through planar contractions / S. C. Xue, N. Phan-Thien, R. I. Tanner. // J. Non-Newtonian Fluid Mech. – 1998. – V.74. – P. 129-245.
8. Tanner R. I. Two and three-dimensional finite volume methods for flows of viscoelastic fluids / R. I. Tanner, N. Phan-Thien, X. Huang .– Seville, Spain. : Proc.4th Eur. Cong. Rheology, 1994. – 362-364 p.
9. Baracos G. Non-isothermal viscoelastic simulations of extrusion through dies and prediction of the bending phenomenon / G. Baracos, E. Mitsoulis // J. Non-Newtonian Mech. – 1996. – V. 62. – P. 55-79.
10. Bird R. B. Dynamics of polymer Liquids / R. B. Bird, R. S. Armstrong, O. Hassager. –Wiley, New-York : Fluid mechanics, 1987 – V. 1.– 649 p.
11. Сівецький В. І. Комп'ютерне моделювання та проектування екструзійного полімерного устаткування / В. І. Сівецький, Д. Е. Сідоров, О. Л. Сокольський – К.: НТУУ КПІ, 2007. – 188 с.
12. Carniero O. S. Recent developments in automatic die design for profile extrusion / O. S. Carniero, J. M. Norbega // Plastics Rubber and Compositesю – 2004. – V. 33. – P.

400-408.

13. Сахаров О. С. Комп'ютерне моделювання процесу течії розплавів полімерів в формуючих каналах / О. С. Сахаров, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський // "Индустрия тары и упаковки": семинар, 3 квітня 2002 р.: тези доп. – К.: "Мир упаковки", 2002.
14. Kostic M. M. Design of Extrusion Dies / M. M. Kostic, L. G. Reifschneider // Encyclopedia of Chemical Processing. – 2006. – P. 633-649.
15. Кузьяев И. М. Моделирование экструзии и экструдеров при переработке полимеров: монография / И. М. Кузьяев, В. А. Свидерский, А. Д. Петухов. – Киев: Политехника, 2016. – 412 с. – (В 2 ч.).
16. Michaeli W. Extrusion Dies for Plastics and Rubber Design and Engineering Computations / W. Michaeli. – Hanser Gardner Publications. – 2007. – 472 p. – (Third Edition)
17. Панов А. А. Разработка конструкций и метода расчета многоручьевых экструзионных головок : дис. канд. техн. наук : 05.02.13 / А. А. Панов – Уфа, 2002. – 165 с.
18. Tanner R. I. A new inelastic theory of extrudate swell / R. I. Tanner // J. Non-Newtonian Fluid Mech. – 1980. – V.6 – P.289
19. Han C .D. Rheology in Polymer Processing / D. C. Chang // Academic Press. – 1976. – 367 p.
20. Мак-Келви Д. М. Переработка полимеров / Д. М. Мак-Келви. – Москва: Химия, 1965. – 442 с.
21. Фишер Е. Экструзия пластических масс / Е. Фишер – Москва: Химия, 1970. – 288 с.:ил.
22. Шен М. Вязкоупругие релаксации в полимерах / М. Шен – Москва: Мир, 1974. – 270 с.:ил.
23. Фридман М. Л. Технология переработки кристаллических полиолефинов / М. Л. Фридман. – Москва: Химия, 1977. – 398 с.ил.
24. Nickell R. E. The solution of viscous incompressible jet and free surface flows using finite-element methods / R. E. Nickell, R. I. Tanner, B. Caswell // J. Fluid Mech. –

1974. – V.65. – P.189.

25. Georgios G. A singular finite element for Stokes flow: the stick-slip problem / G. Georgios, O. Lorraine, S. William // *Int. J. For Num. Meth. In Fluids.* – 1989. – V.9. – P. 1353-1367.
26. Georgios G. The integrated singular basis function method for the stick-slip and the die-swell problems / G. Georgios, O. Lorraine, S. A. William // *Int. J. For Num. Meth. In Fluids.* – 1991. – V.13. – P. 1251-1235.
27. Liu T. Finite difference solution of a newtonian jet swell problem / T. Liu, T. Cheng // *Int. J. For Num. Meth. In Fluids.* – 1991.-V.12. – P. 125-142.
28. Allain C. Die swell in semi rigid polymer solutions / C. Allain, M. Cloitre, P. Perrot // *Eur. J. Mech., B/Fluids* – 1993. – V.12, № 2. – P. 175-186.
29. Beraudo C. A finite element method for computing the flow of multi-mode viscoelastic fluids: comparison with experiments / C. Beraudo, A. Fortin, T.Coupez // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 1998. – V.75. – P. 23.
30. Silliman W. J. Separating flow near a static contact line: slip at the all and shape of the free surface / W. J. Silliman, L. E. Scriven // *J. Comput. Phys.* – 1980. – V.34. – P. 287-313.
31. Wesson R. D. Flow singularity and slip velocity in plane extrudate swell computations / R. D. Wesson, T. C. Papanastasiou // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 1988. – V.26. – P. 227.
32. Phan-Thien N. Influence of wall slip on extrudate swell: a boundary element investigation / N. Phan-Thien // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 1988. – V.26. – P. 327.
33. Ramamurthy A. V. Wall slip in viscous fluids and influence of materials of constructions / A. V. Ramamurthy // *J. Rheology* – 1988. – V.30. – P. 337.
34. Luo X. L. A singular finite element for Non-isothermal viscoelastic simulations of extrusion through dies / X. L. Luo, R. I. Tanner // *Rheol. Acta* – 1987. – V.26. – P. 499-507.
35. Barakos G. Non-isothermal viscoelastic simulations of extrusion through dies and prediction of the bending phenomenon / G. Barakos, E. Mitsoulis // *J. Non-*

NewtonianFluidMech. – 1996. – V.62. – P. 55-79.

36. Белобородова Т. Г. разработка конструкции и метода расчета установки для измельчения полимерных отходов : дис. канд. техн. наук : 05.02.13 / Белобородова Татьяна Геннадиевна – Уфа, 2001. – 159 с.
37. Панов А. К. Гидродинамика потоков аномально-вязких полимерных систем в формующих каналах / А. К. Панов, А. Р. Апасов. – Уфа: УГНТУ, 1994. – 260 с.
38. Виноградов Г. В. Реология полимеров / Г. В. Виноградов, А. Я. Малкин. – Москва: Химия, 1997. – 438 с.
39. Басов Н. И. Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки пластмасс / Н. И. Басов, Ю. В. Казанцев, В. А. Любартович. – Москва: Химия, 1986 – 488 с.
40. Мехлис А. Н. Разработка конструкции и метода расчета экструзионных головок для изготовления оболочек обрамления труб : дис. канд. техн. наук : 05.02.13 / Мехлис Александр Николаевич – Уфа, 2001. – 137 с.
41. Ким В. С. Теория и практика экструзии полимеров / В. С. Ким – Москва: Химия, КолосС, 2005. – 568с
42. Mitsoulis E. Annular extrudate swell of pseudoplastic and viscoplastic fluids / E. Mitsoulis // J. Non-Newton. Fluid Mech. – 2007. – V.141 .– P. 138–147.
43. Karapetsas G. Transient squeeze flow of viscoplastic materials / G. Karapetsas, J. Tsamopoulos // J. Non-Newton. Fluid Mech. – 2006. – V.133. – P. 35–56.
44. Dimakopoulos Y. Transient displacement of a Newtonian fluid by air in straight or suddenly constricted tubes / Y. Dimakopoulos, J. Tsamopoulos // Phys. Fluids. – 2003. – V15 (7). – P. 1973–1991.
45. Kostic M. M. Computational desing of a U-profile die and calibrator / M. M. Kostic, L. G. Reifschneider // ANTEC. – 2004. – P. 246-250.
46. Liu T. Finite difference solution of a Newtonian jet swell problem / T. Liu, T. Cheng // Int. J. For Num. Meth. In Fluids. – 1991. – V.12. – P. 125-142.
47. Georgiou G. Annular liquid jets at high Reynolds numbers / G. Georgiou // Int. J. Numer. Methods Fluids. – 2003. – V.4. – P. 117–130.
48. Housiadas K. / The steady annular extrusion of a Newtonian liquid under gravity and

- surface tension / K. Housiadas, G. Georgiou, J. Tsamopoulos // *Int. J. Numer. Methods Fluids*. – 2000. – V.33. – P. 1099–1119.
49. Tsamopoulos J. Steady bubble rise and deformation in Newtonian and viscoplastic fluids and conditions for their entrapment / J. Tsamopoulos, Y. Dimakopoulos, N. Chatzidai, G. Karapetsas, M. Pavlidis // *J. Fluid Mech.* – 2008. – V.601. – P. 123–164.
50. Ansari M. *Rheology and Processing of HDPEs: Effects of Molecular Characteristics* / M. Ansari. — Vancouver: The University of British Columbia, 2012. — 162 p.
51. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров / Дж.Ферри. – Москва: Изд-во иностр. лит., 1963. –535 с.
52. Виноградов Г. В. Реологические свойства полимеров в текучем состоянии / Г. В. Виноградов, А. Я. Малкин, Ю. Г. Яновский, В. Ф. Шумский, Е. А. Дзюра. // *Мех. Полимеров*.– 1969. – №1. – С. 164-181.
53. White S. A. Review of the entry flow problem: experimental and numerical / S. A. White, A. D. Gotsis, D. G. Baird // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 1987. – V.24. – P. 121-160.
54. Evans R. E. Flow characteristics associated with abrupt changes in geometry in the case of highly elastic liquids / R. E. Evans, K. Walters // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 1986. – V.20. – P. 11-29.
55. Boger D. Further observation of elastic effect in tubular entry flows / D. Boger, D. Hur, R. Binnington // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 1986. – V.20. – P.86-98.
56. Piau J. Effect of die entrance filtering on mitigation of upstream instability during extrusion of polymer melts / J. Piau, S. Nigen, El Kissi // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 2000. – V.91. – P. 37-57.
57. Chung T. J. *Computational Fluid Dynamics* / T. J. Chung // Cambridge University Press, Cambridge. – 2002. – P. 533–580.
58. Pinho F. T. Axial annular flow of a nonlinear viscoelastic fluid – an analytical solution / F. T. Pinho, P. J. Oliveira // *J. Non-Newton. Fluid Mech.* – 2000. – V. 93. – P. 325–337.
59. Cruz D. O. A. Analytical solutions for fully developed laminar flow of some viscoelastic liquids with a Newtonian solvent contribution / D. O. A. Cruz, F. T.

- Pinho, P. J. Oliveira // *J. Non-Newton. Fluid Mech.* – 2005. – V.132. – P. 28–35.
60. Karibullina F. R. Non-Newtonian fluid film creeping due to thermocapillary force in transport phenomena in two-phase flow / F. R. Karibullina, F. A. Garifoullin, F. Kh. Tazioukov // ed. Ch. Boyadjiev, Bulgaria. – 1997. – P. 20-22.
61. Karapetsas G. Transient squeeze flow of viscoplastic materials / G. Karapetsas, J. Tsamopoulos // *J. Non-Newton. Fluid Mech.* – 2006. – V.133. – P. 35–56.
62. Talay Akyildiz F. Viscoelastic lubrication with Phan-Tien-Tanner fluid (PTT) / F. Talay Akyildiz, H. Bellout // *ASME Journal of Tribology.* – 2004. – V. 126(2). – P. 288-291.
63. Crochet N. J. Numerical Methods in Non-Newtonian Fluid Mechanics / N. J. Crochet, K Walters // *Ann. Rev. Fluid. Mech.* – 1983. – V. 15. – P.241.
64. Clemeur N. On the evaluation of some differential formulations for the pom-pom constitutive model / N. Clemeur, R. P. G. Rutgers, and B. Debbaut.// *Rheol. Acta,* – 2003. – V.42(1). – P. 217-231.
65. ANSYS Polyflow User's Guide – Canonsburg, PA 15317, 2013. – 790 p. – (ANSYS, Inc. South pointe).
66. McLeish T. C. B. Molecular constitutive equations for a class of branched polymers. The pom-pom polymer / T. C. B. McLeish, R. C. Larson // *J. Rheol.* – 1998. – V.42(1). – P. 82-112.
67. Manuel A. Alves Study of steady pipe and channel flows of a single-mode Phan-Thien–Tanner fluid / Manuel A. Alves , Fernando T. Pinho, Paulo J. Oliveira // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 2001. – V.101. – P. 55–76.
68. Baaijens Frank P.T. Viscoelastic flow past a confined cylinder of a low density polyethylene melt / P. T. Baaijens Frank, H. A. Selen Sjaak, P. W. Baaijens Hans, W. M. Peters Gerrit, E. H. Meijer Han // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 1997.– V.68. – P. 173-203.
69. Pauli L. Towards shape optimization of profile extrusion dies with respect to homogeneous die swell / L. Pauli, M. Behr, S. Elgeti // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics.* – 2013. – V.200. – P. 79-87.
70. Karapetsas G. Steady extrusion of viscoelastic materials from an annular die / George

- Karapetsas, John Tsamopoulos // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 2008. – V.154. – P. 136–152.
71. Mirzazadeh M. Purely tangential flow of a PTT-viscoelastic fluid within a concentric annulus / M. Mirzazadeh, M. P. Escudier, F. Rashidi, S. H. Hashemabadi // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 2005. – V.129. – P. 88–97.
72. Mua Y. Modeling and simulation of three-dimensional planar contraction flow of viscoelastic fluids with PTT, Giesekus and FENE-P constitutive models / Yue Mua, Guoqun Zhao, Xianghong Wua, Jiqiang Zhai // *Applied Mathematics and Computation.* – 2012. – V.218. – P. 8429–8443.
73. Robert L. Stick-slip flow of high density PE in a transparent slip die investigated by laser Doppler velocimetry / L. Robert, Y. Demay, B. Vergnes // *Rheologica Acta.* – 2004. – N 43. – P. 89-98.
74. Быстрой Г. П. Влияние вязкоупругих свойств жидкости и последствия на механизм возникновения развитой турбулентности / Г. П. Быстрой, С. И. Студенок // *Наука и технологии. Избранные тр. Российской школы «К 70-летию Г. П. Вяткина».* – М.: РАН, 2005. – С. 163–174
75. Luo X. L. Finite element simulation of long and short die extrusion experiments using integral models / X. L. Luo, R. I. Tanner // *Int. J. Numer. Meth. Eng.* – 1988. – N 25. – P. 9-22.
76. Goublomme A. Numerical prediction of extrudate swell of a high-density polyethylene / A. Goublomme, B. Draily, M. J. Crochet // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 1992. – N 44. – P. 171-195.
- 77 Bush M. B. Three-dimensional viscous flows with a free surface: flow out of a long square die / M. B. Bush, N. Phan-Thien // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 1985. – N18. – P. 211–218.
78. Tran-Cong T. Three-dimensional study of extrusion processes by boundary element method 2. Extrusion of a viscoelastic fluid / T. Tran-Cong, N. Phan-Thien // *Rheol. Acta* – 1988. – N 27. – P. 639–648.
79. Karagiannis A. Three-dimensional extrudate swell of creeping Newtonian jets / A. Karagiannis, A. N. Hrymak, J. Vlachopoulos // *AIChE J.* – 1988. – N 34.– P. 2088–2094.



80. Shiojima T. Three-dimensional finite element method for extrudate swells of a Maxwell fluid / T. Shiojima, Y. Shimazaki // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 1990. – N 34. – P. 269–288.
81. Wambersie O. Transient finite element method for calculating steady state three-dimensional free surface / O. Wambersie, M. J. Crochet // *Int. J. Numer. Meth. Fluids* – 1992. – N 14. – P. 343–360.
82. Legat V. Prediction of three-dimensional general shape extrudates by an implicit scheme / V. Legat, J. M. Marshall // *Int. J. Numer. Meth. Fluids* – 1992. – N 14. – P. 609–625.
83. Тадмор З. Теоретические основы переработки полимеров / З. Тадмор, К. Гогос. – Москва: Химия, 1984. – 632 с. – (Пер. с англ. под ред. Торнера Р. В.).
84. Сівецький В. І., Сокольський О. Л., Івіцький І. І. Методики визначення наявності, характеру та величини пристінних ефектів при течії полімерних матеріалів / В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький // *Технологический аудит и резервы производства.* — 2015. — № 4. — С. 48-52.
85. Kennings R. An algorithm for the simulation of transient viscoelastic flows with free surfaces / R. Kennings // *J. Comp. Phys.* – 1986. – V.62, №1. – P. 199-220.
86. Основы научных исследований: Учеб. Для техн. Вузов/ [В.И. Крутов, И.М. Грушко, В.В. Попов и др] Под ред. В.И. Крутова, В.В. Попова. – Москва: Высш. шк., 1989. – 400 с.
87. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В. В. Кафаров. – Москва: Химия, 1971. – 496 с.
88. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Макаров, Ю. В. Грановский – 2-е изд. доп., перераб. – Москва: Химия, 1976. – 280 с.
89. Ахназарова С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: Учеб. Пособие / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – 2-е изд. доп., перераб. – Москва: Высш. шк. 1985. – 327 с.

90. Guillet Seriai M. Quantitative evaluation of extrudate swell from viscoelastic properties of polystyrene / M. Seriai Guillet // *Rheol. Acta* . – 1991. – N 30. – P. 540-548.
91. Вачагин К. Д. Методика расчета пропускной способности прямоугольного сечения при течении расплавов полимеров / К. Д. Вачагин, В. И. Большаков, Б. Ф. Двоеглазов // *Машины и аппараты химической технологии: сб. науч. тр.* – Казань, 1973. – № 1. – С. 81-84.
92. Аскадский А. А. Деформация полимеров / А. А. Аскадский. – Москва: Химия, 1973. – 447 с.
93. Басов Н. И. Расчет и конструирование формующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов: Учебник для вузов / Н. И. Басов, В. А. Брагинский, Ю. В. Казанков. – Москва: Химия, 1991. – 352 с.
94. Панов А. К. Гидродинамика потоков вномально-вязких полимерных систем в формующих каналах / А. К. Панов, А. Р. Анасов. – Уфа.: Изд-во УГНТУ. – 1994. – 296 с.
95. Polymer-chemie.de [Электронный ресурс] : [Интернет-портал]. – Электронні дані. – [Germany: Polymer-Chemie GmbH]. – Режим доступа: <http://www.polymer-chemie.de/produkte-anwendungen/hart-pvc-granulate> (дата звернення 30.03.2013). – Назва з екрана.
96. Босый В. В. Инженерные методы расчета погрешностей при выполнении лабораторных работ по курсам «Тепломассообмен» и «Техническая термодинамика» / В. В. Босый, Г. Н. Васильченко, Е. Н. Панов. — Киев, 1985. — 72 с.
97. Whipple B. A. Velocity distribution in die swell / B. A. Whipple, C. T Hill // *AIChE*. – 1978. – V.24. – P. 664-679.
98. ANSYS POLYFLOW 12.1 User's Guide, 2010. – 859 p. – (ANSYS, Inc. is certified to ISO 9001:2008).
99. Sienz J. Sensitivity analysis for the design of profile extrusion dies / J. Sienz, A. Goublomme, M. Luege // *Computers and Structures*. – 2010. – N88. – P. 610-624.

100. Biba N. 3D FEM Simulation system for optimization of profile extrusion / Nikolai Biba, Sergei Stebunov and Andrey Lishny // Quantor Form Ltd. – 2004. – P. 1-4.
101. Yilmaz, O. A method to obtain balanced flow in profile extrusion dies / O. Yilmaz, K. Hirkkopru // ANTEC. – 2009. – P. 1566-1571.
102. Kevin R. J. Three-dimensional streamlined finite elements: design of extrusion dies / R. J. Kevin, T. C. Ellwood, O. J. Wilkes // International journal for numerical methods in fluids. – 1992. – N 14. – P.13–24.
103. Tran-Cong T. An inverse problem by boundary element method / T. Tran-Cong, T. Nguyen-Thien, A. L. . Graham. // Transactions on Modelling and Simulation. – 1996. – V.13 – P. 265–274.
104. Carneiro O. S. Recent developments in automatic die design for profile extrusion / O. S. Carneiro, J. M. Nobrega // Plastics Rubber and Composites. – 2004. – N 33. – P.400–408.
105. Kostic M. M. Design of Extrusion Dies / M. M. Kostic, L. G. Reifschneider // Encyclopedia of Chemical Processing. – 2006. – P. 633-649.
106. Polyflow (application software) [Электронный ресурс] // Fluent Inc.: Lebanon, NH. – 2005 – Режим доступа до ресурсу: <http://www.fluent.com/software/polyflow>.
107. Reifschneider L.G. Computational Design of a U-Profile Die and Calibrator / L. G. Reifschneider, M. K. Kostic, S. R. Vaddiraju // ANTEC. – 2004. – P. 246-250.
108. **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).
109. **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).
110. 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.
111. 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.
112. **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.
113. 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.
114. 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.
115. **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..
116. **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.
117. **Коваленко К. Г.** Проектирование экструзионного формирующего 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..
118. **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..
119. **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..
120. Патент на корисну модель № 81464 Україна, МПК (2009) G01N11/14. Спосіб визначення коефіцієнта динамічної в'язкості пристінного шару розплавів термопластичних полімерів з урахуванням коефіцієнта пристінного тертя / **Колосов О. Є., Сивецкий В. І., Коваленко К. Г.** та ін. – u№ 201302110; заявл. 20.02.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 4 с..
121. 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., Сивецкий В. І., Коваленко К. Г.** та ін. – u№ 201302111; заявл. 20.02.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 4 с..
122. 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., Сивецкий В. І., Коваленко К. Г.** та ін. – u№ 201302112; заявл. 20.02.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 5 с..
123. 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., Сивецкий В. І., Коваленко К. Г.** та ін. – u№ 201302113; заявл. 20.02.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 7 с..
124. 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..
125. Патент на корисну модель № 82157 України, МПК В29С 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.
126. Патент на корисну модель № 82205 України, МПК В29С 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.
127. 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.
128. **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.: Ресурсоенергоефективні процеси, технології та обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів: Зб. доп. – К.: Січкап, 2012. – С. 28-29.
129. **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.: Ресурсоенергоефективні процеси, технології та обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів: Зб. доп. – К.: Січкап, 2013. – С. 51-52.
130. **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 междун. науч.-техн. конф.: Технология и инженерное образование: Тези доп. – Севастополь, 2013. – С. 58-60.

131. **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.
132. 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.
133. 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.

## Додаток А

### Методика розрахунку геометрії каналів екструзійних головок для формування профілів методом вільної екструзії

*Етап 1.* На першому етапі проектування головки потрібно визначити мету та області для моделювання:

1.1. Визначитися з результатами, які потрібно отримати (наприклад, падіння тиску, масову витрату, форму екструдату, баланс потоків тощо).

1.2. Визначити параметри, які потрібно враховувати під час аналізу процесу (температура, сила тяжіння, теплота в'язкої дисипації, вільна поверхня тощо).

1.3. Зробити припущення, які спрощують процес розрахунку (спрощення геометрії; застосування 2D, а не 3D моделювання; наявність симетрії).

1.4. Визначити потрібну ступінь точності (зокрема роздільну здатність сітки).

1.5. Визначитися з можливим часом розрахунку (застосування 2D, а не 3D моделювання, роздільна здатність сітки та ін.).

Під час визначення області моделювання потрібно:

1.6. Визначити початок і кінець розрахункової області й підобластей.

1.7. За можливості спробувати спростити область, зокрема наблизити її до 2D вигляду або вісесиметричної задачі.

1.8. Визначити місце розмежування області рідини і твердих поверхонь головки.

1.9. Максимально спростити геометрію виробу (позбавитися непотрібних елементів, які ускладнюють сітку, наприклад, буртиків, болтів тощо; використати симетрію або періодичність або ці дві умови, а також функцію «граничні умови симетричні / періодичні»)?

1.10. Визначити, чи потрібно розбити модель так, щоб було можливо задати граничні умови або різномірні області.

Для створення системи аналізу використовуємо програмний пакет Ansys Polyflow перетягуванням у робочу область.

*Етап 2.* Наступним кроком проектування є розроблення сітки або імпорт



файлу сітки (\*.msh). Для розроблення сітки потрібно проаналізувати та зробити таке:

2.1. Визначити роздільну здатність сітки в кожній ділянці області (сітка має враховувати геометричні особливості області і співвідношення параметрів процесу течії рідини, зокрема, швидкості, тиску, температури).

2.2. Визначити найдоцільніший вид сітки з урахуванням особливостей геометрії області (можливість застосування Quad/Hex вузлової сітки (чотирьохгранної для 2D або шестигранної для 3D задачі), Tri/Tet (трикутної для 2D або тетраедричної для 3D задачі) чи гібридної сітки; визначити потребу у застосуванні різнорідних сіток для різних ділянок.

2.3. З'ясувати достатність ресурсу комп'ютера (кількість потрібних комірок/вузлів; кількість використовуваних фізичних моделей).

*Застосування Tri/Tet і Quad/Hex вузлових сіток.*

Для орієнтованого потоку геометрії Quad/Hex вузлові сітки можуть забезпечити більш високу якість розв'язання задачі з меншою кількістю комірок або вузлів, ніж аналогічні Tri/Tet вузлові сітки.

У разі, коли для складної геометрії при використанні Quad/Hex вузлової сітки її явна перевага відсутня, можна спробувати створити Tri/Tet вузлову або гібридну сітку.

*Застосування Багатозонних (Гібридних) вузлових сіток.*

Багатозонні, або гібридні, сітки дозволяють використання різних методів побудови сітки на різних ділянках, забезпечуючи при цьому високу точність та ефективний час розрахунку. Крім того, в разі відсутності збігу вузлів на всіх ділянках може бути використаний неузгоджений інтерфейс.

Гібридні сітки зазвичай поєднують Tri/Tet вузлові елементи з іншими елементами в окремих зонах області (наприклад можна використовувати елементи Prisma / Wedge (Призма / Клин) для розрахунку граничних шарів. Такі сітки більш ефективні й точні, ніж Tri/Tet сітка).

*Застосування різнорідних вузлових сіток для різних областей.*

Різнорідні вузлові сітки доцільно використовувати в разі наявності області

або її ділянок зі складною геометрією за умови побудови сітки для кожної ділянки з наступним їх об'єднанням.

Після визначення типу сітки та її завантаження запускається POLYDATA (геометрія для задачі буде відображена у вікні графічного відображення).

Для визначення профілю головки перебудова сітки застосовується для кожної підобласті. Основною метою розрахунку при цьому є обчислення геометрії головки для отримання бажаної форми екструдату. Нестисливість рідини й рівняння імпульсу враховуються програмним комплексом за замовчуванням.

*Етап 3.* Далі потрібно визначити модель для заданої задачі і підзадачі для розрахунку потоку в ізотермічному наближенні.

Більшість нелінійних задач достатньо складно сходяться до номінального значення параметрів розв'язку, отже відповідна числова методика має забезпечити розв'язання поставленої задачі. Зокрема особливої уваги потребують такі випадки:

- процес переробки в'язкопружних рідини, що характеризується високим числом Вайссенберга;
- задачі з вільними поверхнями або випадки, пов'язані із соекструзією рідин з істотно різною реологією;
- наявна ступенева рідина з дуже низьким ступеневим показником;
- наявні неізотермічні потоки, випадки з високою конвекцією.

Для аналізу таких випадків застосовується схема еволюції – додаткова числова схема, яка полегшує збіжність параметрів потоку у складних умовах. Еволюція може бути застосована на граничні умови (об'ємні витрати, температура, тиск, коефіцієнт проковзування та ін.) і властивості матеріалу (індекс розрідження під час зсуву, час релаксації, масова теплоємність та ін.).

*Етап 4.* Після вибору моделі та схеми еволюції наступним кроком є створення підзадачі для потоку рідини. У нашому випадку потік ізотермічний, тому користуємося підзадачею `Differentialviscoelasticisothermalflowproblem` (Диференційний в'язкопружний ізотермічний потік).

*Етап 5.* Наступним кроком є визначення області, для якої застосовується підзадача.

Дане завдання включає вільну поверхню, так що область розділена на дві підобласті: одна для ділянки поблизу вільної поверхні, а інша – для решти області. У цій задачі вибрана підзадача (етап 4), за замовченням, стосується обох підобластей.

*Етап 6.* Для введення параметрів перероблюваного матеріалу POLYDATA вказує, які властивості матеріалу можуть бути враховані в підзадачі. У цьому разі для специфікації доступні диференційні в'язкопружні моделі, інерційні члени й сила тяжіння. Для нашого завдання визначають тільки в'язкопружну модель потоку розплаву (у пропонованій методиці модель представлена законом Фан-Тьен-Таннера).

*Етап 7.* На етапі визначення граничних умов задають умови для кожної з границь області. Коли вибирається границя, її розташування у графічному вікні виділено червоним кольором.

Для застосування функції Evolution на обрану границю області у верхній частині меню POLYDATA необхідно активувати функцію EVOL.

Для моделювання процесу екструзії скінченноелементна сітка може зазнавати значних деформацій. Меню перевірки спотворення сітки виявляє всі можливі спотворені елементи. На цьому кроці параметри приймаються за замовчуванням.

*Етап 8.* Після розрахунку Polyflow забезпечує можливість збереження результатів у різних форматах, тому потрібно вибрати формат, який найбільш придатний для наступної графічної постобробки програми.

Меню POLYDATA пропонує підтвердити обрані параметри, які мають бути збережені у файл результатів для постобробки.

Призначається система одиниць для моделювання.

Після визначення моделі в POLYDATA необхідно зберегти файл даних. На наступному етапі цей файл даних передається у Polyflow для подальшого обчислення.

Необхідно обрати Assent (підтвердити) і Continue (продовжити). Це підтвердження імен для виводу графічних файлів за замовчуванням (cfx.res), які

мають бути збережені для подальшого оброблення, і формат POLYDATA файлу результатів (res).

*Етап 9.* Наступним кроком є запуск POLYFLOW для розв'язання обраної моделі з використанням POLYDATA.

Перевіряється збіжність рішення у ListingFile (файл списку): дискретизовані рівняння збереження розв'язуються ітераційно до збіжності; збіжність досягається, якщо зміни у розв'язку між ітераціями несуттєві; система забезпечує контроль помилки прогнозу; точність вирішення збіжності залежить від адекватності й точності фізичних моделей; роздільної здатності сітки; числових помилок.

*Етап 10.* Для перевірки результатів моделювання POLYFLOW використовується CFD-Post. Також можуть бути використані VisualizationTools (інструменти візуалізації), щоб відповісти на питання щодо загальної картини потоку, наявності зон рециркуляції, визначення вільної форми поверхні, а також вирішення ключових властивостей потоку.

Результати розрахунку виводяться в графічному вигляді в спеціалізованій програмі, і в табличному вигляді, придатному для обробки в програмі Excel.

## Додаток Б

### Методика проведення розрахунку каналів профільних погонажних екструзійних головок методом оберненої екструзії

Числове моделювання надає можливість дослідження таких важливих параметрів процесу екструзії (які майже неможливо визначити експериментально), як розподіл швидкості течії полімеру в формуючих каналах головки, напруження, що діють на перероблюваний матеріал і конструктивні параметри головки, тиск і температурні поля [99, 102]. Зазвичай конструкторам відома потрібна форма вихідного профілю, але не відома відповідна їм геометрія формуючих каналів головки. Потрібна форма каналів головки для формування певного виробу може бути визначена методом зворотного проектування. Так, зокрема програмний комплекс Ansys Polyflow (номер ліцензії 0065974) реалізує алгоритм розв'язання «зворотного завдання екструзії», який обчислює форму каналів головки на виході (тобто профіль формуючого каналу), яка потрібна для досягнення цільової конфігурації профілю на виході з області вільної поверхні. Програма «визначає» форму формуючого каналу, яка надасть можливість досягти конфігурації цільового профілю після розбухання екструдату [98, 99, 104].

Ця методика базується на встановленні і розв'язання 3D оберненої задачі екструзії. Після виходу екструдату з формуючого каналу екструзійної головки одержуваний профіль утворює вільну поверхню, форма якої залежить як від технологічних параметрів процесу екструзії, так і від геометрії формуючих каналів головки.

Розроблена методика визначає порядок реалізації складної оберненої задачі процесу екструзії. У цій методиці враховуються умови проковзування розплаву полімеру по поверхнях формуючих каналів головки. Для покращення збіжності результатів коефіцієнт проковзування задається з поступовим покроковим збільшенням (тобто вводиться функція Evolution).

Розроблена методика дає можливість:

– визначати мету моделювання;

- визначати області, які будуть моделюватися;
- розробляти і створювати розрахункову сітку;
- створювати нове завдання;
- створювати підзадачі для визначення оберненої задачі екструзії;
- встановлювати властивості матеріалів і граничних умов для задачі 3D оберненої екструзії;
- вибирати метод перебудови сітки;
- здійснювати перевірку отриманих результатів.

### Опис проблеми

Проблема полягає у моделюванні потоку неньютонівської рідини крізь тривимірні канали головки. Наприклад, розплав надходить до головки за об'ємною продуктивністю  $Q=10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  і виходить з неї у вигляді екструдованого профілю (рисунок Б.1).

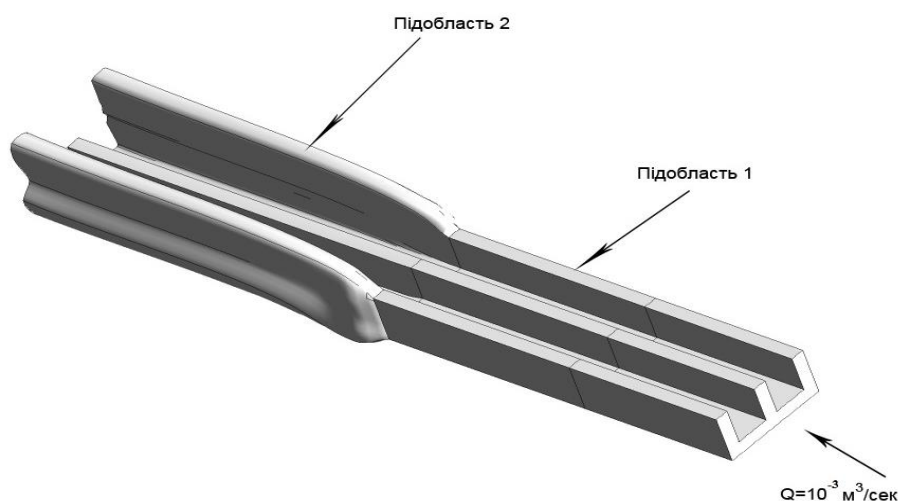


Рисунок Б.1 – Опис проблеми

**Етап 1.** На першому етапі постановки проблеми потрібно визначити мету та області для моделювання:

1.1. Визначитися з результатами, які потрібно отримати (наприклад, падіння тиску, масову витрату, форму екструдату, баланс потоків тощо);

1.2. Визначити перелік параметрів, які потрібно враховувати під час аналізу процесу (температура, сила тяжіння, теплота в'язкої дисипації, вільна поверхня тощо);

1.3. Зробити припущення, які спрощують процес розрахунку (наприклад, спрощення геометрії; застосування 2D, а не 3D моделювання; наявність симетрії);

1.4. Визначити потрібну ступінь точності (зокрема роздільну здатність сітки);

1.5. Визначитися з можливим часом розрахунку (застосування 2D, а не 3D моделювання, роздільна здатність сітки та ін.);

Під час визначення області для моделювання потрібно відповісти на такі питання:

1.6. Де закінчуються і починаються розрахункові області (чи достатня інформація про граничні умови цих областей; чи можуть типи граничних умов розміщувати цю інформацію; чи можна розширити область до точки, де існують відповідні дані)?

1.7. Чи може область бути спрощена, наближена до вигляду 2D або вісесиметричної задачі?

1.8. Де проходить поверхня розмежування області рідини від твердої частини?

1.9. Чи можливо спростити геометрію (видалення непотрібних властивостей, які ускладнюють сітку, наприклад, буртики, болти та ін.; використання симетрії або періодичності; чи обидва рішення і граничні умови симетричні / періодичні)?

1.10. Чи потрібно розбити модель так, щоб можливо було задати граничні умови або різні області?

Для створення системи аналізу використовуємо програмний пакет Ansys Polyflow перетягуванням у робочу область.

Етап 2. Наступним кроком є розроблення сітки або імпорт файлу сітки (\*.msh). Для розроблення сітки потрібно проаналізувати та врахувати такі моменти:

2.1. Визначення роздільної здатності сітки в кожній ділянці області (сітка має враховувати геометричні властивості області й врахувати співвідношення діючих параметрів, наприклад, швидкість, тиск, температуру;

2.2. Визначення найбільш доцільного виду сітки з урахуванням складності геометрії області (можливість застосування Quad/Hex вузлової сітки (чотирьохгранної для 2D або шестигранної для 3D задачі), Tri/Tet (трикутної для

2D або тетраедричної для 3D задачі) або гібридної сітки; визначення необхідності в використанні різнорідних сіток для різних областей).

2.3. З'ясування достатності ресурсу комп'ютера (кількість потрібних комірок/вузлів; кількість використовуваних фізичних моделей).

Використання Tri/Tet Quad/Hexвузлових сіток.

Tri/Tet або Quad/Hex вузлові сітки використовують:

- для орієнтованого потоку геометрії Quad/Hex вузлові сітки можуть забезпечити більш високу якість розв'язання задачі з меншою кількістю комірок або вузлів, ніж аналогічні Tri/Tet вузлові сітки;

- для складної геометрії при використанні Quad/Hex вузлової сітки відсутня її явна перевага, тоді можна спробувати створити Tri/Tet вузлову або гібридну сітку;

- гібридні сітки зазвичай поєднують Tri/Tet вузлові елементи з іншими елементами в окремих зонах області (наприклад можна використовувати елементи Prisma/Wedge (Призма/Клин) для розрахунку граничних шарів; такі сітки більш ефективні й точні, ніж Tri/Tetсітка).

Використання Багатозонних (Гібридних) вузлових сіток:

Багатозонні, або гібридні, сітки дозволяють використання різних методів побудови сітки в різних зонах, забезпечуючи при цьому високу точність, ефективний час розрахунку. Крім того, у разі відсутності збігу вузлів у всіх зонах, може бути використаний неузгоджений інтерфейс.

Використання різнорідних вузлових сіток для різних областей:

Різнорідні вузлові сітки доцільно використовувати в разі наявності області або її ділянок зі складною геометрією за умови побудови сітки для кожної ділянки з наступним їх об'єднанням.

Після завантаження сітки запускається POLYDATA (геометрія для задачі буде відображена у вікні Графічного Відображення).

Область задачі складається з двох підобластей, відображених на рисунку Б.2. Підобласті 1 і 2 представляють собою ділянки, де рідина обмежена стінками формуючого каналу, а також ділянку у вигляді екструдованого профілю, який перебуває в контакті з повітрям за умови можливості вільної деформації. Для



визначення профілю головки перебудова сітки застосовується для кожної підобласті. Основною метою розрахунку при цьому є обчислення геометрії головки для отримання бажаної форми екструдату. Нестисливість рідини й рівняння імпульсу враховуються програмним комплексом за замовчуванням.

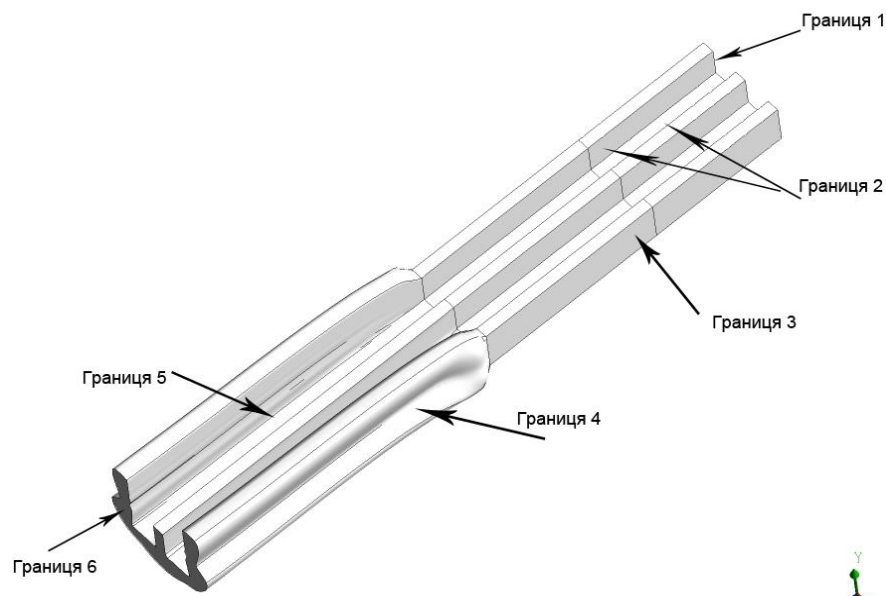


Рисунок Б.2 – Граничні умови для задачі

Приклад призначення границь для розв'язання поставленої задачі наведено на рисунку Б.2, а відповідні граничні умови визначено в такий спосіб:

- границя 1: вхідний потік, об'ємна продуктивність  $Q=10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- границя 2,3: умови проковзування уздовж стінки;
- границя 4: площина симетрії;
- границя 5: вільна поверхня;
- границя 6: вихід потоку.

**Етап 3.** Далі потрібно визначити модель для заданої проблеми та створити нове завдання, тобто модель оберненої екструзії. Після цього потрібно визначити підзадачі для ізотермічного розрахунку потоку.

Більшість нелінійних задач достатньо складно сходяться до номінального значення параметрів рішення, отже відповідна числова методика має забезпечити вирішення поставленого завдання. Зокрема особливої уваги потребують випадки:

- процес переробки в'язкопружних рідини, що характеризується високим числом Вайссенберга;
- завдання з вільними поверхнями або випадки, пов'язані із соекструзією рідин з істотно різною реологією;
- наявна ступенева рідина з дуже низьким ступеневим показником;
- наявні неізотермічні потоки, випадки з високою конвекцією.

Для вирішення таких завдань застосовується схема еволюції – додаткова числова схема, яка полегшує збіжність складних завдань потоку. Еволюція може бути застосована на граничні умови (витрата, температура, тиск, коефіцієнт проковзування та ін.) і властивості матеріалу (індекс розрідження під час зсуву, час релаксації, масова теплоємність та ін.).

Для даної проблеми схема еволюції застосована на коефіцієнт проковзування уздовж зовнішньої стінки формуючого каналу (границі 2, 3).

**Етап 4.** Після вибору моделі та схеми еволюції наступним кроком є створення підзадачі для потоку рідини. У нашому випадку потік ізотермічний, тому користуємося підзадачею *Differential viscoelastic isothermal flow problem* (Диференційний в'язкопружний ізотермічний потік) (рисунок Б.3).

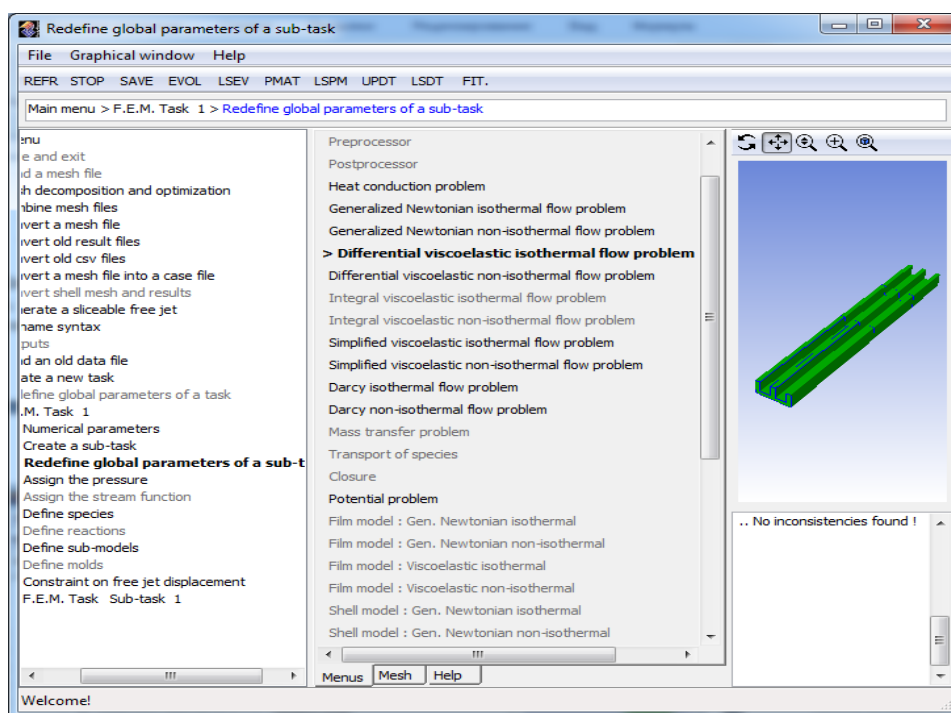


Рисунок Б.3 – Приклад вибору підзадачі для потоку рідини

**Етап 5.** Наступним кроком є визначення області, для якої застосовується підзадача.

Дане завдання включає вільну поверхню, так що область розділена на дві підобласті: одна для ділянки поблизу вільної поверхні (Підобласть 2), а інша для решти області (Підобласть 1). У цій задачі, вибрана підзадача (етап 4), за умовчанням, відноситься до двох підобластей.

**Етап 6.** Для введення матеріальних даних POLYDATA вказує, які властивості матеріалу можуть бути враховані у підзадачі. У даному випадку для специфікації доступні диференційні в'язкопружні моделі, інерційні члени і сила тяжіння. Для цього завдання визначають тільки в'язкопружну модель потоку полімеру (у пропонованій методиці модель представлена законом Фан-Тьен-Таннера).

**Етап 7.** На етапі визначення граничних умов задаються умови для кожної з границь області. Коли вибирається границя, її розташування виділено червоним кольором у графічному вікні.

Для застосування функції Evolution на обрану границю області у верхній частині меню POLYDATA необхідно активувати функцію EVOL.

У задачах оберненої екструзії для отримання заданого поперечного перерізу екструдату необхідно передбачити відповідну геометрію перерізу формуючого каналу головки. Визначаючи вихідний переріз з профілю вільної поверхні, для Polyflow вказується потрібна форма екструдату. При цьому остання секція вільної поверхні не буде змінена під час розрахунку.

Метою техніки перебудови сітки є переміщення внутрішніх вузлів відповідно з переміщенням граничних вузлів за рахунок руху вільної поверхні, оскільки частина сітки деформуються.

Обираємо по чергово області, для яких застосовуємо перебудову сітки, визначаємо метод і параметри перебудови.

Для 3D проблеми задачі екструзії, де виникають великі деформації екструдату, рекомендується техніка самоперебудови сітки (тільки для задач екструзії).

Для моделюванні процесу екструзії скінченно-елементна сітка може зазнавати великих деформацій. Меню перевірки спотворення сітки займається виявленням всіх можливих спотворених елементів. На даному кроці параметри приймаються за замовчуванням.

Для розв'язання оберненої задачі екструзії потрібно активувати Inverse Prediction (зворотне передвизначення). Методика зворотного передвизначення активована для розрахунку профілю для «постійного перерізу» області головки.

**Етап 8.** Після розрахунку Polyflow забезпечує можливість збереження результатів у різних форматах, тому потрібно вибрати формат, який найбільш придатний для наступної графічної постобробки програми.

Меню POLYDATA пропонує підтвердити обрані параметри, які мають бути збережені у файл результатів для постобробки.

Призначається система одиниць для моделювання.

Після визначення моделі в POLYDATA необхідно зберегти файл даних. На наступному етапі цей файл даних передається у Polyflow для подальшого обчислення.

Необхідно обрати Ассерт (підтвердити) і Continue (продовжити).

Це підтвердження імен для виводу графічних файлів за замовчуванням (cfx.res), які мають бути збережені для подальшого оброблення, і формат POLYDATA файлу результатів (res).

**Етап 9.** Наступним кроком є запуск POLYFLOW для розв'язання обраної моделі з використанням POLYDATA.

Перевіряється збіжність рішення у Listing File (файл списку):

- дискретизовані рівняння збереження вирішуються ітеративно до збіжності;
- збіжність буде досягнута, якщо несуттєві зміни у розв'язку від однієї ітерації до наступної;
- система забезпечує контроль помилки прогнозу;

– точність вирішення збіжності залежить від адекватності й точності фізичних моделей; роздільної здатності Сітки; числових помилок.

**Етап 10.** Для перевірки результатів моделювання POLYFLOW використовується CFD-Post.

Також можуть бути використані Visualization Tools (інструменти візуалізації), щоб відповісти на такі питання:

- яка загальна картина течії?
- чи є рециркуляційні зони?
- що таке вільна форма поверхні?
- чи вирішені ключові властивості течії?

Для перегляду файлу результатів, які збережені в POLYFLOW, потрібно запустити Results (результати). Приклад перегляду розв'язку задачі Диференціального в'язкопружного ізотермічного потоку наведено на рисунку Б.4.

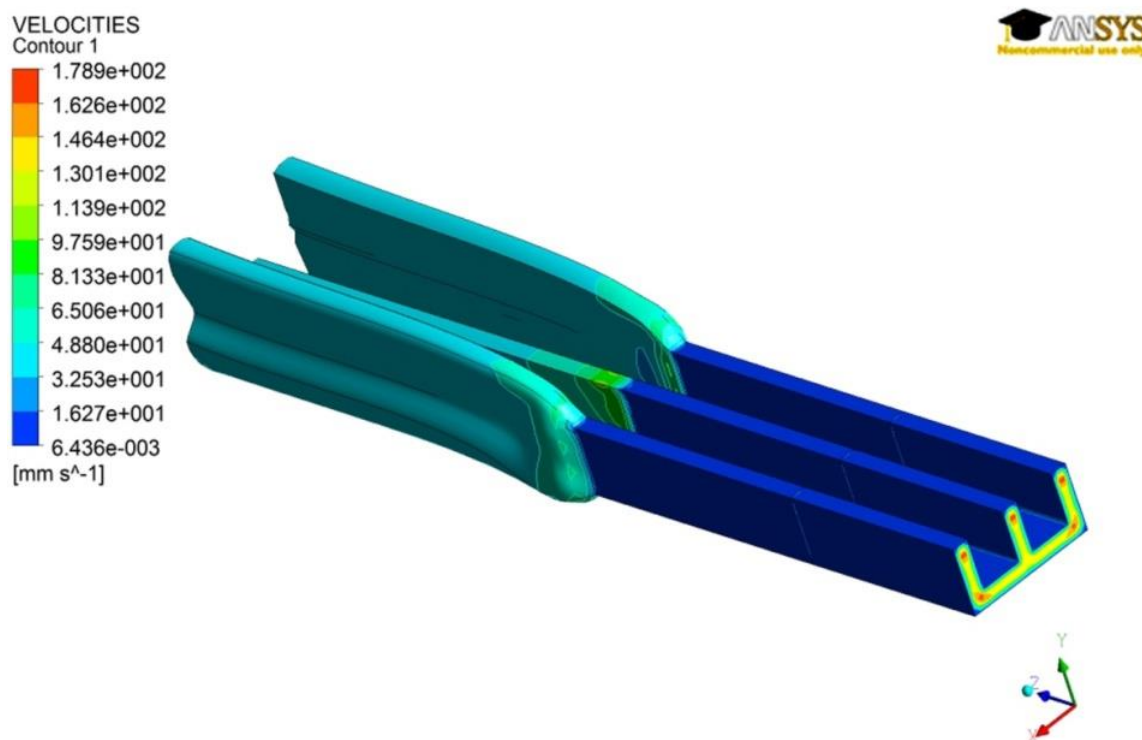


Рисунок Б.4 – Контури розподілу швидкості

З рисунку Б.4 видно, що, як і очікувалося, вздовж стінки головки швидкість потоку дорівнює нулю і на вході в головку маємо повністю розвинений профіль швидкості. На виході з формуючого каналу профіль швидкості змінюється для

потрібної стабілізації поперечного перерізу екструдату. Перехід між цими двома станами можна побачити на початковому перерізі екструдату.

Площини контролю профілів швидкості розташовані на вході у формуючий канал головки і на вихідній ділянці в площинах безпосередньо до і після виходу з головки (рисунки Б.5).

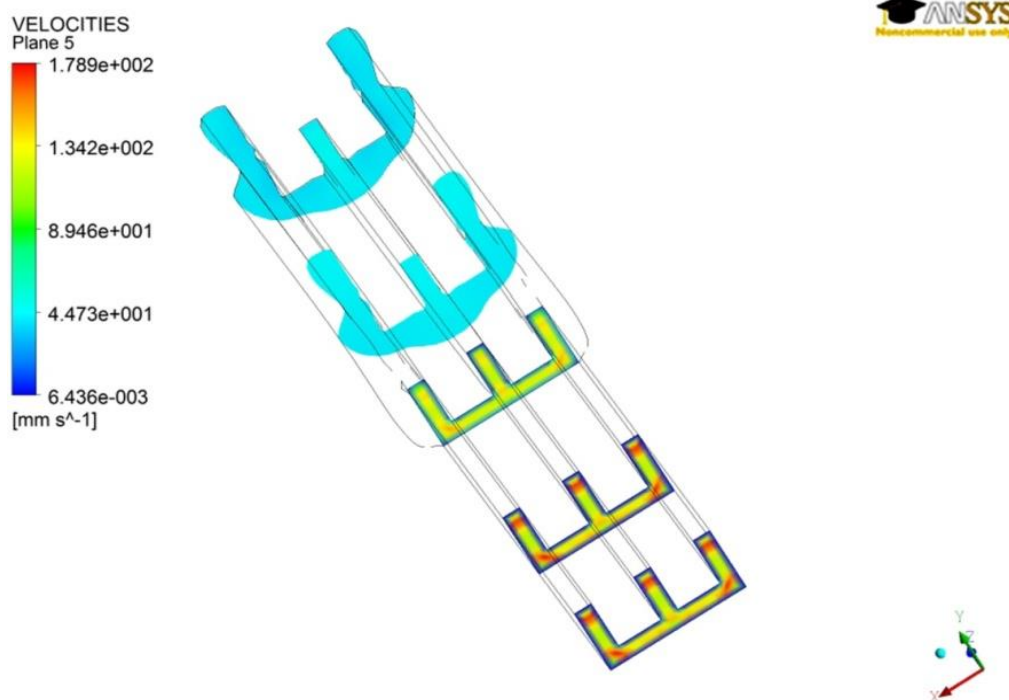


Рисунок Б.5 – Профілі швидкостей течії полімеру в контрольних перетинах формуючого каналу головки безпосередньо до і після виходу з головки

Порівняння профілю швидкості всередині головки з профілем швидкості на виході з головки (у кінці розрахункової області) дає змогу зробити такі висновки:

- у головці потік повністю розвинений;
- профіль швидкості екструдату двомірний далеко від виходу з головки, усі комірки в площині поперечного перерізу мають ту саму швидкість;
- відразу після виходу екструдату з головки існує перехідна зона, де профіль швидкості змінюється.

Після виходу екструдату з формуючого каналу обмежувальні стінки зникають, внаслідок чого відбувається перегрупування швидкостей та поперечна деформація екструдату.

На рисунку Б.6 представлено порівняння форми поперечного перерізу екструдату з головкою, що дає змогу порівнювати розмір і форму вхідного потоку з вихідним потоком без спотворень через перспективу.

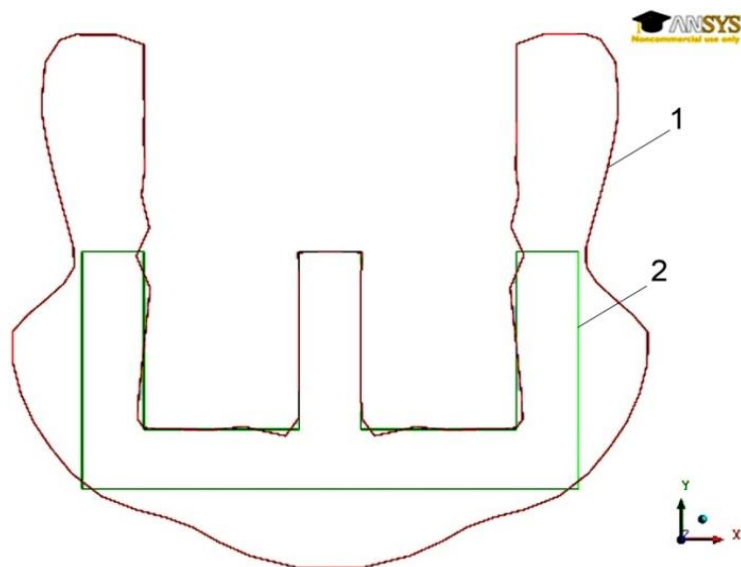


Рисунок Б.6 – Порівняння форми поперечного перерізу екструдату з головкою  
1 – форма профілю кінцевого виробу; 2 – вихідний переріз формуючого каналу

Деформація екструдату є результатом перегрупування швидкостей, що відбуваються на виході з головки. Частинки, що рухаються від високошвидкісних ділянок головки мають сповільнитися, у той час як частинки, що надходять з низько швидкісних ділянок, мають прискоритися. Потік рідини з високою швидкістю в головці збільшує поперечний переріз екструдату, а потік рідини з низькою швидкістю зменшує його поперечний переріз.

На рисунку Б.7 наведено конструкцію формуючого інструменту, що компенсує ці ефекти. Для формування такого профілю центральну частину поперечного перерізу формуючого каналу, де рідина достатньо легко рухається через початкову ділянку формуючого каналу головки, зменшують конструюванням нового формуючого інструменту. Оскільки сукупний вплив зміни поперечного перерізу формуючого каналу дуже важко передбачити, числове моделювання стає майже незамінним інструментом під час конструювання екструзійних головок.

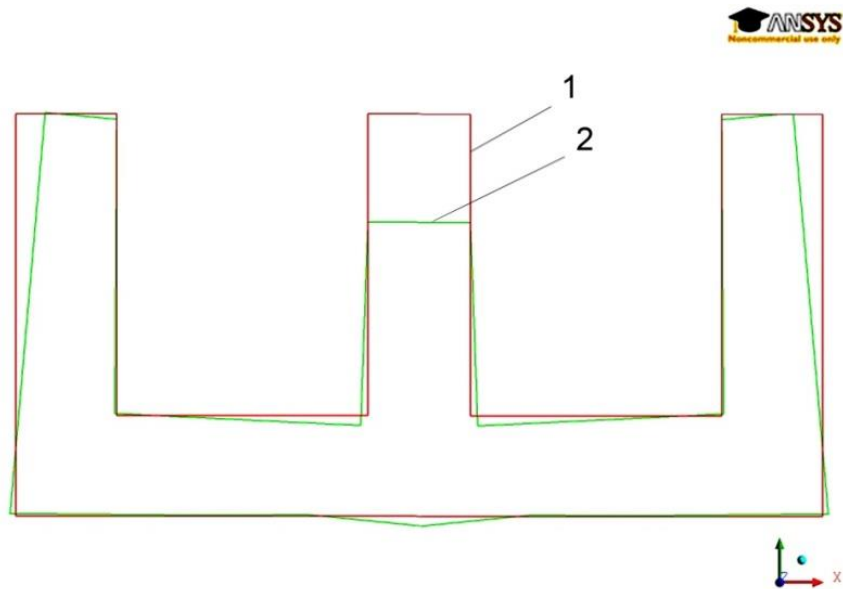


Рисунок Б.7 – Поперечні вихідні перерізи області формуючого каналу  
оптимізованої головки та екструдату

1 – задана цільова форма профілю; 2 – необхідна конфігурація вихідного перерізу  
формуючого каналу



**ДОДАТОК В**  
**ДОКУМЕНТИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ**  
**РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ**

## Товариство з обмеженою відповідальністю

Науково - виробниче підприємство  
"ІНК ОС"Р/р № 26005388781 в ПАТ «Райффайзен Банк Аваль» м.Чернігів, МФО  
380805,ЄДРПОУ 14233498 тел/факс (0462) 65-15-26№ 32 від 16.12 2016 р.

## АКТ

впровадження у промисловість результатів науково-технічних рішень,  
одержаних в рамках виконання інноваційних розробок, виконаних під  
керівництвом  
професорів кафедри ХПСМ ІХФ НТУУ «КПІ»  
Сівецького В.І. та Мікульонка І.О.,  
та апробації дисертаційних робіт Коваленко К.Г. та Сокольського О.Л.

Цей акт складений про те, що на виробничій базі ТОВ «НВП «Інкос» (м. Чернігів) в період з 11.01.2016р. по 31.05.2016р. здійснено дослідно-промислове впровадження технічних рекомендацій по конструктивному оформленню та уточненому параметричному розрахунку екструзійного формуючого полімерного устаткування.

На основі результатів комп'ютерного моделювання, проведеного науковцями ІХФ НТУУ «КПІ» в особі Коваленко К.Г. та Сокольського О.Л. було досліджено особливості процесів формування полімерного профільного погоняжного виробу складної конфігурації і визначено конструктивні та технологічні параметри з урахуванням нелінійної поведінки матеріалів, теплообміну та інших особливостей технологічних процесів.

Було встановлено, що використання розробленої методики і конструктивних пропозицій дозволяє вдосконалити технологічні параметри переробки та конструкції робочих органів формуючого обладнання, за яких забезпечується підвищена розмірна точність виробу. Це дало змогу забезпечити підвищення якості виробів з полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) і знизити ресурсо- та енергоємність процесів їх виробництва.

Вважаємо, що розроблені технічні рішення і методика розрахунку технологічних режимів формування виробів і конструктивних параметрів обладнання для переробки полімерних композицій можуть використовуватись також на інших полімерпереробних підприємствах.

Економічний ефект від впровадження технічних пропозицій з удосконалення конструктивного оформлення формуючого устаткування при виробництві одного типорозміру погоняжного полімерного виробу на ТОВ «НВП «Інкос» складає 243 (двісті сорок три) тис. грн.

Цей акт не є підставою для пред'явлення фінансових вимог.

Начальник виробництва  Боровик М.П.



Товариство з обмеженою відповідальністю  
" К Р О К - 9 5 "

Р/ р2600698003006 в « ПАТ МЕГАБАНК » м.Харьків, МФО351629  
ЄДРПОУ 14231275 тел/факс (0462 602406)

№15 від 22.03. 2017 р.

**АКТ**

**впровадження у промисловість результатів науково-технічних рішень,  
одержаних в рамках виконання інноваційних розробок, виконаних під  
керівництвом  
професора кафедри ХПСМ «КШ ім. Ігоря Сікорського»  
Сівецького В.І.  
та апробації дисертаційної роботи Коваленко К.Г.**

Цей акт складений про те, що на виробничій базі ТОВ «КРОК-95» (м. Чернігів) в період з 03.10.2016р. по 30.11.2016р. здійснено дослідно-промислове впровадження технічних рекомендацій по уточненому конструктивному оформленню екструзійного формуючого полімерного устаткування.

На основі розробленої методики комп'ютерного моделювання були визначені конструктивні та технологічні параметри процесу виробництва профільного полімерного виробу з урахуванням в'язкопружної поведінки полімеру за умов зниження ефектів спотворення конфігурації профілю.

Апробація розробленої методики комп'ютерного моделювання дозволила встановити, що уточнені конфігурація формуючого інструмента та технологічні параметри процесу формування з достатньою точністю забезпечують задану форму перерізу екструдованого профілю. Надані Коваленко К.Г. конструктивні пропозиції з удосконалення конструкції робочих органів формуючого обладнання дають змогу забезпечити розмірну точність виробу в межах заданих допусків та технічних умов.

Прогнозований економічний ефект від впровадження технічних пропозицій з удосконалення конструктивного оформлення формуючого устаткування при виробництві одного типорозміру профільного полімерного виробу на ТОВ «КРОК-95» складає 180 (сто вісімдесят) тис. грн.

Цей акт не є підставою для пред'явлення фінансових вимог.



Жежела В.П.