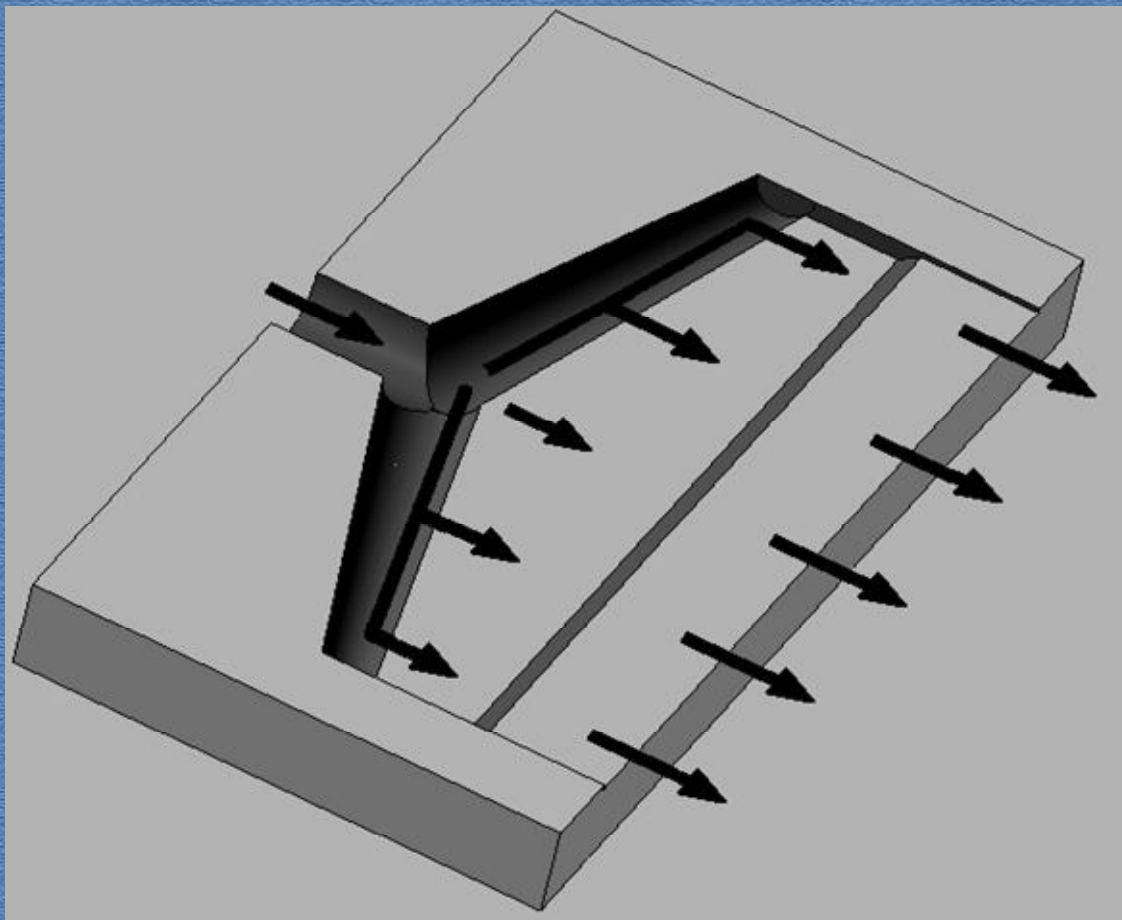


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЧЕРНІГІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**П.І.Чередніченко, В.Г.Бакалов, О.В.Бакалов**

**ПЛОСКОЩЕЛИННІ ГОЛОВКИ  
ДЛЯ ЛАМІНУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ  
КОНСТРУКЦІЯ, РОЗРАХУНОК, ПРОЕКТУВАННЯ**



ЧЕРНІГІВ 2009

УДК 678.056  
ББК 35.7:37.2  
Ч46

**Автори:**

Чередніченко П.І., доктор технічних наук, професор  
Бакалов В.Г., кандидат технічних наук, доцент  
Бакалов О.В., асистент

**Рецензенти:**

Піпа Б.Ф., заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор кафедри інженерної механіки Київського національного університету технології і дизайну  
Ступа В.І., заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор Чернігівського державного технологічного університету

*Рекомендовано до друку Вченою радою Чернігівського державного технологічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол №9 від 26.10. 2009 р.)*

**Чередніченко П.І., Бакалов В.Г., Бакалов О.В.**

Ч46 Плоскощілинні головки для ламінування матеріалів. Конструкція, розрахунок і проектування: Монографія. – Чернігів: ЧДТУ, 2009. – 141 с.: іл.  
ISBN 978-966-7496-30-2

Наводиться огляд та аналіз відомостей о сутності та призначенні процесу ламінуванні. Дається огляд і аналіз існуючих конструкцій плоскощілинних головок, а також огляд і аналіз існуючих методик їх розрахунку і проектування.

Наводиться сучасна класифікація плоскощілинних головок для ламінуванню матеріалів і виробництву тонких полімерних плівок.

Представлена математична модель руху полімеру у внутрішніх каналах плоскощілинної головки, процесу витягування плівки між головкою та валком. Математична модель дозволяє теоретично дослідити вплив технологічних параметрів процесу формування плівки, її витягування, а також конструктивних параметрів внутрішніх каналів плоскощілинної головки на якість плівки.

Наведена інженерна науково-обґрунтована методика проектування плоскощілинних головок.

Наукове видання призначено для наукових співробітників, аспірантів, викладачів, магістрів, студентів, спеціалістів в галузі розробки технологічних процесів і обладнання легкої промисловості.

УДК 678.056  
ББК 35.7:37.2

ISBN 978-966-7496-30-2

© П.І.Чередніченко, В.Г.Бакалов, О.В.Бакалов, 2009

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	5
<b>РОЗДІЛ 1. ПРОЦЕС І ПРИСТРОЇ ДЛЯ ЛАМІНУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ</b> .....	7
1.1. Екструзійне ламінування .....	7
1.1.1. Аналіз процесу екструзійного ламінування .....	7
1.1.2. Методи виміру товщини плівки .....	10
1.2. Плоскощілинні екструзійні головки .....	14
1.2.1. Класифікація головок для отримання полімерних плівок .....	14
1.2.2. Конструкції плоскощілинних головок .....	17
1.2.3. Багатоканальні плоскощілинні головки .....	28
1.2.4. Викривлення поверхні розділу шарів .....	30
1.2.5. Фільтруючі пристрої екструзійних головок .....	33
1.3. Огляд та аналіз теоретичних методів розрахунку плоскощілинних головок .....	38
<b>РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ В'ЯЗКОЇ РІДИНИ В ФОРМУЮЧИХ КАНАЛАХ ПЛОСКОЩІЛИННОЇ ГОЛОВКИ</b> .....	51
2.1. Розробка математичної моделі руху полімеру в плоскощілинній головці .....	51
2.2. Дослідження залежності реологічних характеристик розплаву полімеру від його температури .....	55
2.3. Розробка математичної моделі витягування плівки між плоскощілинною головкою та валком .....	60
2.4. Алгоритм і програма гідравлічного розрахунку плоскощілинної головки .....	66
2.5. Формування цільової функції оптимізації та особливості вибору методу оптимізації .....	76
2.6. Алгоритм і програма оптимізації геометричних розмірів внутрішніх каналів плоскощілинної головки .....	77
<b>РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА І ПРОМИСЛОВА УСТАНОВКИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕЧІЇ ПОЛІМЕРНОЇ РІДИНИ В ПЛОСКОЩІЛИННІЙ ГОЛОВЦІ</b> .....	78
3.1. Експериментальна установка та методика проведення досліджень течії полімерної рідини .....	78
3.1.1. Опис експериментального стенда для дослідження процесу течії рідини в формуючих каналах плоскощілинної головки .....	78
3.1.2. Вибір імітаційної рідини та опис установки для визначення її в'язкості .....	81
3.1.3. Методика визначення реологічних характеристик імітаційної рідини .....	81
3.1.4. Методика вимірювання витрат рідини за шириною плоскощілинної головки .....	82
3.2. Промислова установка ламінування і методика проведення досліджень товщини та ширини полімерного покриття .....	84
3.2.1. Опис промислової установки ламінування .....	84
3.2.2. Методика експериментальних досліджень товщини полімерного покриття промислової плоскощілинної головки .....	87
3.2.3. Методика та установка для дослідження коефіцієнта тертя між папером та полімерним покриттям .....	88

3.2.4. Методика експериментальних досліджень ширини полімерного покриття, отриманого на промисловій установці .....	89
<b>РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕЧІЇ ПОЛІМЕРНОЇ РІДИНИ В ПЛОСКОЩІЛИННІЙ ГОЛОВЦІ .....</b>	<b>91</b>
4.1. Проведення досліджень на експериментальній установці .....	91
4.1.1. Дослідження реологічних характеристик імітаційної рідини .....	91
4.1.2. Дослідження витрат імітаційної рідини за шириною плоскощільної головки .....	93
4.2. Проведення досліджень на промисловій установці .....	199
4.2.1. Планування експериментальних досліджень для виявлення впливу конструктивних параметрів головок та технологічних параметрів виробництва на показники покриття .....	99
4.2.2. Результати дослідження впливу конструктивних параметрів головок та технологічних параметрів виробництва на товщину плівкового покриття .....	100
4.2.3. Результати дослідження впливу конструктивних та технологічних параметрів виробництва на рівномірність товщини плівкового покриття .....	103
4.2.4. Аналіз результатів експериментальних досліджень на промисловій плоскощільній головці .....	104
4.3. Дослідження коефіцієнта тертя між папером та полімерним покриттям .....	105
4.4. Дослідження залежності ширини витягнутої плівки від довжини зони витягування .....	105
<b>РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК КОНСТРУКЦІЇ ПРОМИСЛОВОЇ ПЛОСКОЩІЛИННОЇ ГОЛОВКИ ДЛЯ ЛАМІНУВАННЯ ПАПЕРУ .....</b>	<b>107</b>
5.1. Інженерний метод проектування плоскощільних головок .....	107
5.1.1. Розрахунок розмірів формуючих каналів плоскощільної головки .....	108
5.1.2. Вибір матеріалу плоскощільної головки .....	111
5.1.3. Обґрунтування вибору шорсткості .....	111
5.1.4. Розрахунок на міцність плоскощільної головки .....	111
5.1.5. Розрахунок плоскощільної головки на жорсткість .....	112
5.1.6. Розрахунок потужності електронагрівників .....	114
5.2. Напрями подальшого вдосконалення плоскощільних головок .....	114
<b>ДОДАТКИ А. Графіки залежності напруження від швидкості зсуву для різних поліетиленів .....</b>	<b>116</b>
<b>ДОДАТКИ Б. Просторові графіки залежності напруження зсуву від швидкості зсуву та температури .....</b>	<b>120</b>
<b>ДОДАТКИ В. Принципова схема руху полімеру в плоскощільній головці згідно розрахунковій схеми .....</b>	<b>126</b>
<b>ДОДАТКИ Д. Принципова блок-схема розрахунку товщини плівки при ламінуванні .....</b>	<b>128</b>
<b>ДОДАТКИ Е. Принципова блок-схема розрахунку оптимальних геометричних розмірів плоскощільної головки для ламінування матеріалу .....</b>	<b>129</b>
<b>Додаток Ж. Фотографії плівки при її поздовжньому витягуванні на виході із головки .....</b>	<b>130</b>
<b>Додаток З. Фотографії течії рідини скрізь дріт .....</b>	<b>131</b>
<b>Додаток И. Фотографія формуючих каналів промислової головки .....</b>	<b>132</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>133</b>

## ВСТУП

В світі спостерігається швидке зростання виробництва в галузі полімерних матеріалів, збільшується зацікавленість споживачів у полімерних упаковках, будівельних матеріалах (лінолеум, шпалери), оскільки полімерне покриття захищає від вологи, є зносостійким та довговічним. Разом з тим, комплекс вимог до полімерних покриттів, особливо в зв'язку з їхнім зростаючим використанням став настільки широкий і різноманітний, що не тільки практично, але навіть теоретично неможливо створити моноплівковий матеріал, який задовольняв би таким вимогам. У зв'язку з цим, очевидна доцільність розвитку виробництва і застосування багатошарових плівкових матеріалів із заданими регульованими властивостями, що складаються з одних полімерних компонентів або мають у своїй структурі і неполімерні шари [1-12]. Все більшу зацікавленість викликає процес ламінування за допомогою плоскощілинної головки, яка дозволяє отримувати розплав у вигляді плівки з подальшим нанесенням її на будь-яку неполімерну основу: папір, картон, тканину і т.і. [13-27]. Розвиток сучасних пакувальних матеріалів вказує на тенденції зменшення товщини полімерного покриття та на використання ширших плоскощілинних головок [2,4,7,9,14,25-36].

На сучасному етапі розвитку виробництва ламінованих матеріалів спостерігається тенденція до зменшення товщини плівкового покриття та збільшення його ширини, що веде до зростання нерівномірності товщини плівки і утворення в ній розривів [1,7,9,14,31]. Це наслідок неоптимальних геометричних розмірів внутрішніх каналів плоскощілинних головок для малої товщини плівки [7,14,36]. Для визначення оптимальних розмірів потрібно проведення або експериментальних досліджень на промислових установках, що потребує великих матеріальних витрат для виготовлення плоскощілинних головок різних розмірів, або інженерних розрахунків геометричних розмірів внутрішніх каналів. Інженерні методи розрахунку здебільшого базуються на теорії проектування плоскощілинних головок, в розробку якої значний внесок зробили наступні вчені: Рябинін Д. Д., Ким В.С., Каплун Я. Б., Торнер Р.В., Гуль В.Е., Яхно О.М., Тадмор З., Гогос К., Жданов Ю. А. та ін.

Слід зауважити, що на даному етапі розвитку проектування та розробки плоскощілинних головок не існує науково обґрунтованої інженерної методики розрахунку оптимальних геометричних розмірів їх внутрішніх каналів. Враховуючи це, з нашої точки зору, важливу роль в проектуванні та дослідженні поведінки розплаву полімеру в формуючих каналах плоскощілинної головки будуть відігравати математичні методи моделювання.

На думку провідних спеціалістів [1,2,7,14,17,19,22,23,37], одним з критеріїв якості полімерної плівки є її рівнотовщинність. На даному етапі

розвитку до цього критерію пред'являються суворі вимоги. Прийнятним вважається його коливання у межах 5% від значення товщини плівки [1-8]. Для порівняння, у 80-і роки допустимий відсоток різнотовщинності дорівнював 20%. При аналізі публікацій виявлено, що виробники плоскощілинних головок декларують рівень різнотовщинності в межах 3-5 % [1-8]. Спеціалісти мають єдину думку, що конструкційні особливості вузла екструзії та технологічні показники виробництва мають вирішальну роль у досягненні оптимального результату щодо різнотовщинності плівки.

Автори багатьох публікацій [1-9,12,13,38-47] вважають, що ширина покриття та рівномірність його товщини визначаються шириною плоскощілинної головки, крізь яку тече розплав полімеру, та точністю її виготовлення.

На сьогодні є ряд робіт, які присвячені проектуванню екструзійних плоскощілинних головок. Найбільш відомі серед них – роботи Рябиніна Д. Д. [14,30,36,48,49], в яких досліджується течія розплаву поліетилену в круглих та плоскощілинних каналах з метою розрахунку та регулювання опору головки, а також роботи Кима В.С. та Каплуна Я. Б. [1,50,51], в яких досліджується течія ньютонівських рідин в трикутній плоскощілинній головці.

Слід зауважити, що дослідження, які проводились Рябиніним Д. Д. і Каплуном Я. Б. не враховують особливостей геометрії плоскощілинної головки, реологічних властивостей розплаву полімеру, а також його температуру.

На думку Сокольського О. Л. [12], розрахунок плоскощілинної головки для переробки термостабільних розплавів полімерорганічних композицій проводиться за допомогою моделювання методом скінченних елементів. Але, на нашу думку, стиківка таких елементів як циліндр та щілина з достатньою точністю неможлива, а формуючі канали такої форми є пріоритетними в плоскощілинних головках.

Виходячи з вищенаведеного, актуальним є розробка науково обґрунтованого методу розрахунку геометричних розмірів плоскощілинної головки і створення на його основі нових пристроїв, які дозволяють значно підвищити якість полімерних плівок, які виробляються. На рішення вказаних задач і направлена ця монографія.

## РОЗДІЛ 1 ПРОЦЕС І ПРИСТРОЇ ДЛЯ ЛАМІНУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ

### 1.1. Екструзійне ламінування

#### 1.1.1. Аналіз процесу екструзійного ламінування

Висока ефективність застосування практично у всіх галузях народного господарства, полімерних плівкових матеріалів та постійно зростаючий попит на них визначили високі темпи розвитку їх виробництва.

Виробництво тари й пакування є найбільшою областю споживання плівкових матеріалів (ПМ) і комбінованих плівкових матеріалів (КПМ) [1-9,19,36-41,56,57].

Пакувальні матеріали виконують, головним чином, дві функції: захист товару від впливу шкідливих факторів навколишнього середовища (гази, жири, випромінювання, температура, пил, мікроорганізми й ін.) і забезпечення зберігання компонентів продукту, що упаковується [1-7,19,22,24,29,33,36].

Переваги полімерів перед традиційними пакувальними матеріалами забезпечуються їх малою щільністю, можливістю виготовлення пакувань із заданими властивостями, різноманіттям форм, економічністю.

Технологічний процес одержання ПМ методом екструзії складається з таких стадій [1-5,12,16,17,35,37-40,56-60]:

1. Розплавлення полімерів в екструдері.
2. Формування полімерної плівки через екструзійні головки (плоскощілинного типу).
3. Витягування та охолодження полімерної плівки за допомогою охолоджувальних валків.
4. Приймання, різання і намотування полімерної плівки.

Головними перевагами методу екструзії є: одержання ПМ з розплаву полімеру; можливість регулювання товщини шару в широких межах; економічна ефективність (вартість ПМ, виготовлених за допомогою екструзії, у середньому на 20% нижче, ніж вартість матеріалів ламінованих іншим способом) [1-5,7-9,12].

Існують кільцеві екструзійні головки, які формують полімерний рукав і плоскощілинні головки, які формують плоску плівку. До недоліків кільцевих головок в порівнянні з плоскощілинними варто віднести: меншу продуктивність процесу; труднощі регулювання товщини і ширини ПМ і внаслідок цього — підвищене складкоутворення; гірші оптичні властивості плівок з полімерів; потреба у великих виробничих площах, більш низькі показники механічних властивостей плівок; обмеження в одержанні широких плівок [1-3,7,9,12].

Перевагами плоскощілинних головок перед кільцевими є: велика продуктивність процесу внаслідок інтенсивності контактного охолодження; низька різнотовщинність по ширині ПМ; можливість одержання ПМ з більшим діапазоном товщин; кращі оптичні властивості; відсутність небезпеки

склеювання матеріалу внаслідок інтенсивного охолодження; можливість нанесення плівкового матеріалу на різні підкладки безпосередньо після його одержання без додаткового нагріву; економія капітальних витрат.

Найважливішою проблемою у виробництві ПМ способом екструзії є конструкція головок. При виборі конструкції головки необхідно враховувати:

- необхідність ретельного контролю товщини шару, щоб уникнути різнотовщинності [1,2,4,7-9,12,26,27,33,55];

- підвищену чутливість деяких полімерів до деструкції при високих температурах (наприклад, полівінілхлориду, співполімери акрилонітрилу та ін.) [1,5,15,36-41,61-73];

На рівномірність товщини полімерного покриття впливають:

- геометричні розміри розподільчих каналів в екструзійній головці;
- технологічні параметри проведення процесу, при яких усі елементарні струмені розплаву по ширині формуючої головки повинні отримати однакове падіння тиску.

До КПМ відносяться вироби, у яких полімер наноситься на різні основи: текстильні, паперові, полімерні та ін. Основним пристроєм, який використовується при виробництві цих матеріалів, є ламінатор [1,10,11,17,20], зображений на рис. 1.1.

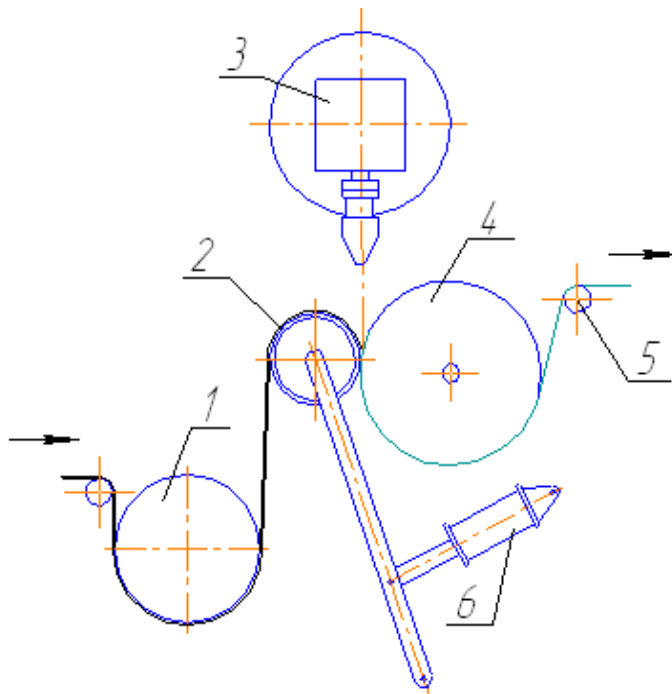


Рис. 1.1. Промисловий ламінатор:

1 – транспортуючий валок; 2 – притискний валок; 3 – головка; 4 – охолоджуючий валок; 5 – перехідний ролик; 6 – гідроциліндр.

Він складається з притискного погумованого валка 2, що пресує та термостатованого охолоджувального валка 4. Валок 2 притискається до валка 4 пневмо- або гідроциліндром 6. Основа паперу через валок 1, що обігривається, надходить у проміжок між притискним і охолоджуючим валком, де дублюється розплавом, що надходить у вигляді плівки з плоскощільної головки 3, і подається через ролик 5 на обрізання кромки і намотування. Спосіб



екструзійного ламінування універсальний і може бути використаний для різних субстратів та плівкоутворювальних полімерів. Він набув найбільшого застосування при покритті поліетиленом низької густини (ПЕНГ) паперу, картону, алюмінієвої фольги, а також для виготовлення ПМ на основі целофану і поліетилентерефталату.

Нанесення покриття з ПЕНГ способом екструзійного ламінування на різні субстрати має ряд особливостей:

- ПЕНГ – це неполярний полімер, який не утворює зв'язків з полярними поверхнями [66,71-77];

- термоокислення розплаву ПЕНГ на виході з головки сприяє утворенню полярних груп на поверхні покриття і поліпшує його адгезію до субстрату [71-79];

- при малих швидкостях технологічного процесу, підвищеній температурі та великій відстані головки від ламінатора, термоокислювальна деструкція призводить до зшивання поліетилену і, тим самим, до зменшення адгезії та зменшення здатності полімерного покриття до зварювання [4-7,80];

- попередня обробка поверхні субстрату коронним розрядом, озоном і т.п. збільшує міжшарову адгезійну міцність, що дозволяє знизити температуру екструзії і зменшити відстань від головки екструдера до валків ламінатора [1-9].

Слід мати на увазі, що адгезія, як правило, обумовлена, по-перше, дифузійними і, по-друге, мікрореологічними процесами, що протікають на межі розділу між полімером та основою. Адгезійні з'єднання, утворені за рахунок дифузійних процесів, як правило, мають досить високу адгезійну міцність.

Мікрореологічний механізм формування адгезійного зв'язку між поліетиленовим покриттям і плівками типу целофану і поліетилентерафталату визначається станом поверхні цих плівок, їх надмолекулярною структурою, а також кількістю мікрodefektів на їх поверхні.

Оптимальна відстань між формуючою щільною головкою та місцем доторкання притискного і охолоджуючого валків складає 70 мм [1-4]. При більшому значенні розміру відстані відбувається інтенсифікація окисних процесів, що сприяє підвищенню адгезії, але, з іншого боку, спостерігається охолодження розплаву поліетилену. Слід зауважити, що це негативно позначається на адгезійній міцності. Крім того, внаслідок утворення великої «шийки» отриманий матеріал має підвищену схильність до скручування. Якщо розмір відстані менший, ніж 70 мм, має місце незначне охолодження розплаву, реалізується недостатній ступінь окислювання поліетилену.

Як правило, ширина покриття менше ширини матеріалу (приблизно на 25 мм з кожної сторони), щоб виключити прилипання покриття до притискного валка ламінатора [3-6]. На адгезійну міцність впливає також температура полімеру в процесі його з'єднання із субстратом. Вона залежить від відстані лінії торкання розплаву з матеріалом, який ламінується, до плоскощільної головки екструдера, температури і входного тиску полімеру в головці та перехідних зонах, а також від продуктивності агрегату. Для зменшення коливань температури на лінії торкання необхідно забезпечити рівномірний рух розплаву в головці і відсутність у ній застійних зон. Також,

конструкція каналів головки повинна забезпечити рівність опору на різних траєкторіях руху полімеру для забезпечення рівномірності товщини плівки. Для запобігання утворення застійних зон торці колекторних каналів повинні бути округленими. Тому, перевагу слід віддавати трикутним екструзійним головкам типу «риб'ячий хвіст».

Слід зазначити, що при використанні плоскощілинної головки, при виробництві ПМ або КПМ існує проблема нерівномірності товщини покриття як у поздовжньому, так і в поперечному напрямку, що викликано нерівномірним розподілом розплаву в каналах плоскощілинної головки. Ця проблема особливо суттєва при малій товщині і значній ширині плівкового матеріалу, що обмежує їх виробництво. У зв'язку з вищевикладеним, різнотовщинність полімерного покриття безпосередньо пов'язана з конструкцією плоскощілинної головки. Тому варто провести аналіз конструкцій головок для визначення конструкції, що забезпечувала б найкраще вирівнювання розплаву по ширині головки.

Особливі вимоги до нерівномірності товщини покриття викликані тим, що згідно з технічними умовами [81] мінімальна товщина покриття повинна бути не менше 19 мкм. Це обумовлено критерієм стирання покриття. Внаслідок чого, із збільшенням різнотовщинності зростають незаплановані витрати полімерного матеріалу для забезпечення мінімальної товщини покриття. Тому у технічних умовах вказуються межа нерівномірності товщини покриття, яка дорівнює 3%. Слід відмітити, що на більшості існуючих виробництв нерівномірність товщини покриття досягає 20 %.

### **1.1.2. Методи виміру товщини плівки**

Існує декілька методів виміру товщини екструдату [16], які можна грубо розділити на два основних типи: контактні й безконтактні. Контактні методи зазвичай дешеві і прості по конструкції, проте дія датчика може понизити якість поверхні екструдату. В разі високих вимог до якості поверхні доцільним виявляється використання безконтактних методів.

При контактному методі найчастіше використовують мікрометричний штангенциркуль. Проте цей інструмент придатний лише для грубих вимірів, які роблять вручну. Якщо коливання товщини екструдату невеликі, то вздовж нього можна пересувати підпружинене колесо. Такий колісний датчик використовують для спостережень зміни товщини екструдату в часі у напрямі екструзії. При використанні точного пристрою для перпендикулярного позиціонування датчика можна контролювати рівномірність товщини екструдату і в напрямі, перпендикулярному напрямку екструзії. Для зниження погрешності при проведенні вимірів протилежна сторона екструдату повинна мати надійну, жорстку опору [16].

Мікрометр і колісний датчик є простими механічними пристроями, проте у багатьох випадках потрібно забезпечити запис вимірів товщини екструдату в безперервному режимі. В цьому випадку використовується LVDT-датчик (Linear Variable Differential Transformer), який видає електричний сигнал, пропорційний товщині екструдату, придатний для передачі на записуючий пристрій. Таким

датчиком є електричний трансформатор, обидві обмотки якого знаходяться на одному каркасі. Як показав Раувендааль К. [16], коливання товщини екструдату викликають коливання магнітного сердечника, який вставлений у трансформатор, що у свою чергу змінює взаємну індуктивність обмоток (рис. 1.2).

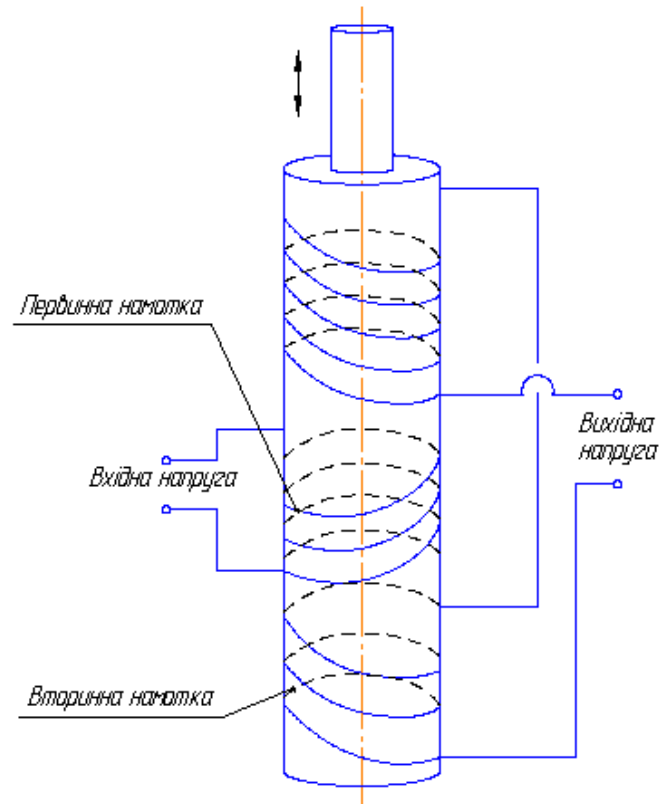


Рис. 1.2. LVTD датчик

Таким чином, переміщення сердечника викликає появу змінного струму, який залежить як від величини переміщення сердечника, так і від напрямку цього переміщення. LVDT-датчики мають високу точність: вони дозволяють вимірювати товщину з погрішністю 1 мкм. Проте при їх використанні слід враховувати вплив температури на точність виміру, оскільки екструдат часто має підвищену і непостійну температуру.

Інший більш-менш безконтактний метод виміру товщини заснований на використанні пневматичного датчика [16]. Датчик складається із сопла, встановленого безпосередньо над вимірюваною поверхнею. Повітря під постійним тиском проходить через звуження і виходить через сопло (рис. 1.3).

Тиск віддачі в соплі  $P$  залежить від зазору між вимірюваною поверхнею і виходом сопла. При збільшенні товщини екструдату зазор зменшується, обмежуючи потік повітря, яке виходить, що приводить до збільшення тиску  $P$ . Датчик тиску дозволяє вимірювати зміни тиску в порівнянні з початковою величиною. У правильно спроектованому датчику зміна тиску пропорційна зміні товщини, проте діапазон вимірів складає близько 100 мкм. Чутливість пристрою досить висока і складає 0,0001 мм при діапазоні виміру 0-2 мм. Крім того, датчик вельми витривалий і дозволяє забезпечити високу точність при

регулярному калібруванні [16]. Датчик може бути включений в лінію автоматичного контролю, яка здійснює безперервну реєстрацію товщини екструдату і подає сигнал, якщо значення товщини виходить за межі допустимого значення.

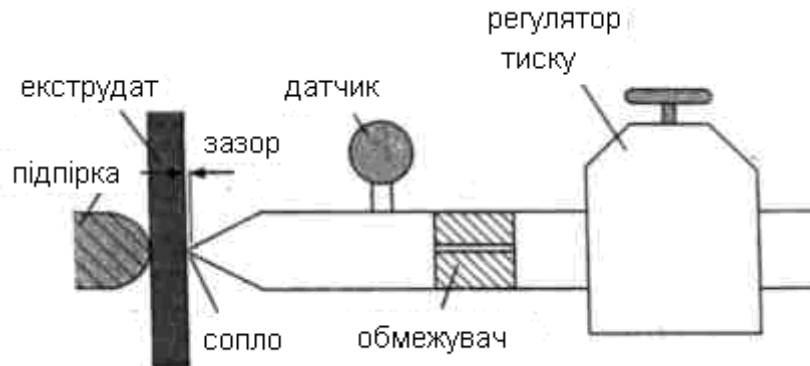


Рис. 1.3. Пневматичний вимірювач товщини

Ще один метод контактного визначення товщини екструдату полягає у вимірі ємкості конденсатора, діелектриком у якому служить екструдат [16]. У даному методі використовують дві металеві пластини, розташовані з обох сторін екструдату. Зміну товщини екструдату викликає зміна ємкості конденсатора. Таким чином, вимір ємкості забезпечує визначення товщини. Основна проблема цього методу — складність забезпечення щільного контакту металевих обкладань з поверхнею екструдату, особливо істотно цей момент виявляється при необхідності безперервного контролю товщини.

Товщина полімерної плівки також вимірюється ультразвуковим датчиком [16]. У цьому методі необхідний генератор змінного сигналу (частота близько 15 кГц) і випромінювач, здатний виробляти звук високої частоти під дією змінного струму.

Існує два типи УЗ-перетворювачів (випромінювачів): магнітострикційний і п'єзоелектричний. Магнітострикційний випромінювач складається з металевого стержня, один кінець якого фіксований, а другою приєднаний до діафрагми. На стержень надітий соленоїд, на який подається сигнал від осцилятора. Соленоїд створює змінне магнітне поле, що викликає періодичну зміну довжини стержня, який, у свою чергу, викликає коливання мембрани. В результаті мембрана випромінює УЗ-хвилі.

При вимірі товщини датчик розташовується безпосередньо у поверхні екструдату. Механічні коливання проходять через матеріал і відбиваються від його протилежної поверхні, повертаючись до випромінювача. Час повернення коливань безпосередньо залежить від товщини матеріалу. При виникненні резонансу різко змінюється опір випромінювача, тобто відбувається зменшення потужності, яка відбирається датчиком від осцилятора, що виражається в зміні струму в ланцюзі осцилятора. Таким чином, вимір товщини заснований на вимірі резонансної частоти [16]. Природно, для проведення вимірів необхідно забезпечити надійний контакт випромінювача з поверхнею матеріалу, що, як і в разі ємкісного методу виміру товщини, ускладнює проведення вимірів в

безперервному режимі.

Встановлено, що УЗ-виміри можуть бути корисними при здобутті характеристик розплаву полімеру. Час проходження ультразвукових хвиль залежить від пружності матеріалу, тиску, температури, хімічного складу і структури. Виявлено [16], що час проходження УЗ-сигналу чутливий до стану розплаву полімеру, особливо до його гомогенності. У багатьох випадках використання УЗ-датчика для контролю стану розплаву полімеру виявляється більш інформативним для забезпечення роботи контрольних систем, ніж вимір температури.

При обговоренні контактних методів виміру товщини слід також згадати про ще один істотний недолік цієї групи методів. Контактним вимірником неможливо контролювати товщину замкнутих виробів (труб і рукавів) у безперервному режимі. Тому на автоматизованих лініях екструзій велику популярність набули безконтактні методи виміру товщини. Більшість таких методів заснована на вимірі поглинання матеріалом різних випромінювань. При цьому використовують як різного вигляду радіоактивні випромінювання  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -промені, так і більш м'яке ІК-випромінювання [16]. У цьому методі з одного боку екструдату розміщується джерело електромагнітного випромінювання або частинок, а на іншій стороні приймач; таким чином, реєструють поглинання випромінювання екструдатом, величина якого залежить від щільності і товщини екструдату. При постійній щільності сигнал, що знімається з датчика, прямо пропорційний товщині виробу.

Поглинання випромінювання може бути описане таким рівнянням [16]:

$$I(x) = I(0) \exp(-\mu x),$$

де  $I(x)$  — інтенсивність випромінювання, що пройшло через матеріал товщиною  $x$  з коефіцієнтом поглинання  $\mu$ ;  $I(0)$  — рівень інтенсивності при відсутності екструдату.

Після ретельного калібрування прилад може вимірювати товщину з дуже високою точністю (до 0,2 мкм). При цьому виміри можуть проводитися з досить великою швидкістю. Такі переваги зумовили практично повсюдне вживання радіаційного вимірника товщина на автоматизованих екструзійних лініях [16].

Датчики на ядерному випромінюванні призначені для виміру товщини від 10 мкм до 3 мм [16]. Деякі з цих приладів поставляються із вбудованим термометром для виміру температури повітря між випромінювачем і сенсором, що робиться для введення поправки на поглинання випромінювання в повітрі. Основним недоліком приладів, що використовують радіоактивне випромінювання, є їх небезпека для здоров'я людини. Слід пред'являти дуже високі вимоги до того, щоб конструкція пристрою забезпечувала відсутність витоків радіоактивного випромінювання назовні. Для виміру екструдатів великої товщини потрібні досить потужні джерела радіації, оскільки ослаблення випромінювання в речовині підкоряється експоненціальному закону. Таким чином, для відносно товстих і плоских виробів більш відповідними можуть виявитися датчики типу LVDT. Для виміру товщини чистих і тонких плівкових

екструдатів можуть підійти ІК-датчики – діапазон виміру такого пристрою лежить між 2 та 200 мкм.

При вимірі товщини радіаційним методом існує проблема залежності результатів виміру від щільності і складу екструдату [16]. Причина цього явища в тому, що радіаційні датчики фактично вимірюють масу екструдату на одиницю площі. Отже, при технологічних порушеннях у роботі екструдера, коли можуть з'явитися нерівномірності в щільності екструдату, виміри товщини радіаційним датчиком виявляються неточними. У деякі датчики вбудовують спеціальну схему, що дозволяє врахувати коливання щільності і складу екструдату; такі датчики називаються «недіс-кримінуючими». Цим терміном наголошується, що датчик однаково добре вимірює як основний екструдований полімер, так і різні добавки [16]. Радіаційний датчик може бути також використаний для контролю якості отриманого матеріалу, оскільки він дозволяє визначити наявність як різних механічних дефектів, так і присутність домішок.

Жорсткі і м'які  $\gamma$  - промені мають велику здатність проникнення і практично виключно використовуються для виміру товщини товстих виробів (близько 40 мм). Проте датчики на  $\gamma$  -променях також використовують для виміру товщину дуже тонких виробів (менше 100 мкм).  $\beta$ -промені володіють значно меншою здатністю проникнення і можуть бути використані лише для виміру відносно тонких об'єктів, завтовшки менше 3-5 мм. В якості випромінювачів  $\beta$ -променів зазвичай використовують два ізотопи: криптон-85 і стронцій-90. Криптон-85 використовують при вимірі матеріалів з щільністю від 10 до 1000 г/м<sup>2</sup>, діапазон вимірів при цьому складає від 5 до 750 мкм [16]. Стронцій-90 застосовують при необхідності виміряти товщину матеріалів з щільністю від 100 до 5000 г/м<sup>2</sup>, діапазон вимірів — від 100 до 5000 мкм [16]. До недоліків вимірювальних приладів, що використовують  $\beta$  -промені, можна віднести відносно швидкий дрейф свідчень, що робить неминучим проведення частих калібрувань.

При вживанні м'яких  $\gamma$ -променів часто використовують метод виміру зворотного розсіювання [16]. Даний метод дозволяє встановлювати вимірювальну апаратуру лише з одного боку екструдату, роблячи можливим вимір виробів дуже складної форми. Для здобуття м'якого  $\gamma$ -випромінювання зазвичай використовують ізотоп америцій-241, період напіврозпаду якого складає приблизно 450 років. Для здобуття жорсткого рентгена використовують ізотопи з періодом напіврозпаду 10 років. Також перевагою використання рентгенівського випромінювання є незалежність показань приладу від складу екструдату, що робить непотрібною складну електроніку, що враховує всілякі поправки, як у попередньому випадку.

## **1.2. Плоскощілинні екструзійні головки**

### **1.2.1. Класифікація головок для отримання полімерних плівок**

Огляд та аналіз літературних джерел [1,3,8-9,12-14,22-41,45-49,82-141] показав, що екструзійні головки можливо класифікувати в залежності від

способу отримання плівки, геометричної побудови головок, їх приєднання до екструзійного пристрою, засобів вирівнювання потоку течії полімеру та внутрішнього тиску. На основі аналізу літературних джерел нами розроблена класифікація, яка наведена на рис. 1.4. Із класифікації видно, що екструзійні головки, які призначені для виготовлення плівки, можна поділити на два основні класи: кільцевого та плоскощілинного типу.

Головки кільцевого типу застосовуються для виготовлення плівок рукавного типу. Ці головки можуть застосовуватися при ламінуванні тільки при здійсненні багатостадійного процесу, тобто, спочатку виготовляється плівка, а потім за допомогою ламінатора здійснюється ламінування.

За способом кріплення до екструдера головки поділяються на прямі та кутові. До переваг прямого способу відноситься відсутність вихрових потоків розплаву полімеру, які мають місце при кутовому способі. До недоліків прямого способу відноситься вертикальне розміщення екструдера, що призводить до значного зростання загальної висоти машини.

В залежності від виду пристрою головки поділяються на стаціонарні та обертові. Стаціонарні головки простіші у виготовленні, ніж обертові, однак обертові забезпечують більш рівномірну за товщиною плівку.

В залежності від виду розподільчих каналів головки поділяються на гвинтові, гладкі та решітчасті. Гвинтові канали застосовуються в головках при кутовому кріпленні до екструдера для зменшення вихрових потоків розплаву полімеру. Гладкі та решітчасті - використовують при прямому кріпленні. Застосування решітчастих каналів обумовлено умовами зменшення пульсації при роботі екструдера, але вони збільшують опір головки. В сучасних лініях виготовлення плівки за допомогою обертової кільцевої головки застосовують кутовий спосіб її кріплення до екструдера.

Плоскощілинні головки застосовуються як при виготовленні плівок, так і безпосередньо при ламінуванні рулонних матеріалів. В залежності від направлення входу розплаву в головку існує підведення збоку, в середину та комбінований. Поширеним є спосіб підводу розплаву в середину головки. Спосіб підводу розплаву збоку застосовується рідко, оскільки в таких головках полімер рухається по траєкторіях, які мають різну довжину. Тому час перебування полімеру в таких головках непостійний, а це призводить до виробництва плівки, яка має нестабільні властивості. Комбінований спосіб підводу розплаву є складним у реалізації.

В залежності від виду регулювання вихідної щілини головки поділяються на головки з регулюючими планками та пружно-деформуючою губкою. За допомогою регулюючих планок змінюється товщина плівки, а перерозподіл розплаву по ширині головки здійснюється тільки за допомогою пружно-деформованої губки.

В залежності від виду вирівнювання потоку головки поділяються на головки з регулюючими перешкодами та на головки, температура яких змінюється по їх ширині. Перешкоди, які регулюються, дозволяють змінювати поперечний перетин формуючих каналів, що призводить до перерозподілу

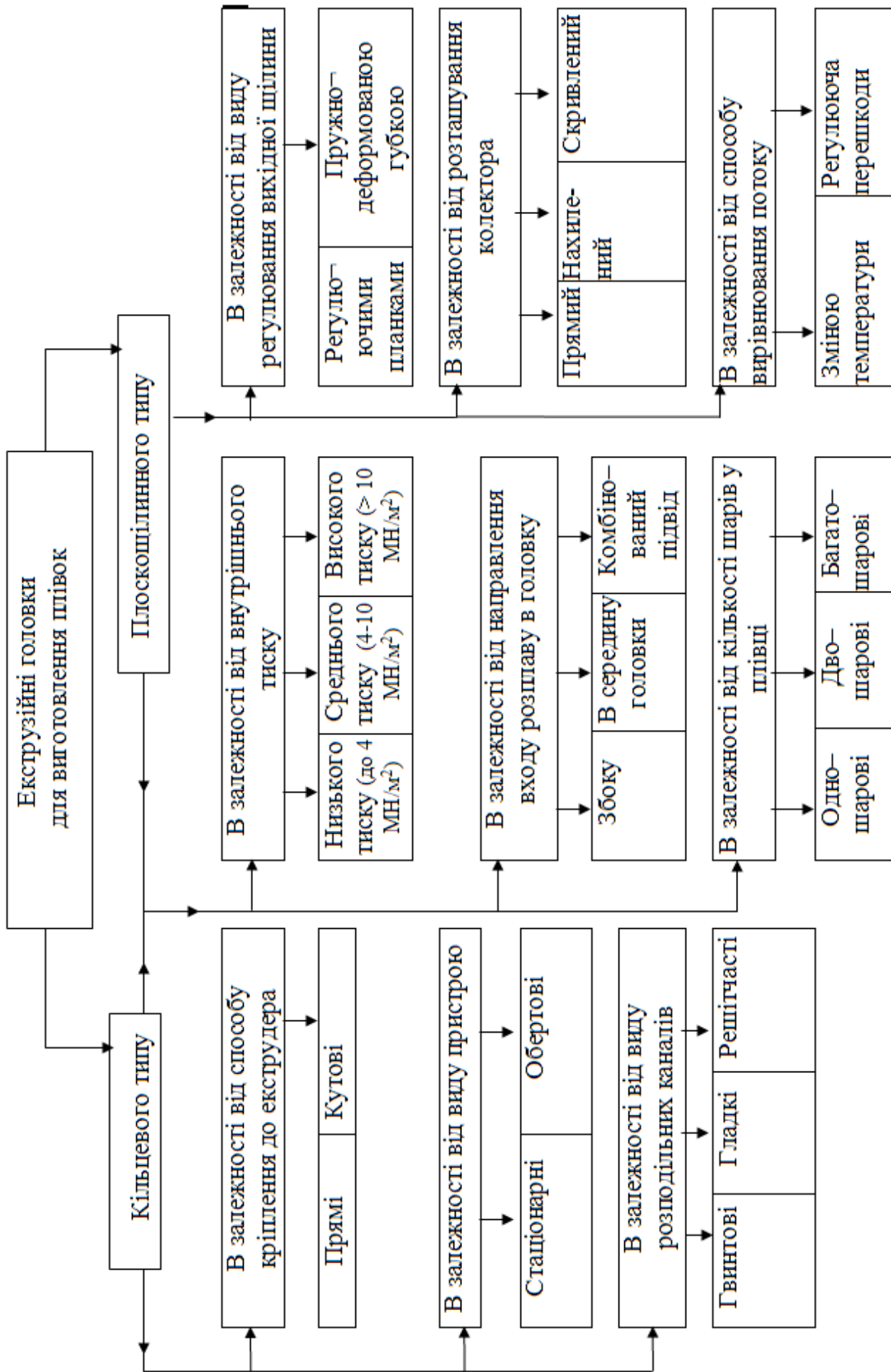


Рис. 1.4. Класифікація екструзійних головок для виготовлення піп'юк



полімеру по ширині головки. Недоліком такого регулювання є часте виникнення оптичних дефектів на поверхні плівки. Зміна температури головки по її ширині призводить до зміни температури полімеру, а як наслідок, змінюється його в'язкість, що приводить до перерозподілу витрат полімеру по ширині головки. Недоліком цього методу є малий діапазон зміни температури, оскільки при великому діапазоні виникають нерівномірні фізико-хімічні властивості плівки.

### 1.2.2. Конструкції плоскощілинних головок

Розглянемо більш детально конструкції плоскощілинних головок для вибору найбільш раціональної.

Конструкція головки з прямим розташуванням колектора показана на рис. 1.5. У цій головці розплав до формуючої щілини 1 шириною  $W$  і висотою  $H$  підводиться за допомогою колектора 2 радіусом  $R$ , що має постійний поперечний переріз і вісь якого розташована паралельно щілині. У колектор розплав надходить через канал 3. Переваги цієї конструкції в тому, що вона більш жорстка і має меншу загальну площу всього каналу. Недоліком цієї конструкції є те, що полімер, що знаходиться тривалий час в середині головки, починає розщеплюватись. Тому в головках з прямим розташуванням колектора небажано переробляти термочутливі матеріали, наприклад, не пластифікований ПВХ (полівінілхлорид) [1,5,8,9,12-14,22,28,29,59].

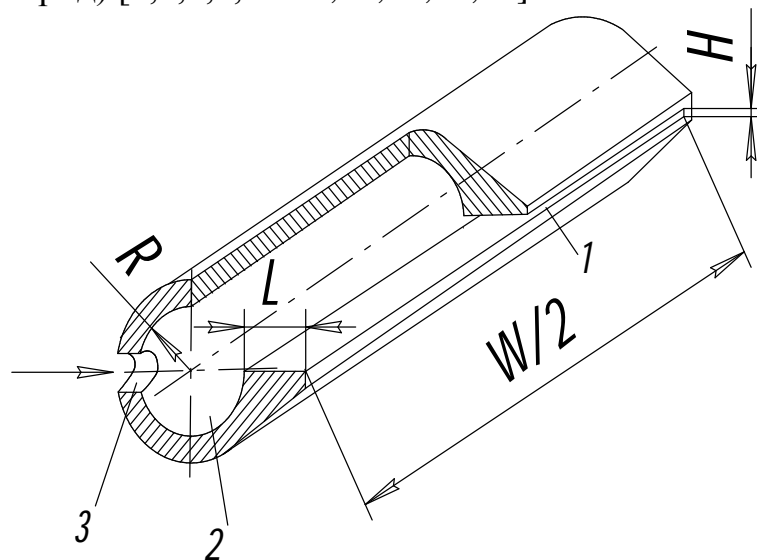


Рис. 1.5. Плоскощілинна головка колекторного типу з підводом розплаву полімеру в середину головки:

1 – формуюча щілина; 2 – колектор; 3 – канал підводу.

В промисловості використовують три способи вирівнювання потоку. Перший спосіб полягає в тому, що для компенсації втрат тиску температура головки підвищується від її середньої осі до країв у процесі руху полімеру [1,8,12]. При цьому, зменшується в'язкість розплаву, що забезпечує вирівнювання швидкості екструзії по ширині головки. Недолік цього методу полягає в тому, що кінцевий продукт буде мати нерівномірні властивості.

Суть другого способу полягає в тому, що розподільчому каналу надається

така форма, яка забезпечує рівність гідравлічних опорів руху полімеру на шляху від входу в головку до будь-якої точки щілини на виході. Цей спосіб використовують у головках з похилими колекторами, завдяки яким такі головки називають «риб'ячий хвіст» (рис. 1.6) [1-12].

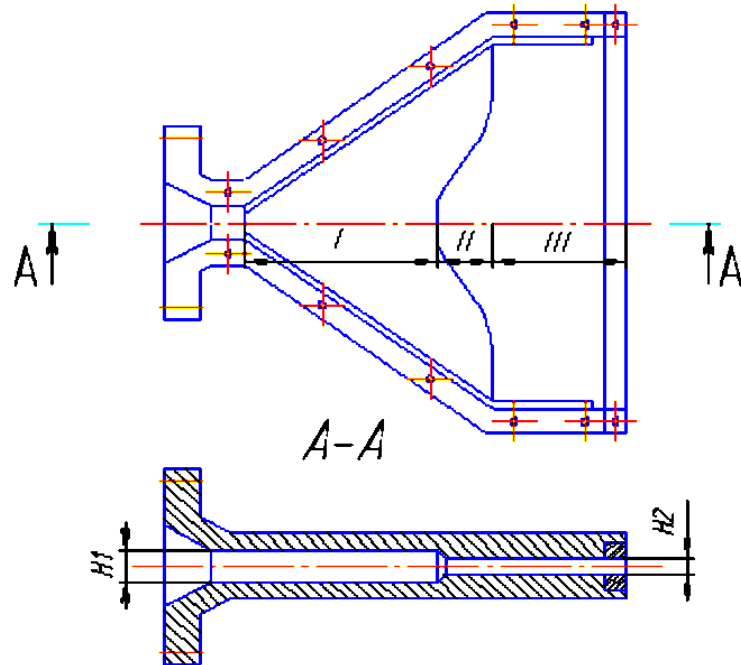


Рис. 1.6. Плоскощілинна головка трикутного типу для виготовлення плівки: I – вхідна зона; II – зона вирівнювання; III – зона формуючого каналу; H1 – перехідний канал; H2 – формуючий канал.

Третій спосіб вирівнювання потоку дає можливість пристосувати головку для переробки різних полімерних матеріалів. Цей спосіб полягає в застосуванні регульованих (керованих) перешкод — опорів для вирівнювання потоку. Так, у якості дросельної перешкоди застосовується підпірна планка. Використовуючи пружність такої планки, можна досягти однакової швидкості виходу полімеру по ширині головки. Конструкція цієї головки показана на рис. 1.7. Принцип її дії такий: розплав полімеру з випускного каналу екструдера надходить у розподільний канал головки, у якому відбувається попереднє вирівнювання швидкості потоку по ширині головки. Остаточне вирівнювання здійснюється за допомогою пружного повзуна 10. При опусканні одного з повзунів щілина між овальною поверхнею повзуна і нижньою половиною корпусу зменшується, що призводить до зменшення витрати полімеру на цій ділянці [1,13,14,36,47]. Подібна головка зображена на рис. 1.8 [1,13,14,36], в ній регулювання висоти каналу здійснюється горизонтальним переміщенням повзуна 4, за допомогою гвинта 8. Висоту щілини між губками можна змінювати за допомогою болтів у різьбовій втулці.

З гідродинамічної точки зору, наведені перешкоди обумовлюють виникнення застійних зон і створюють небезпеку розпаду термочутливих матеріалів. Крім того, можливе затікання матеріалу в щілину між дросельною

заслонкою і корпусом головки. Внаслідок конкретного числа повзунів неможливо досягти плавної зміни висоти каналу. Слід зазначити, що точність виготовлення повзунів і точність складання головки повинна бути високою, щоб не допустити утворення проміжків між повзунами. Крім того, в процесі роботи на виході з головки розплав може мати смуги – сліди від місця стику двох сусідніх повзунів.

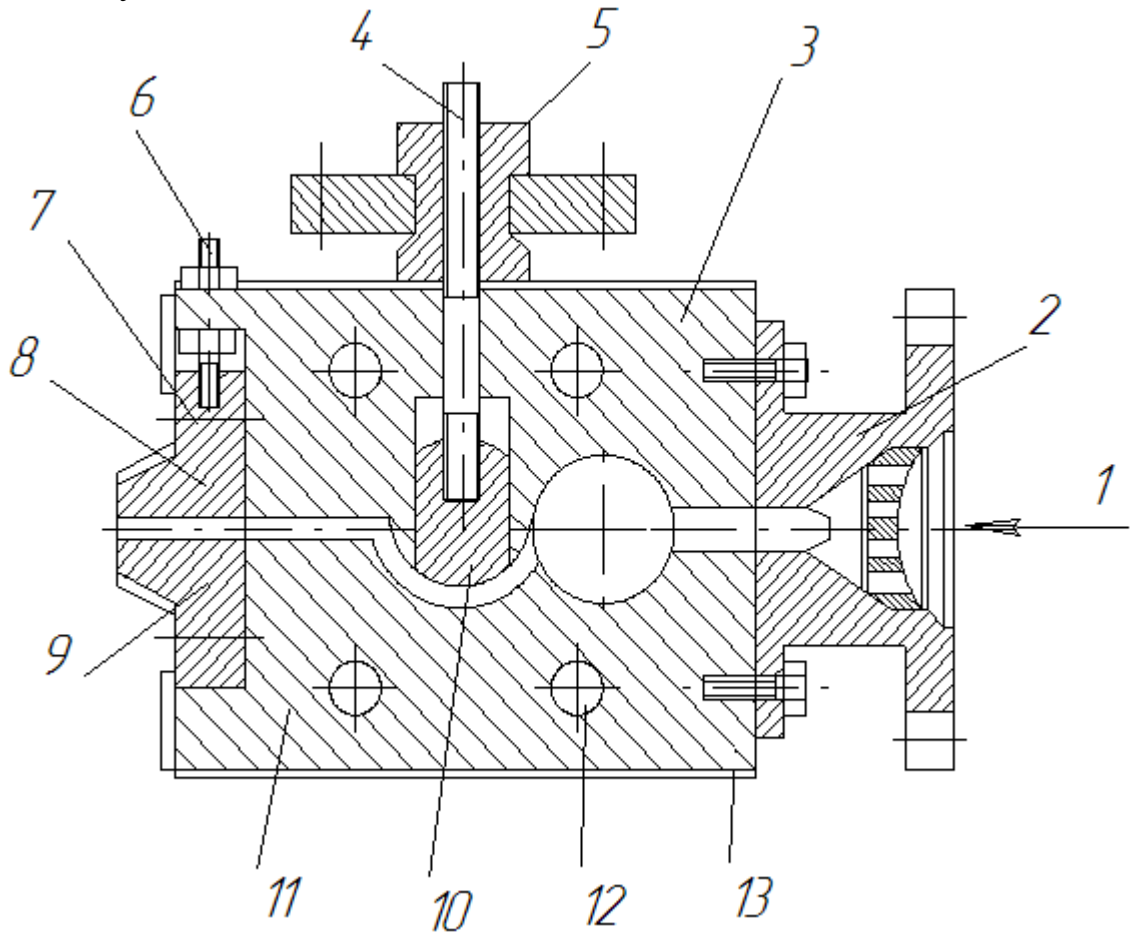


Рис.1.7. Конструкція щілинної головки з пристроєм для гідравлічного балансування:

1 – вхід розплаву із циліндра екструдера; 2 – перехідник; 3 – верхня половина корпусу; 4 – шпилька регулювання положення дросельної планки; 5 – різьбова втулка; 6 – шпилька регулювання положення верхньої губки; 7 – гвинти, які фіксують верхню губку; 8, 9 – верхня та нижня губки формуючої щілини; 10 – пружний повзун; 11 – нижня половина корпусу; 12 – отвір для патронних електронагрівників; 13 – теплоізоляція.

Діапазон різниць висот каналу, що забезпечується пружною планкою, набагато менший, ніж той, що забезпечується повзунами. Тому пружна планка застосовується в головках для тонких плівок, тобто там, де малі різниці висот мають вплив на якість плівки, що виготовляється.

У приведених вище конструкціях головок ми маємо справу з жорстким кріпленням губок, або із пружно-деформованими губками. При таких конструкціях головок неминуче розпирання губок, що недопустимо для тисків порядку  $10 \text{ МН/м}^2$ . Для такого тиску запропонована конструкція головки, яка

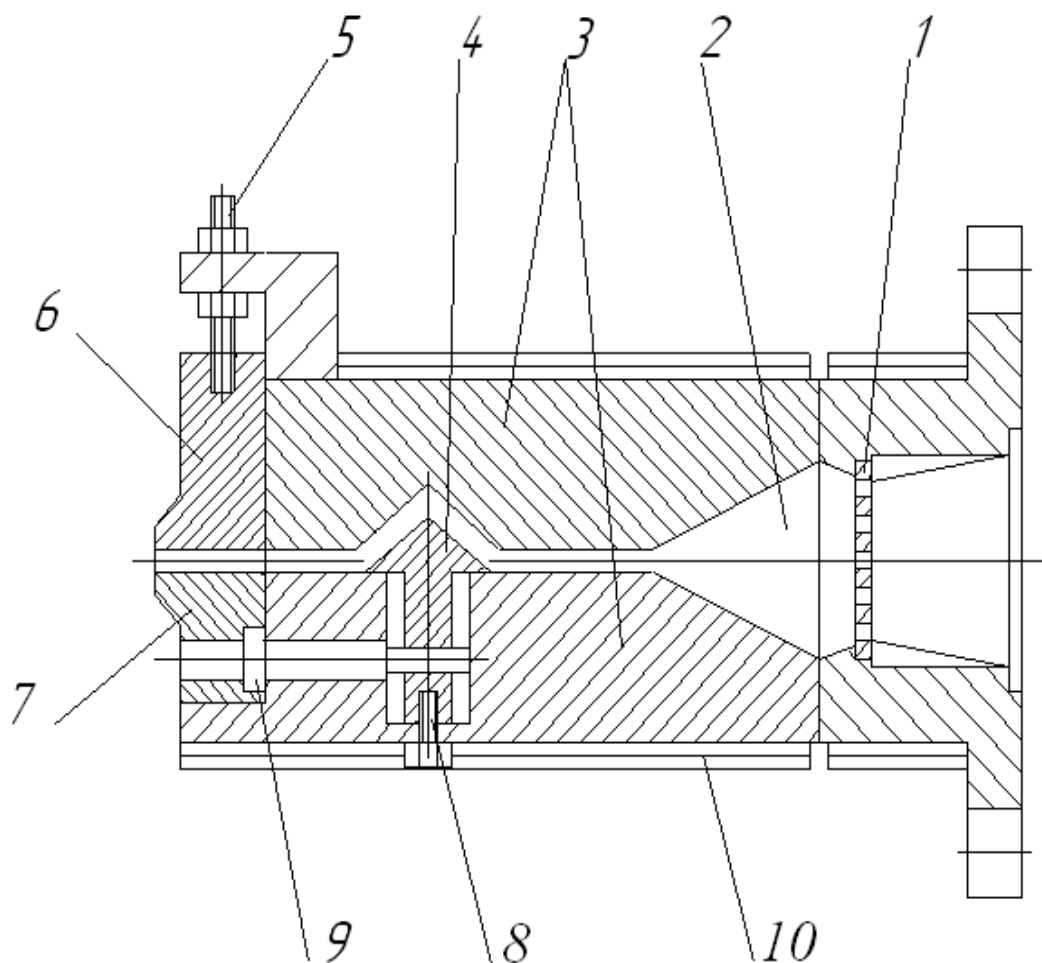


Рис.1.8. Конструкція щілинної головки з пристроєм для гідравлічного балансування:

1 – фартух з решіткою; 2 – розподільний канал; 3 – верхня і нижня половини корпусу; 4 – повзуни регулювання висоти щілини каналу; 5 – гвинт регулювання положення верхньої губки; 6, 7 – верхня рухома та нижня нерухома губки формуючої щілини; 8 – гвинт регулювання положення повзунів; 9 – гвинт фіксації положення повзунів; 10 – пластинчаті електронагрівники.

наведена на рис. 1.9 [1,13,23]. Профіль каналу головки, який підводить полімерний розплав, виконаний таким чином, що під дією тиску паралельність щілини не змінюється. Принцип дії головки такий: розплав полімеру надходить з циліндра екструдера у перехідник, потім у підвідний канал 10 і колектор 9, у якому відбувається попереднє вирівнювання швидкості потоку по ширині головки. Остаточне вирівнювання швидкості потоку здійснюється пружно деформуючою планкою 4. Під дією тиску нижня половина корпусу 2 ніби повертається на деякий кут навколо умовної точки 8, розташованої в найслабшому місці перетину. Верхня губка 3 під дією тиску переміщається по вертикалі паралельно плиті кріплення 6. Така конструкція головки забезпечує постійну висоту щілини та її паралельність. Недоліками такої головки є необхідність досягнення високої точності в процесі складання та наявність застійних зон.

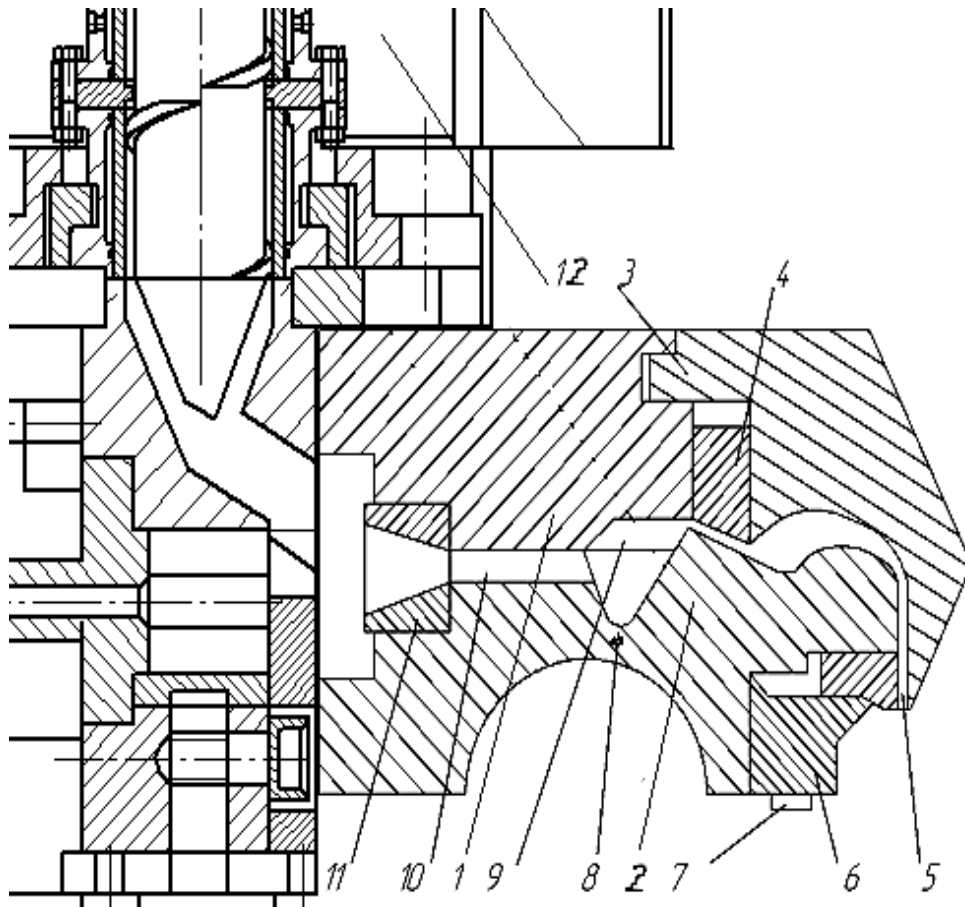


Рис. 1.9. Переріз головки з пристроєм для регулювання висоти щілини:  
 1 – верхня половина корпусу; 2 – нижня половина корпусу; 3 – верхня нерухома губка; 4 – підпірна пружно-призматична планка; 5 – канал формування; 6 – плита кріплення; 7 – гвинт кріплення губки; 8 – уявна місце повороту; 9 – колектор; 10 – підвідний канал; 11 – перехідник; 12 – екструдер.

Таким чином, існує два загальноприйнятих методи зміни геометрії головок для плоскощілинної екструзії, які показані на рис. 1.10 [16].

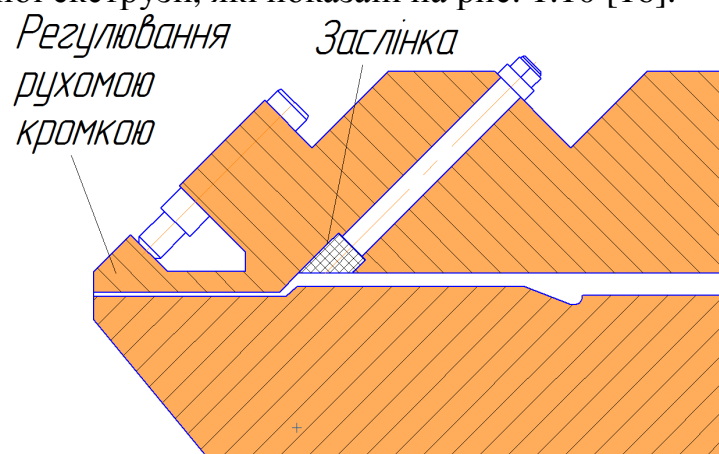


Рис. 1 10. Способи зміни геометрії головки при виробництві листів

Одним із способів регулювання течії є регулювання рухливими щоками екструзійної головки. Ряд болтів, розташованих по ширині головки, дозволяє провести локальне стискування вихідного зазору каналу, який формує, що

допоможе здійснювати тонке регулювання товщини екструдату в певних ділянках. Зазор може бути відрегульований більш ніж на 1 мм при відповідній конструкції рухливої щоки. Слід відмітити, що заслінку використовують не так часто, як рухливі щоки. Регулювання заслінкою відбувається так само, як і регулювання за допомогою рухливих щік. Заслінка може бути злегка деформована за допомогою декількох болтів, розташованих по ширині головки. Деформація заслінки викликає зміну висоти каналу і таким чином дозволяє регулювати розподіл потоку у головці. Третя можливість регулювання потоку, не змальована на рис. 1.10, являє собою зміну температури в головці. Локальне нагрівання або охолодження певних ділянок головки збільшує або ослаблює швидкість течії. Регулювання температури ефективніше для полімерів, в'язкість яких сильно залежить від зміни температури, тобто для більшості аморфних полімерів [16].

На рис. 1.11 показані особливості головки конструкція якої має переваги при виробництві листів у тому випадку, коли необхідне регулювання при виготовленні виробів різної товщини.

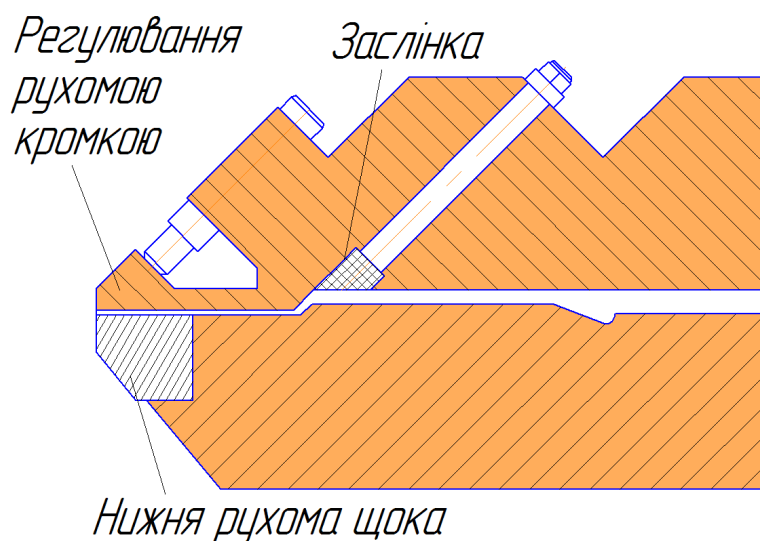


Рис. 1.11. Плоскощільна головка для отримання листових матеріалів зі зйомною нижньою щокою

Використання зйомної нижньої рухливої щоки дозволяє застосовувати головку екструзії для екструзії листів, товщиною як 1 мм, так і 4 мм. У відсутності зйомної щоки довелося б замінювати головку, оскільки зйомна рухлива головка може регулювати потік лише в обмеженому діапазоні.

У деяких сучасних лініях екструзій зазор головки для здобуття листів регулюється автоматично, наприклад, терморозширюваними болтами, вперше розробленими компанією Welex [16] на початку 1970-х рр. Подібний тип головки для виробництва листових матеріалів в даний час пропонується компанією Egan Machinery Company [16] і рядом інших компаній.

Інший принцип регулювання використовується фірмою Harrel Inc. [16] Пропоновані цій фірмою головки для здобуття листів дають можливість локального регулювання температури в різних місцях по ширині головки.

Товщина аркуша змінюється автоматичним підвищенням або зниженням температури без зміни зазору між щочками головки [16].

Оригінальна, автоматично регульована головка для екструзії листів була розроблена компанією Нехсо [16]. У цій головці використовується регулювальник із зворотним зв'язком для гідравлічного контролю кожного болта головки. Вважається, що така конструкція зменшує час спрацьовування від декількох хвилин до декількох секунд. На жаль, компанія Нехсо припинила займатися цими проблемами в 1983 р., тому така головка більше не виробляється. Аналогічні системи розроблялися іншими виробниками. Наприклад, Japan Steel Works [16] розробила автоматичну систему регулювання зазору головки, яка використовується в сервомоторах. Така система може переміщатися у напрямі потоку, регулюючи кожен болт по ширині головки потрібну кількість разів, слідуючи автоматичному виміру товщини листа. Перевага механічного регулювання в порівнянні з болтами, що терморозширюються, полягає в тому, що в ній регулювання товщини відбувається швидше [16].

Як показав Раувендааль К. [16], для плоскощільної екструзії Гроссом був розроблений витончений метод регулювання товщини в головках, який використовував систему з гнучкою мембраною усередині головки, яка дозволяє досить просто регулювати товщину листа, використовуючи малопотужні силові приводи для створення рівної поверхні, тобто без гострих кутів або мертвих зон. Схематично ця система показана на рис. 1.12. Мембранна головка була ліцензована декількома світовими виробниками формуючого інструменту [16].

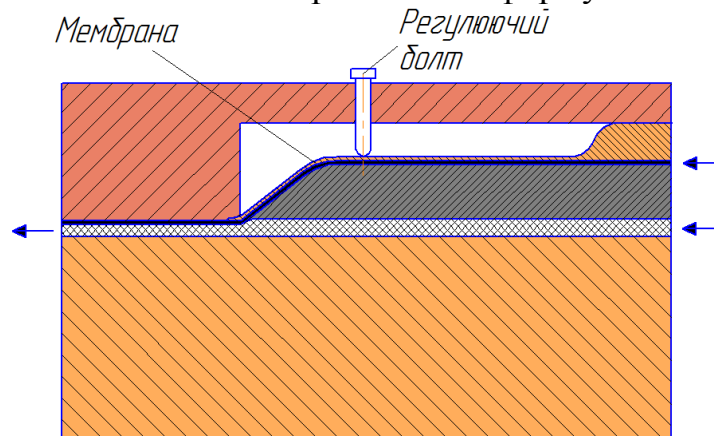


Рис. 1.12. Схема соекструзійної мембранної головки

Недоліком стандартної головки типу «вішалка» з розподільним каналом у формі краплі є те, що розподіл швидкостей змінюється, коли міняється індекс течії матеріалу. Таким чином, розподіл швидкостей залежить від вибору полімеру, а також від продуктивності, оскільки індекс течії залежить і від швидкості зсуву. В цьому випадку для усунення спотворення розподілу потоків у головці зазвичай використовуються рухливі щочки і заслінки. В своїй роботі Раувендааль К. [16] відмічає авторів Уінтер і Фрітц, які запропонували використовувати модифіковану геометрію головки типу «вішалка». Ця головка усуває проблему залежності розподілу розплавленого полімеру по її ширині від

індексу течії.

Існують конструкції плоскощілинних головок з розподільним шнеком, який забезпечує безперервну експлуатацію головки, а також дає змогу отримувати полімерні плівки або листи більшої товщини. Конструкцію такої головки наведено на рис. 1.13, її особливістю є наявність розподільного шнека 2 в колекторі [1,13,14,36]. Призначення цього шнека – розподіл розплаву полімеру по ширині формуючої щілини та його примусова подача до виходу з головки. Крім того, шнек створює визначений ступінь тиску і забезпечує його рівномірний розподіл по довжині колектора. Завдяки шнеку, в середині головки відсутній застій полімеру, а також відбувається його гомогенізація, яка істотно впливає на якість кінцевого продукту. Таким чином, головки зі шнеком у розподільному каналі застосовуються при виробництві листів з термочутливих полімерів. Обертання шнека, який знаходиться у розподільному каналі, передається від електродвигуна через редуктор. Редуктор дозволяє проводити безступінчасте регулювання числа обертів.

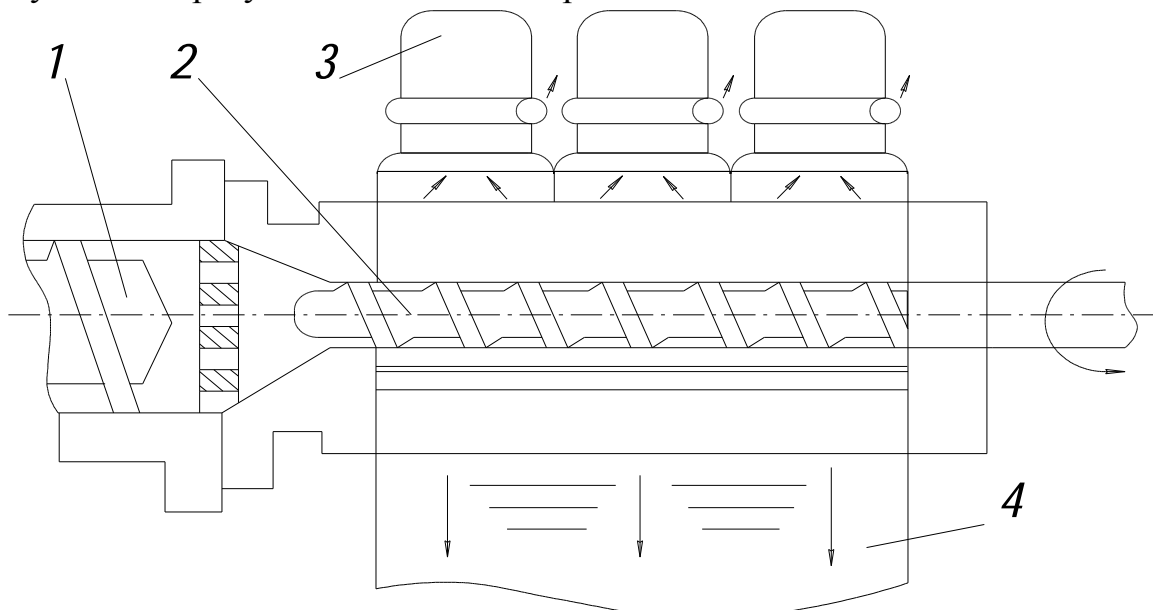


Рис. 1.13. Головка зі шнеком в розподільному каналі:  
1 – екструдер; 2 – шнек; 3 – пристрій для відсмоктування повітря; 4 – плівковий матеріал.

Плоскощілинна головка зі шнеком має такі переваги: завдяки відсутності застійних зон усередині головки збільшується термін їх експлуатації; відпадає потреба в очищенні розподільного каналу від застиглого полімеру; досягається хороша гомогенізація полімеру.

До недоліків таких головок відносяться: утворення під дією шнека слідів гвинтової лінії на полімері, який екструдуюється; при високих швидкостях утворюються вихрові потоки, які погіршують якість плівки; такі головки мають підвищену вартість.

В залежності від виду регулювання вихідної щілини (рис. 1.4) екструзійні головки поділяються на головки з регулюючими планками та головки з пружно-деформованою губкою. На рис. 1.14 показано, як регулюючими планками 6 та 8 здійснюється зміна ширини вихідної щілини головки [1,3,8,13,14].



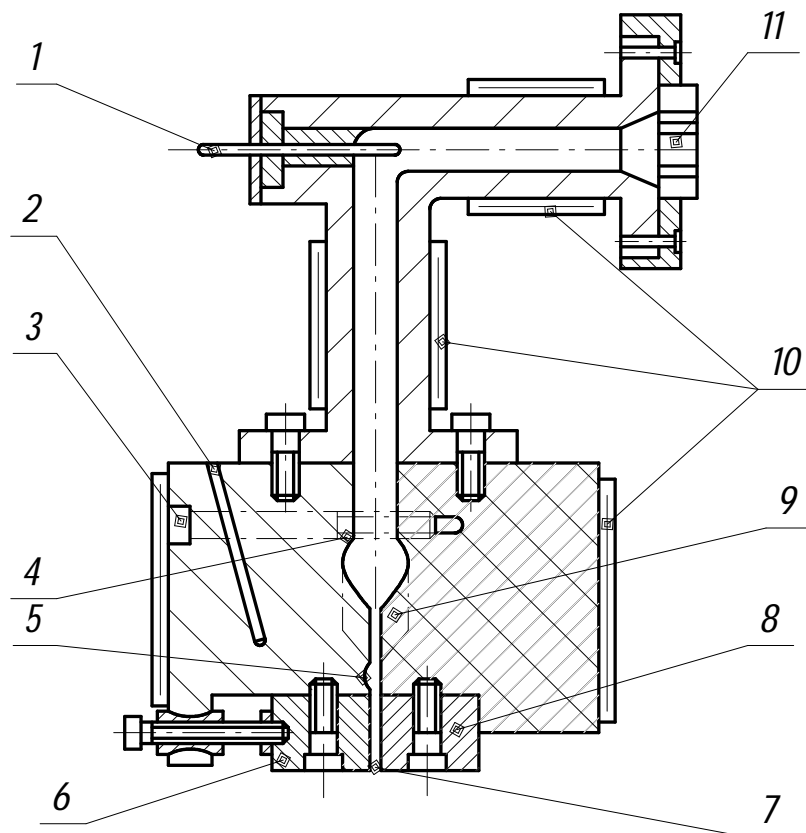


Рис. 1.14. Конструкція головки для виготовлення плоскої плівки з краплеподібним розподільчим каналом та каналом для охолодження:

1 – термопари для розплаву; 2 – паз для термопари; 3 – з'єднувальний гвинт; 4 – паз; 5 – другий розподільчий канал; 6 – рухома губка; 7 – профілюючий канал шириною 0,5 мм; 8 – нерухома губка; 9 – краплеподібний розподільчий канал; 10 – обігрівачі; 11 – решітка.

В цій головці розподільний канал 9 в перерізі має каплеподібну форму і розширюється в напрямку від середини до країв головки. Відмінною рисою цієї головки є наявність другого розподільного каналу 5, меншого перерізу, призначеного для вирівнювання потоку полімеру. Крім того, у корпусі головки є спеціальний паз 4 для подачі охолоджуючої води при зупинці екструдера, що запобігає розкладанню матеріалів у внутрішніх каналах і губках [1,3,8,13,14].

Плоскощільнна головка з пружно-деформованою губкою зображена на рис. 1.15. [1,8,12,13,19]. Нерухома губка 3 та пружно-деформована губка 2, кріпляться до корпусу 1 болтами. Для регулювання товщини плівки призначені гвинти регулювання висоти щілини 4. Зусилля від регулюючого гвинта передається через проміжний клин 5 (перемичку) на губку 2 і деформує її, змінюючи таким чином ширину щілини і, відповідно, товщину плівки. В такій конструкції головки не утворюються застійні зони і досягається плавне регулювання профілю формуючої щілини.

Головки з пружно-деформованими губками мають переваги над головками з регулюючими планками, оскільки на виході із щілини розплав не має смуг від стиків сусідніх планок. При високих тисках застосовують головки з регулюючими планками, оскільки головки з пружно-деформованими планками при високому тиску недопустимо деформуються.

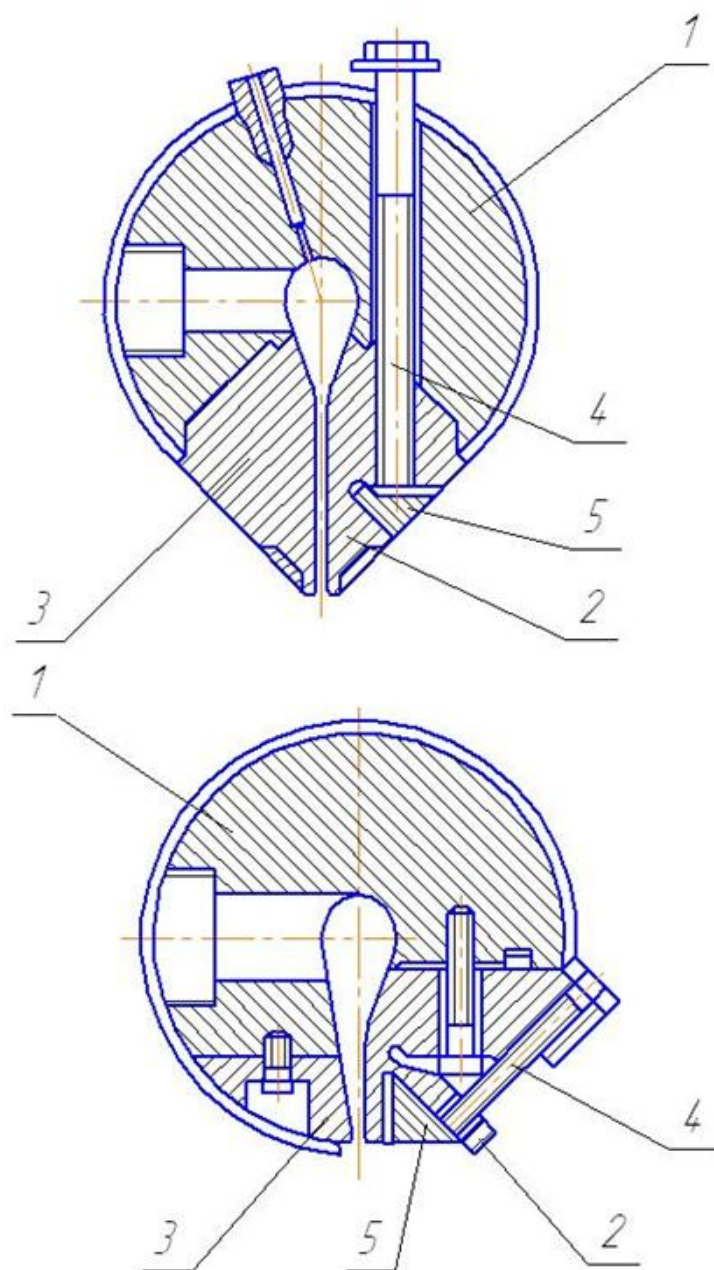


Рис. 1.15. Переріз головок з пристроями для регулювання висоти щілини: 1 – корпус головки; 2 – пружно-деформована губка; 3 – нерухома губка; 4 – гвинт регулювання висоти щілини; 5 – проміжний клин.

При використанні регулюючих пристроїв можливе створення неоднорідного потоку, внаслідок того, що різні області потоку полімеру рухаються в середині головки з різними градієнтами швидкості. Розташування різних конструкцій опорів повинно забезпечувати перебування потоку у формуючому каналі протягом часу, необхідного для релаксації. Губки головки повинні знаходитися на визначеній відстані від цих опорів.

На думку авторів робіт [1,3,8,12,13,19] при ламінуванні широкого полотна з прийнятною рівнотовщинністю добрі результати показують головки трикутного типу (“риб’ячий хвіст”) з пружно-деформованою планкою і формуючими губками. Однак проектування таких головок на сучасному етапі є дуже складним. Це викликано тим, що зараз не існує методик розрахунку

головок, яка б забезпечувала проектування головки з рівнотовщинністю покриття 90% при його ширині більш ніж 2 метри.

Екструзії для здобуття плівок, по суті, не відрізняються від головок для листової екструзії, оскільки аркуш і плівка відрізняються лише товщиною. Вироби товщиною менше 0,5 мм зазвичай відносять до плівок, тоді як вироби товщиною більш ніж 0,5 мм відносять до листів [16]. На рис. 1.16 представлені три типи розподільних каналів, які застосовуються у головках при виробництві листів.

На рис. 1.16,а показана Т-подібна головка. Така геометрія каналу досить проста для виробництва. Проте розподіл розплаву полімеру в ній не дуже однорідний і, оскільки геометрія каналу непрямолінійна, така головка непридатна для переробки полімерів з високою в'язкістю і з обмеженою термостабільністю. Т-подібну головку часто використовують в екструзії з нанесенням покриттів. Аналіз течії в Т-подібній головці був виконаний Уіксом, Іто і Пірсоном [16].

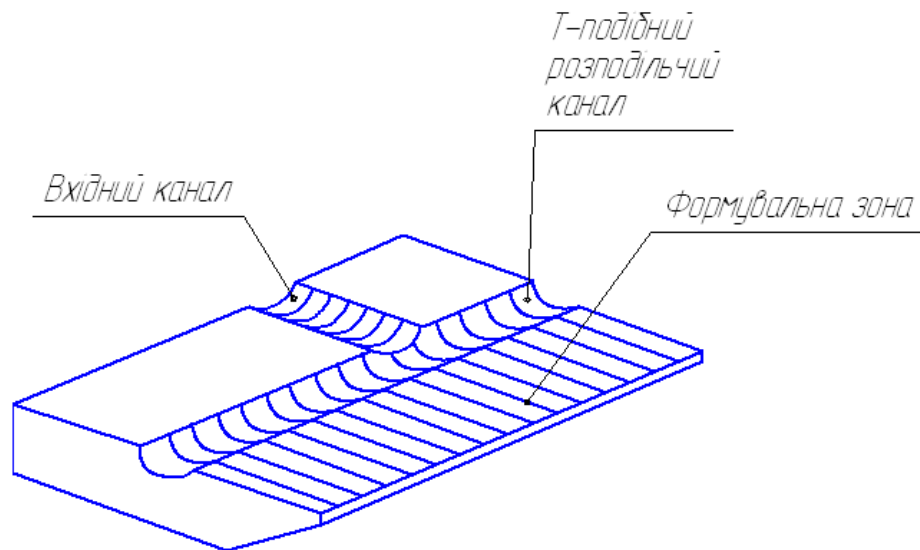


Рис. 1.16,а. Т-подібна екструзійна головка

Головка типу «риб'ячий хвіст» показана на рис. 1.16,б. У такій головці розподіл розплаву однорідніше, ніж в Т-подібній, проте повністю однорідний розподіл важко отримати і тут. Дослідження течії в головках «риб'ячий хвіст» виконані Іто і Чеджфеком [16].

На рис. 1.16,с показана головка типу «вішалка». Така геометрія головки зазвичай використовується при екструзії листів. Геометрія ділянок головки типу «вішалка» може бути сконструйована так, щоб отримати найбільш однорідний розподіл розплаву полімеру. Очевидно, така головка більш трудомістка при виготовленні і тому є дорожчою, ніж Т-подібна і типу «риб'ячий хвіст». Вивчення течії у головці типу «вішалка» було виконано Іто, Вортбергом, Гермаром, Чангом, Клейном, Шенефельдом, Вернье, Мацубара і ін. [16].

Модифікована геометрія головки типу «вішалка» може бути використана як в щілинних, так і в кільцевих головках. Уінтер [31] використовував такого типу головки для формування виробів методом роздуву, товщина яких міняється

в межах від 5 до 8%. Дуже добрі результати були отримані для плоских головок при здобутті листів шириною від 0,25 до 2 м.

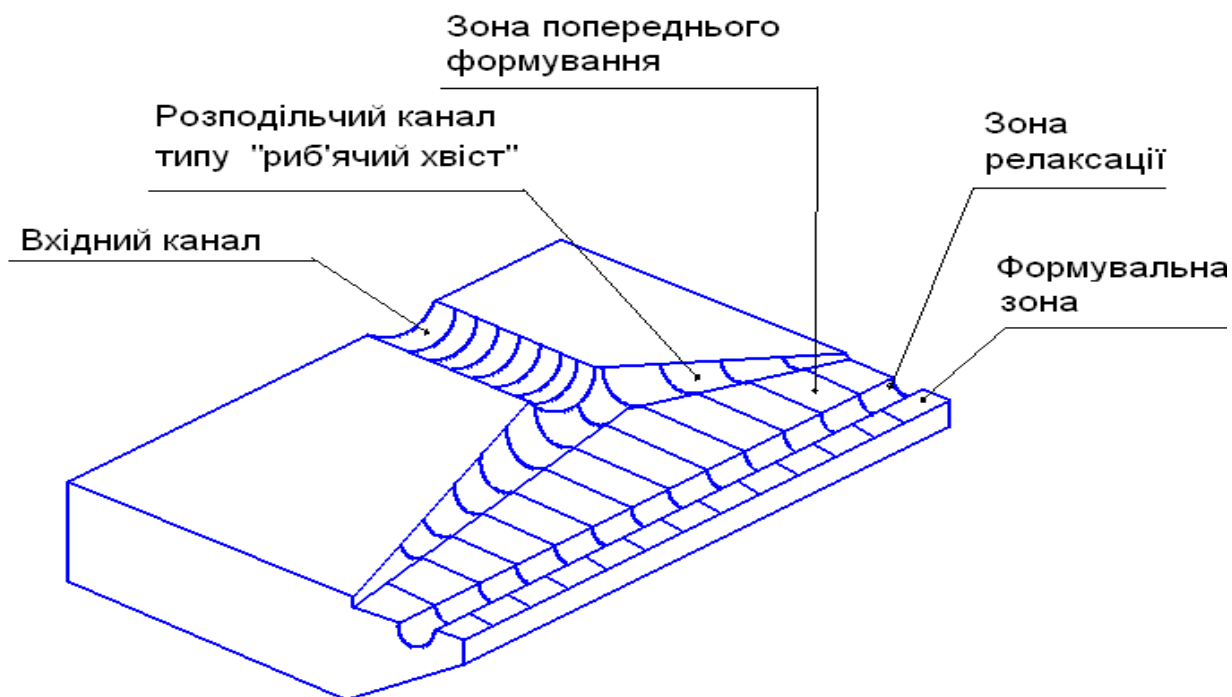


Рис. 1.16,б. Екструзійна головка типу «риб'ячий хвіст»

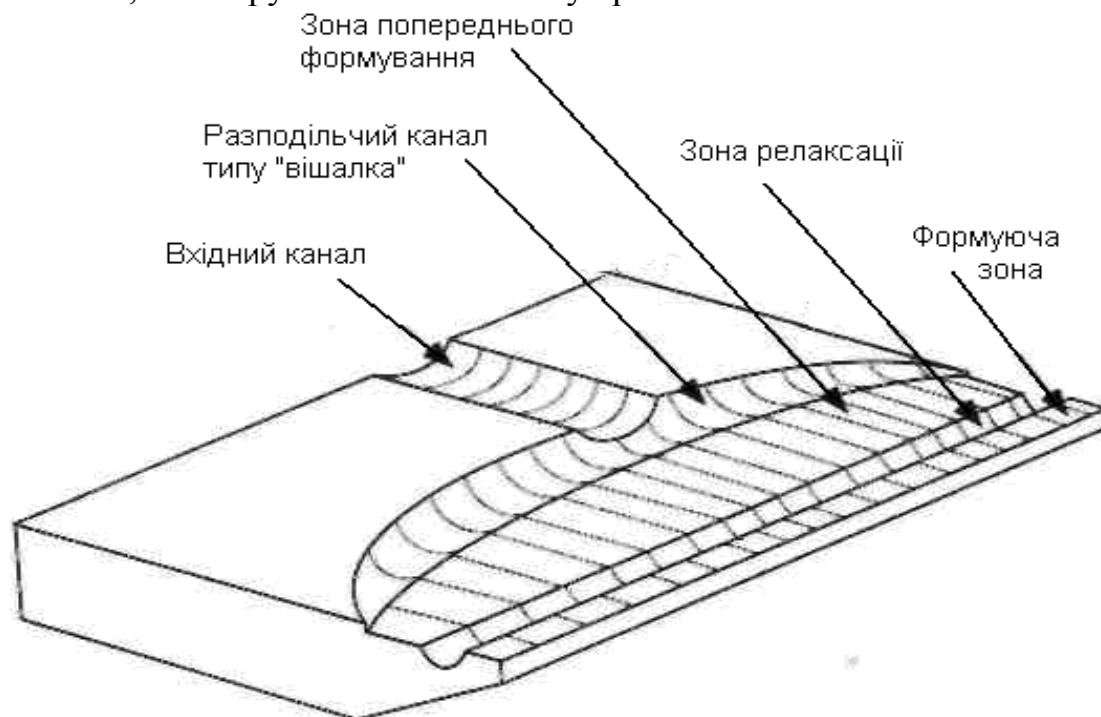


Рис. 1.16,с. Екструзійна головка типа «вішалка»

### 1.2.3. Багатоканальні плоскощільні головки

Рис. 1.17 показує багатоканальну щільну головку для двошарової соекструзії [16].

Товщина верхнього шару соекструдату може бути відрегульована за

допомогою заслінки, а товщина кінцевого комбінованого шару може варіюватися за допомогою рухливої щоки.

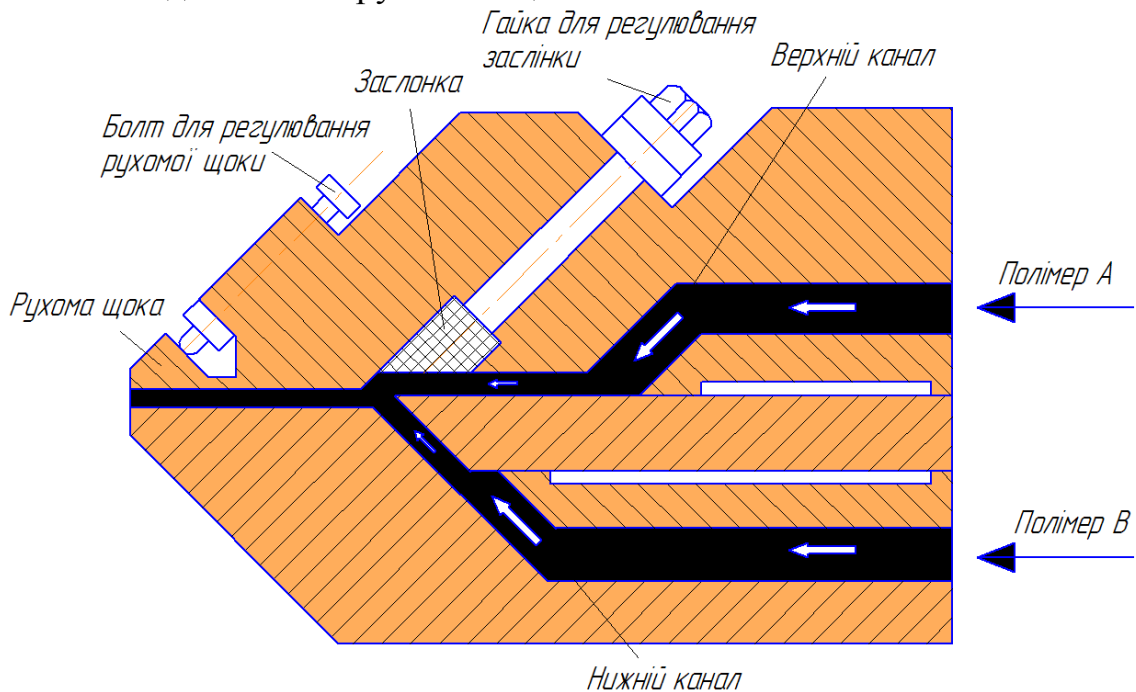


Рис. 1.17. Багатоканальна плоскощільна головка для двошарової соекструзії

Соеструзія трьох і більше шарів у щільній головці – досить важке завдання, оскільки геометрія виробу стає досить складною. Рис. 1.18 показує іншу конструкцію тришарової соекструзійної щільної головки [16].

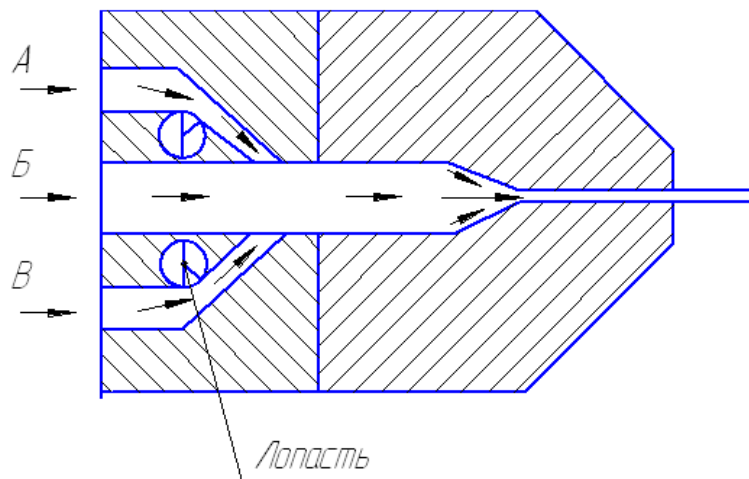


Рис. 1.18. Тришарова щільна соекструзійна головка з лопатями

У приведеній конструкції товщина шару може бути відрегульована лопатями. Внутрішнє регулювання дозволяє досягти вищої міри однорідності загальної товщини виробу; проте зміна локальної товщини шару неможлива, як це робиться за допомогою заслінки.

У третьому способі соекструзії використовують багатоканальні зовнішні сполучні головки, в яких є окремі канали для різних потоків розплаву, а також окремі отвори, через які потоки розплаву виходять з головки окремо,

з'єднуючись безпосередньо на виході з головки [16]. Цей спосіб називається також багатошаровою соекструзією. Для щільних головок використовуються видавлюючі валки, які дозволяють з'єднати шари разом.

Перевага соекструзії полягає також в однорідному розподілі температури в екструдованому матеріалі, що може бути реалізоване за допомогою соекструзії тонкого низков'язкого зовнішнього шару поверх високов'язкого внутрішнього шару. Найбільша швидкість зрушення і виділення тепла відбуваються в напрямі, перпендикулярному стінці. Наявність низков'язкого матеріалу в зоні максимуму швидкості зрушення приводить до зменшення тепловиділення і появи профілю температури. Такий метод зазвичай використовується для переробки полімерів з низькою термостабільністю. Цей метод дозволяє усунути такі нестабільності і дефекти екструдату, як ребристість поверхні («акуляча шкіра») і уривчастість потоку екструзії [16].

У таблиці. 1.1 приведено порівняння конструкцій на основі живильника і багатоканальної системи [16].

Таблиця 1.1.

Порівняння живильника і багатоканальної головки

<b>Живильник</b>	<b>Багатоканальна головка</b>
Низька вартість	Висока вартість
Багатошаровість виробу	Число шарів обмежено
Простота конструкції	Складність конструкції
Близькі значення в'язкості	Можливість використання полімерів
Обмеження числа полімерів, що об'єднуються	Комбінування різних полімерів
Невисока однорідність шарів	Хороша однорідність шарів
Наявність декількох шарів в одній головці	Обмеження числа шарів конструкцією головки
Застосовність для виробництва плівок і листових матеріалів	Застосовність для виготовлення виробів різних профілів

Можна об'єднати живильник з багатоканальною головкою, щоб отримати соекструзійну систему, яка легко переналаштовується і дозволяє сполучати багато шарів та багато полімерів із істотними відмінностями в реологічних характеристиках.

#### 1.2.4. Викривлення поверхні розділу шарів

Однією із складних завдань при соекструзії залишається контроль однорідності індивідуальних шарів. Добре відомо, що коли поруч течуть дві рідини з різною в'язкістю, поверхня їх розділу викривляється оскільки рідина з меншою в'язкістю має тенденцію перетікати в області з високими швидкостями зсуву. В результаті, малов'язкий матеріал прагнучиме інкапсулювати

високов'язку рідину (рис. 1.19) [16].

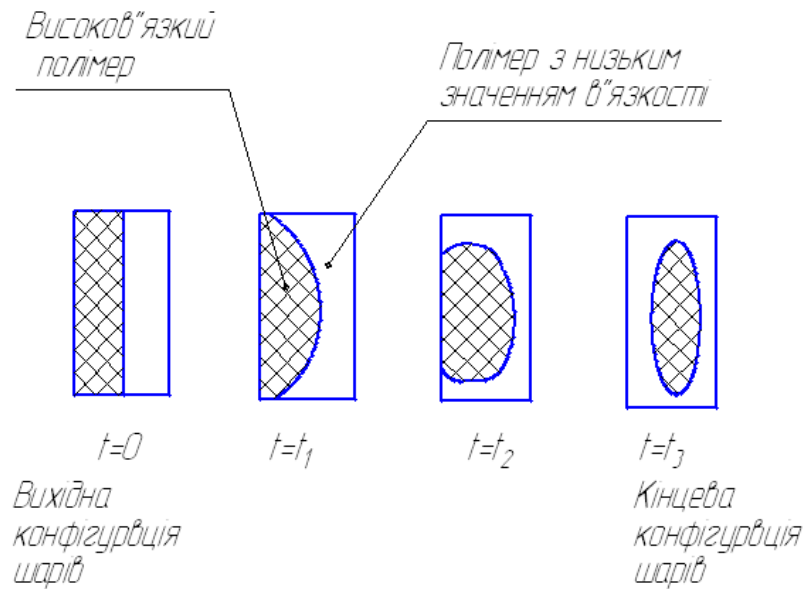


Рис. 1.19. Ілюстрація інкапсулювання, яке викликане різницею в'язкостей

Міра викривлення поверхні залежить від довжини каналу. Якщо канал досить довгий, високов'язка рідина виявляється повністю інкапсульованою (рис. 1.19). Якщо ж канал короткий, тоді виникає проміжна ситуація, як це показано для моментів часу  $t_1$ , або  $t_2$  (рис. 1.19).

Викривлення поверхні розділу (рис. 1.19) викликане різницею в'язкості. Проте навіть коли полімери, що співекструдуються, мають однакову в'язкість, спостерігається викривлення поверхні [16]. Очевидно, існують і інші механізми поверхневих викривлень. Показано [16], що ефект викривлення поверхні розділу дійсно виникає при соекструзії полімерів з однаковими в'язкістними характеристиками. Це викривлення поверхні викликано різницею нормальної напруги при течії полімерного розплаву. Вказані результати отримані з використанням методу кінцевих елементів стосовно аналізу перебігу в'язкопружних середовищ, що дозволило передбачити ефект викривлення поверхні.

Інше пояснення явища викривлення поверхні розділу при соекструзії рідин з однаковою в'язкістю запропоновано автором Свабік [16]. Вони провели аналіз тривимірного потоку і показали, що навіть при соекструзії ньютонівських рідин з рівною в'язкістю виникають викривлення поверхні розділу. Очевидно, що в цьому випадку викривлення поверхні не можуть бути викликані нормальною напругою, оскільки їх немає при перебігу ньютонівських рідин. Передбачений тип викривлень поверхні схематично показаний на рис. 1.20. Автори називають обговорюване явище «геометричним інкапсулюванням», що виникає в результаті чистов'язкої течії.

Геометричне інкапсулювання викликане існуванням параболічного профілю швидкостей у головці, оскільки швидкості максимальні в центральній зоні каналу, товщина шару в цій області збільшується, тоді як товщина зовнішніх шарів зменшується. Поблизу бічних стінок товщина внутрішнього шару зменшується, тоді як товщина зовнішніх шарів збільшується.

Викривлення, викликані геометричним інкапсулюванням, зростають у міру того, як в'язкість рідини знижується із збільшенням швидкості зсуву.

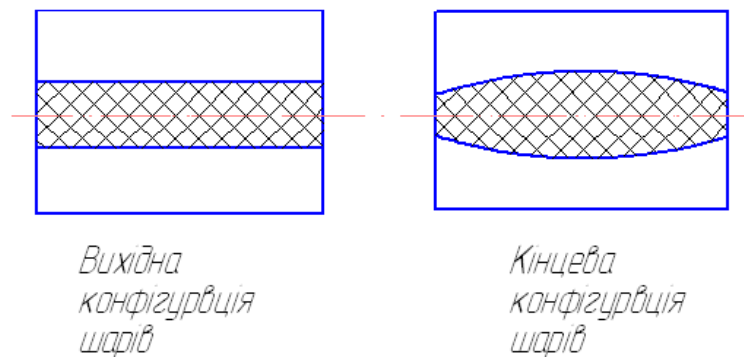


Рис. 1.20. Передбачення викривлення поверхні

Мабуть, існують різні механізми міжфазового викривлення поверхні. Це викривлення обумовлене різницею в'язкості («в'язке інкапсулювання»), викривлення під дією нормальної напруги в рідині («еластичне інкапсулювання»), і, нарешті, викривлення можуть виникати внаслідок різниці швидкостей у потоці рідини («геометричне інкапсулювання»). Очевидно, що викривлення поверхні посилюються, коли різниця в'язкості велика і нормальна напруга грає істотну роль.

Існують два способи зменшення викривлень поверхні розділу шарів. Перший полягає в зменшенні довжини контакту потоків різних розплавів. Цей підхід реалізується в багатоканальних головках, в яких потоки різних розплавів з'єднуються безпосередньо перед виходом з головки. Інший спосіб полягає в тому, що модифікується первинна конфігурація шарів так, щоб досягти необхідної остаточної конфігурації шару. Такий підхід називається профілізацією і часто використовується в соекструзійних системах з живильником (рис. 1.21) [16].

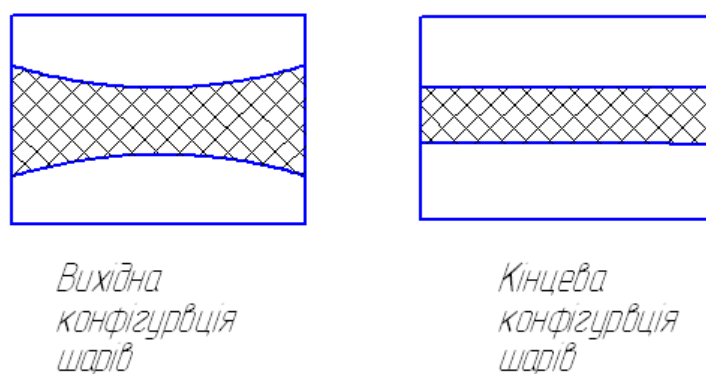


Рис. 1.21. Ілюстрація методу профілізації при соекструзії

Профілізація може бути використана в соекструзійних системах з живильником, а також в соекструзійних головках з лопатями (рис. 1.18). При тривимірному моделюванні течії можна передбачити характер перерозподілу шарів. Приклад такого підходу розглядався Пердікуліасом і ін. [16].

Аналіз конструкцій плоскощілинних головок дає можливість сформулювати основні вимоги, яким вони мають відповідати. До числа вимог



слід віднести:

1. Конструкція головки має забезпечувати трансформування поперечного перерізу потоку з метою надання йому форми виробу.

2. Конфігурація і геометричні розміри каналу головки профілюючої щілини і кути входу мають виконуватися з урахуванням розвитку високоеластичних деформацій у процесі формування, забезпечуючи прискорення релаксаційних процесів.

3. Конфігурація каналів головки має виключати різкі переходи та утворення зон застою.

4. Конструкція головки має забезпечувати якісне змішування і гомогенізацію розплавів полімерів.

5. Конструкція головки має бути досить міцною і забезпечувати при робочому тиску незмінний переріз проточної частини.

6. При екструзії високов'язких полімерів канали головки мають бути мінімального об'єму, а при переробці нетерmostійких матеріалів - забезпечити мінімальний час перебування полімеру в каналі.

7. При виборі конструкції головки необхідно враховувати й інші фактори: вартість, довговічність і складність виготовлення головки, можливість виробництва на ній різних по товщині плівок з різних марок полімерів, простоту її розбирання при чищенні. У ряді випадків необхідно забезпечити тривалу роботу без очищення. Робочі поверхні каналу головки мають бути з високою чистотою обробки і мати корозійне стійке покриття.

8. Конструкція головки повинна дозволяти регулювання розподілу об'ємної витрати по перерізу потоку і бути досить міцною, що забезпечить при робочому тиску незмінний переріз формуючої частини.

При всій важливості перерахованих вище вимог до плоскощілинних головок основною вимогою є забезпечення нею рівномірної товщини полімерної плівки по її ширині. Ця вимога вирішується раціональним конструюванням формуючих каналів головки. Тому, розробка оптимальної конструкції головки є важливою науковою задачею і має важливе практичне значення.

### **1.2.5. Фільтруючі пристрої екструзійних головок**

Складовою частиною більшості екструзійних головок (рис. 1.22) є грати 4, встановлювані на вході у формуючий інструмент 1, який кріпиться до циліндра 2 екструдера [1]. Грати створюють додатковий гідравлічний опір потоку, що покращує гомогенізацію (перемішування) розплаву полімеру. До грат кріпиться пакет сит 3 з певними розмірами отворів, який виконує функцію фільтра, що запобігає попаданню чужорідних включень в екструзійну головку. Крім того, за допомогою змінних грат з отворами різних діаметрів можна змінювати діапазон продуктивності екструдера, коли можливості регулювання швидкості обертання шнека обмежені.

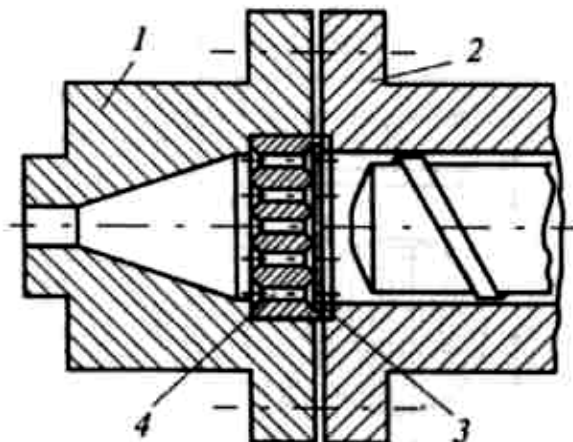


Рис. 1.22. Складові частини екструзійних головок

Від якості фільтруючих ґрат залежить надійність роботи всього екструзійного агрегату, а спосіб її очищення впливає на тривалість безперервної роботи простою.

Особливе значення конструкції фільтруючих ґрат мають в екструзійних установках для гранулювання порошкоподібних полімерних матеріалів, а також в установках для переробки вторинних полімерних матеріалів, в яких вірогідність забруднення особливо велика [1]. Фільтруючі ґрати не рекомендується застосовувати в установках для переробки термочутливих полімерів, оскільки із-за створення додаткових застійних («мертвих») зон різко збільшується вірогідність термічного розкладання полімерів.

Зазвичай застосовані в екструдерах фільтруючі ґрати мають порівняно невелику площу фільтруючої поверхні, що дорівнює площі внутрішнього перетину циліндра. Для збільшення площі фільтрації застосовують фільтруючі пристрої спеціальних конструкцій, принцип роботи яких розглядається нижче. Після забруднення фільтра агрегат зупиняється, головку демонтують, замінюють фільтруючі елементи, після чого доводиться наново налаштувати устаткування на заданий режим роботи.

Для зменшення часу простою устаткування, збільшення його продуктивності і зменшення втрат полімерних матеріалів, пов'язаних із заміною фільтруючих елементів і перезаправленням допоміжного устаткування, застосовують матеріали високої чистоти. Тому прості фільтри малопридатні для роботи в установках при переробці вторинних полімерних матеріалів. Взагалі прості фільтруючі ґрати по періодичності дії не відповідають безперервному процесу екструзії. У зв'язку з цим в даний час запропоновано велике число фільтруючих пристроїв, що забезпечують безперервність роботи екструзійних машин. Ці фільтри можна розділити на три групи, що принципово відрізняються один від одного: фільтри із змінними фільтруючими елементами, фільтри з періодичною промивкою фільтруючих елементів і фільтри з безперервною промивкою фільтруючих елементів [1].

На рис. 1.23 приведена принципова схема фільтра першої групи [1]. На плиті 5 розташовано два фільтруючі елементи 4, які працюють по черзі. Плита 5

з ґратами 4 змонтована на головці 2, причому регулювання зусилля притиску плити до корпусу головки здійснюється гайкою 3. Після забруднення одного з фільтруючих елементів плита з допомогою пневмо- або гідроциліндра 1 переміщається і вводить у роботу другий елемент. Переміщення плити здійснюється при ослабленні затягування гайки 3. Відпрацьований фільтруючий елемент видаляють, а на його місце встановлюють комплект з новим пакетом сит, після чого гайка 3 затягується. Після забруднення іншого елемента цикл повторюється.

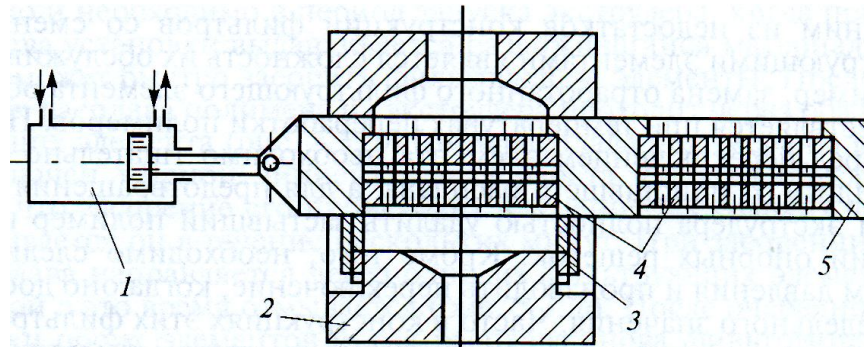


Рис. 1.23. Фільтр зі змінними фільтруючими елементами

Можливість забруднення фільтрів вказаного типу, отже, і тривалість роботи агрегату залежать в основному від забрудненості початкового полімеру і щільності пакету сит. Зазвичай тривалість роботи фільтра складає від 5 до 24 г. Час перемикання потоку розплаву полімеру із засміченого фільтруючого елемента на новий не перевищує 15 с.

Одним із недоліків конструкції фільтрів із змінними фільтруючими елементами є складність їх обслуговування. Наприклад, заміна відпрацьованого фільтруючого елемента зазвичай здійснюється при температурах переробки полімерів. Тому перед перемиканням елемента необхідно ретельно очистити плиту від розплаву, що пристав, а для запобігання зупинки екструдера повністю видалити застиглий полімер з отворів опорних ґрат. Крім того, необхідно стежити за зростанням тиску і проводити перемикання, коли воно досягає граничного значення. Часто в конструкціях цих фільтрів заміна фільтруючого елемента пов'язана з проривом фільтруючих сит. Іншим недоліком цих конструкцій є циклічна зміна тиску розплаву на кінці шнека від мінімального значення при установці нового фільтруючого елемента до максимального, коли елемент вважається повністю засміченим. Така зміна тиску спричиняє за собою нестабільність роботи екструдера і перш за все приводить до коливань продуктивності. До недоліків вказаних фільтрів слід віднести також і необхідність перезаправки комплектуючого устаткування після зміни фільтруючих елементів.

На рис. 1.24 наведена схема робочих положень фільтра з періодичним очищенням фільтруючих елементів [1]. У конструкції цих фільтрів при засміченні одного з елементів потік розплаву за допомогою розподільного крана прямує через інший елемент, в якому відбувається очищення розплаву. Основна частина очищеного розплаву поступає в екструзійну головку, а невелика частина його повертається і проходить через забруднений фільтруючий елемент у

протилежному напрямі (рис. 1.24,в). При цьому відбувається відмивання елемента від затриманих чужорідних частинок, що осіли на ньому. Брудний розплав відводиться з фільтра через зливний отвір.

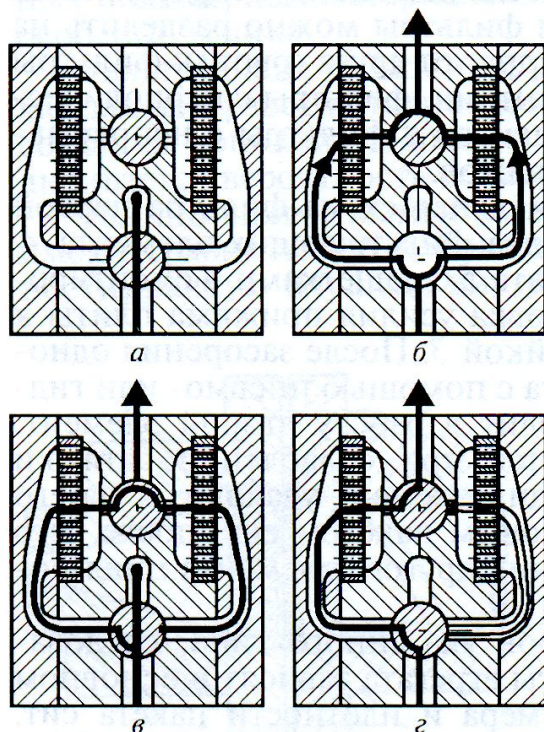


Рис. 1.24. Схема робочих положень фільтра з періодичним очищенням фільтруючих елементів

У цих фільтрах за допомогою кранів здійснюється шість робочих операцій. Спочатку весь потік розплаву з екструдера відводиться через зливний отвір (рис. 1.24, а), що особливо важливе і необхідне в період запуску екструдера, коли після розігрівання установки видавлюється матеріал, що розклався, який може швидко засмітити фільтруючі елементи. Після цього потік розплаву полімеру з екструдера проходить через обидва фільтруючі елементи (рис. 1.24, б) (шлях розплаву полімеру на рис. 1.24 позначений жирною лінією). Така робота фільтра обумовлена тим, що засмічення його відбувається протягом декількох годин, а відмивається він протягом декількох хвилин. При засміченні потік розплаву прямує через один з фільтруючих елементів, а другий в цей час відмивається (рис. 1.24, в). Після чергової промивки обох елементів потік розплаву знову фільтрується через обидва фільтри (рис. 1.24, б). Така конструкція дає можливість зняти засмічений фільтруючий елемент (рис. 1.24, г) і замінити його комплектом з новим пакетом сит, а також встановити фільтруючий елемент з іншою щільністю пакету сит при переході на інший вид роботи без зупинки екструзійного устаткування [1]. Перемикання фільтра з одного положення в інше здійснюється без розриву потоку розплаву полімеру у формуючому інструменті і відбувається протягом декількох секунд.

Фільтри, що працюють за даним принципом, забезпечують безперервну роботу екструдера протягом тривалого часу, без зупинки для перезавантаження комплектуючого устаткування.

Недоліками таких фільтрів є складність в експлуатації, а також циклічний характер зміни тиску розплаву в головці і пов'язана з цим пульсація продуктивності [1].

На рис. 1.25 показаний фільтр з безперервною промивкою фільтруючого елементу, який складається з корпусу 1, 2 і фільтра 5, що обертається ротором 4. У цій конструкції фільтруючий елемент 3 обертається від індивідуального електроприводу. Фільтр працює таким чином: розплав з екструдера по каналу А проходить область фільтруючого елементу 3, де очищається від частинок чужорідних включень і нерозплавлених частинок полімеру. Ці частинки осідають на пакет сит. Очищений розплав поступає в камеру В. Тут основна частина потоку проходить у вихідний отвір С і прямує до формуючого інструменту екструдера. Інша частина потоку очищеного розплаву з камери В проходить фільтруючий елемент в області *a* в протилежному напрямі. При цьому відбувається вимивання сторонніх частинок, що осіли на сітках, і відмивання фільтруючого елементу. Забруднений розплав виводиться через канал D. Електропривід, обертаючи фільтруючі ґрати, безперервно вводить в зону фільтрації очищені, а в зону очищення забруднені ділянки фільтруючого елементу. Таким чином, фільтрація розплаву і очищення фільтруючого елементу проводяться одночасно і безперервно. Така конструкція фільтра дозволяє стабілізувати всі параметри роботи екструдера при повному очищенні матеріалу, що переробляється, від чужорідних включень або нерозплавлених частинок. Швидкість обертання диска з фільтруючими елементами визначається з умови, щоб час проходження частинок забрудненого розплаву від пакету сит до камери відбору D перевищував час проходження будь-якої точки диска через область очищення *a* фільтруючого елементу. Так, якщо швидкість обертання диска при вибраних геометричних розмірах визначається витратою розплаву полімеру, що поступає на промивку фільтруючих елементів, то при роботі екструдера об'єм злитого забрудненого розплаву необхідно підтримувати на певному рівні. Витрата розплаву полімеру на промивку фільтруючих елементів визначається тиском розплаву в каналі С і може регулюватися в межах 5—10 % від загальної продуктивності екструдера. Для зменшення витрати розплаву полімеру на промивку очищення фільтруючого елементу проводять періодично. З цією метою зливний отвір каналу D перекривають клапаном 5, який керується електромагнітом 6. Тривалість промивки елемента і частота циклів встановлюється оператором у залежності від забрудненості початкового матеріалу і вимог, що пред'являються до чистоти кінцевого продукту.

Термочутливі полімери не можуть перероблятися при роботі фільтра з диском, що обертається, по періодичній схемі, оскільки при перекритті вхідного отвору каналу D запірним клапаном 5 утворюється застійна область у зворотній камері.

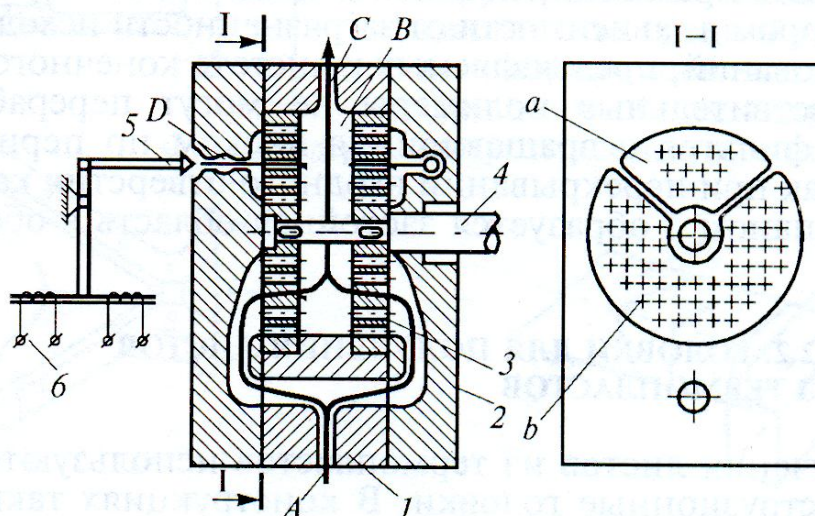


Рис. 1.25. Фільтр з неперервною промивкою фільтруючих елементів

### 1.3. Огляд та аналіз теоретичних методів розрахунку плоскощілинних головок

Розрахунок плоскощілинних головок є досить складним. На сьогоднішній день існують методики розрахунку геометричних параметрів плоскощілинних головок, які ґрунтуються на:

- рівнянні нерозривності, рівнянні руху для нестисливої неньютонівської рідини та граничних умовах, що враховують геометрію головки. Слід відзначити, що розв'язання цих рівнянь для тривимірної задачі можливе тільки чисельним методом. Однак, як показує досвід рішень задач такого класу, чисельний метод має кілька істотних недоліків. Це вибір різницевої схеми, яка б забезпечувала збіжність і стійкість отриманого рішення, а також складність поєднання різницевої схеми з граничними умовами [1,12,36-41];

- реологічних рівняннях стану полімеру, які визначають залежність між складовими тензорів напруження та швидкостей деформацій. У загальному випадку тривимірної течії рідини залежності між складовими тензорів напруження та швидкостей деформацій досить складні і їх визначення, навіть за допомогою комп'ютера, практично неможливе. На практиці обмежуються дослідженнями та описом одномірної течії рідини, що значно знижує практичну цінність отриманих результатів [1,12,38-44];

- рівняннях, які отримують дослідним шляхом. Дана методика має істотний недолік. Отримані рівняння справедливі для дуже вузького діапазону змінюваних параметрів і практично не враховують реологічних особливостей полімеру, який використовується [1,13,19,28,36];

- відомих рівняннях для простих геометричних об'єктів, які враховують реологічні особливості полімеру. В якості таких використовують рівняння руху полімеру в трубі, щілині й конусі, які отримані аналітичним методом з рівнянь Нав'є-Стокса для зазначених об'єктів [1,36-40,48,51].

Бернхардт Э. [62] запропонував емпіричний метод розрахунку листових трикутних головок типу «риб'ячий хвіст» для степеневого закону течії полімеру.

Метод дозволяє розрахувати геометричні розміри головки, при яких коефіцієнт рівнотовщинності наближається до одиниці. Коефіцієнт рівнотовщинності визначається відношенням питомої витрати на краю щілини до питомої витрати в центрі щілини. Слід відзначити, при визначенні висоти розподільчих каналів не враховується кінцева товщина плівки, що є недоліком цього методу.

Вперше аналітично обґрунтував процес проектування трикутних головок при течії неньютонівських рідин Рябинін Д.Д. [14]. Метод має обмеженість застосування, тому що дозволяє визначити профіль і розміри каналу головки тільки при співвідношенні діаметра колектора до висоти перехідної щілини 2:1 і при малих кутах нахилу колекторів головки.

Розрахункові залежності для визначення профілю розподільної ділянки трикутної головки рівного опору, яка має змінну висоту по ширині каналу, приведені в роботах Каплуна Я. Б. та Кима В. С. [1,51]. В якості реологічного рівняння використано «степеневий закон». Викладки розрахункових співвідношень виконані на основі закономірностей течії в плоскій щілині. Практична цінність запропонованого методу істотно знижується через припущення про одномірний характер течії розплаву полімеру.

При профілюванні каналів головок для отримання якісних виробів, окрім рівності швидкостей на виході з формуючої щілини, необхідно забезпечувати відсутність застійних зон, в яких може бути термодеструкція полімеру. З цією метою на торцях колекторного каналу необхідно робити закруглення [14,36,51]. Рябинінім Д. Д. [14] запропоновано метод профілювання ділянки трикутної головки з урахуванням закруглення, що відповідає практиці конструювання головок.

На рис. 1.26 представлено розрахункову схему каналу плоскощілинної головки, яка забезпечує вирівнювання швидкостей на виході й відсутність застійних зон [1,51]. При виведенні розрахункових залежностей прийнято, що протікання матеріалу від точки **O** до формуючої щілини **mc** іде по траєкторіях, які збігаються за формою з боковою гранню каналу **om**, тобто по лінії, яка утворена прямою, розташованою під кутом  $\varphi$  до осі головки і колом радіуса  $R$ , за умови, що центр всіх радіусів знаходиться на лінії **mc**.

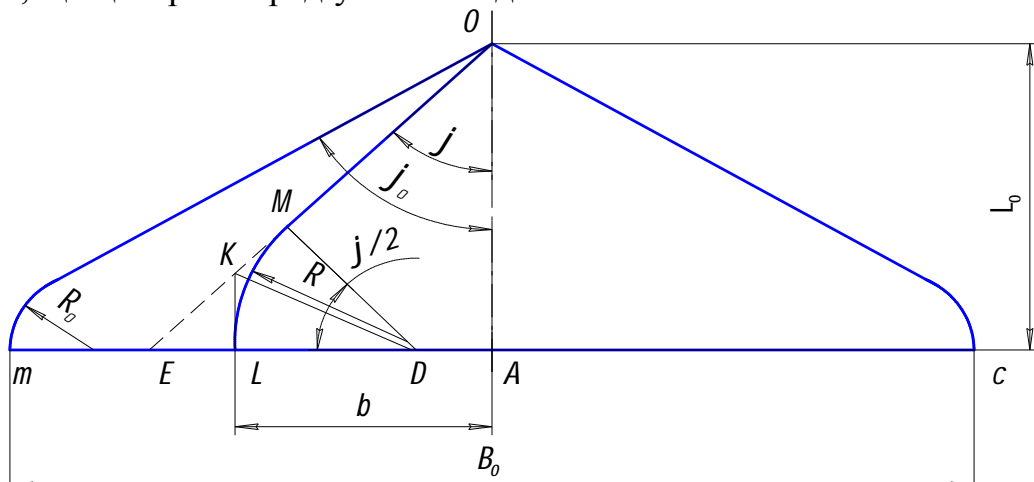


Рис. 1.26. Розрахункова схема плоскощілинної головки

Різниця довжин траєкторій OE і OL з закругленнями на торцях колектора

визначається за рівнянням [1,51]:

$$\Delta l = R \left( \operatorname{tg} \varphi - \frac{\pi \varphi}{360} \right), \quad (1.1)$$

де  $\Delta l$  – різниця довжин траєкторій OE і OL;  $R$  – радіус закруглення траєкторії руху полімеру;  $\varphi$  – кут розташування прямої OM до осі головки.

Для забезпечення рівномірності виходу матеріалу використовуються умови рівності витрат полімеру, внаслідок цього маємо:

$$b = B_0 \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_0}, \quad (1.2)$$

де  $b$  – поточна координата від осі головки до точки L;  $B_0$  – ширина головки;  $\varphi_0$  – кут розташування прямої OM до осі головки.

Виражаючи з цього рівняння значення кута  $\varphi$  і підставляючи його у вираз (1.1), отримуємо:

$$\Delta l = \left( L_0 - B_0 \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_0} \right) \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} \left( \operatorname{tg} \varphi - \frac{\pi \varphi}{180} \right), \quad (1.3)$$

де  $L_0$  – висота головки.

Розрахунок опору нескінченного сектора, який має малу товщину і розташований під кутом  $\varphi$  до осі головки при протіканні неньютонівської рідини з урахуванням, що  $B_0 = 2l_0 \operatorname{tg} \varphi_0$  проводиться за формулою [1,14,51]:

$$P = 2\tau_0 \left( \frac{3KQ}{\gamma_0 \operatorname{tg} \varphi_0} \right)^n \frac{1}{1-n} \left( \frac{1}{\cos \varphi} \right)^{n+1} \left( \frac{1}{h_0} \right)^{2n+1} (l_0^{1-n} - l_1^{1-n}), \quad (1.4)$$

де  $P$  – опір нескінченного сектора;  $\tau_0$ ,  $K$ ,  $\gamma_0$ ,  $n$  – реологічні константи;  $Q$  – витрати через головку;  $h_0$  – товщина щілини нескінченно вузького сектора;  $l_0$ ,  $l_1$  – ліва та права довжина пересіченої частини сектора.

Формулу (1.4) використовують для розрахунку головки із закругленнями. При цьому враховується, що довжина траєкторій в головці буде менше на величину  $\Delta l$ . Цей метод розрахунку не враховує геометричних розмірів колекторів та різниці опорів руху полімеру по різних траєкторіях у формуючих каналах головки.

Інший метод розрахунку і профілювання каналів плоскощілинних головок також наведено Рябинінім Д. Д. [14]. Основні розміри розподільчої дільниці визначаються за формулами:

$$h_1 = \sqrt[2n+1]{2\tau_0 \left( \frac{6KQ}{\gamma_0 B_0} \right) \frac{l_0}{1-n} \cdot \frac{1}{(\cos \varphi_0)^{n+1}} \cdot \frac{1}{P_0}}, \quad (1.5)$$

де  $h_1$  – товщина колектора;  $\tau_0$ ,  $\gamma_0$  – реологічні константи відповідно;  $K$  – безрозмірний коефіцієнт;  $Q$  – витрати через головку;  $l_0$  і  $B_0$  – довжина і ширина розподільчої дільниці каналу;  $n$  – тангенс кута нахилу логарифмічної кривої залежності напруження зсуву від швидкості зсуву полімеру, який перероблюється;  $\varphi_0$  – половина кута розчинення розподільчої дільниці;  $P_0$  – опір



розподільчої ділянки.

$$h_2 = \sqrt[2n+1]{2\tau_0 \left( \frac{6KQ}{\gamma_0 B_0} \right)^n \frac{(l_0 - l_0^n l^{1-n})}{(1-n)(P_0 - P_1)}}, \quad (1.6)$$

де  $h_2$  – товщина щілини вузької ділянки каналу;  $l_1, l$  – відстань від вершини кута  $2\varphi_0$  до лінії, що розділяє колектор і ділянку каналу зменшеної товщини відповідно по центральній осі головки і по лінії, яка розташована під кутом  $\varphi$  до цієї осі;  $P_1$  – опір на довжині  $l$ .

$$l = \sqrt[1+n]{\frac{\frac{P_0}{2\tau_0} (1-n)(\cos\varphi)^{n+1} \left( \frac{\gamma_0 B_0}{6KQ} \right)^n - \left( \frac{1}{h_2} \right)^{2n+1} l_0}{l_0^n \left( \frac{1}{h_1^{2n+1}} - \frac{1}{h_2^{2n+1}} \right) (\cos\varphi)^{1-n}}}. \quad (1.7)$$

За формулою (1.5) може бути визначена товщина  $h_1$  розподільчого каналу для випадку її неперервної зміни по ширині головки, якщо замість кута  $\varphi_0$  підставляти величину поточного кута  $\varphi$ , а замість товщини колектора  $h_1$  – поточну товщину  $h$ . При цьому, величина  $h$  буде відповідати товщині розподільчої ділянки по лінії, яка розташована під кутом  $\varphi$  до осі головки і проходить через вершину кута  $2\varphi_0$ . Поперечний переріз каналу такої головки схематично представлено на рис. 1.27.

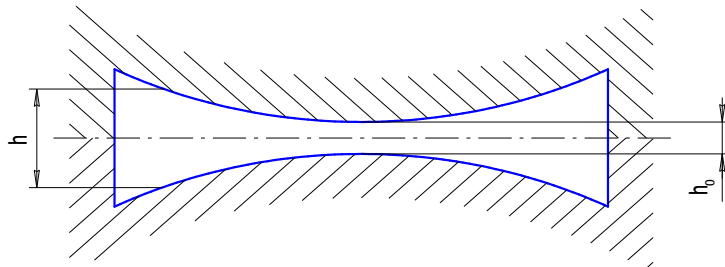


Рис. 1.27. Схематичний розріз трикутної ділянки головки змінної товщини

Однак використання рівняння (1.5) для профілювання головки недоцільно через його громіздкість. Враховуючи, що кут  $\varphi$  дорівнює нулю, автор Рябинін Д. Д. [14] отримав:

$$h_0 = \sqrt[2n+1]{2\tau_0 \left( \frac{6KQ}{\gamma_0 B_0} \right)^n \frac{l_0}{1-n} \cdot \frac{1}{P_0}}. \quad (1.8)$$

Товщина щілини на краю головки визначається через її товщину на осі:

$$h = h_0 (\cos\varphi)^{-\left(\frac{n+1}{2n+1}\right)}. \quad (1.9)$$

Таким чином, профілювання формуючих каналів головки зі змінною по ширині головки товщиною щілини зводиться до визначення за рівнянням (1.8) товщини щілини по центральній осі головки і наступному знаходженні за рівнянням (1.9) величин  $h$ , які відповідають різним заданим величинам кута  $\varphi$ . В

рівняння (1.9) входить тільки один параметр, який не є геометричним, це  $n$  – тангенс кута нахилу логарифмічної кривої залежності напруження зсуву від швидкості зсуву.

Існують також методи розрахунку плоскощілинних головок так званого рівного опору. Серед них можна виділити три методи [1]:

- метод зміни довжини оформлюючих губок;
- метод зміни висоти щілини;
- розрахунок трикутних плоскощілинних головок рівного опору.

Розглянемо послідовно всі три вказані методи.

**Метод зміни довжини оформлюючих губок.** Для розрахунку плоскощілинних головок необхідне точне знання закономірностей течії розплавів полімерів через ці головки. Проте для неньютонівських рідин в даний час кількісному аналізу піддається лише одновимірний потік, що має місце тільки в циліндрових каналах і в плоских щілинах нескінченної ширини. Доведено [1,50], що якщо ширина щілини не менше ніж в 13 разів більша її висоти, то потік через таку щілину можна вважати одновимірним. Оскільки у плоскощілинних головках, що застосовуються при виробництві листів із термопластів, відношення ширини щілини до її висоти набагато перевищує число 13, то при виведенні розрахункових рівнянь потік через ці головки можна розглядати як одновимірний.

При проектуванні і розрахунку плоскощілинних головок найбільш важким є завдання вирівнювання швидкості виходу екструдату по ширині головки. У таких головках швидкість виходу екструдату по центру вища, ніж по краях, а оскільки екструдат відбирається з однаковою лінійною швидкістю по ширині головки, то лист в середині виходить товстішим, ніж на краях. Таким чином лист буде мати різнотовщинність по його ширині. Приймаючи потік через плоскощілинні екструзійні головки одновимірним, можна вивести рівняння, що дозволяють розрахувати точний профіль каналу, що забезпечує рівність гідравлічних опорів на всіх напрямках, від зони живлення головки (входу в головку) до вихідної щілини. При виведенні основних рівнянь для розрахунку і проектування плоскощілинних екструзійних головок рівного опору розплав полімеру розглядається [1,50] як рідина, що підкоряється степеневому закону вигляду:

$$\dot{\gamma} = a\tau^k.$$

Тоді потік через плоску щілину виразиться рівнянням:

$$Q_0 = \frac{aLh^{k+2}p^k}{2^{k+1}(k+2)l^k}, \quad (1.10)$$

де  $a$  і  $k$  – реологічні константи;  $p^k$  – тиск на вході в головку;  $h^{k+2}$  – висота щілини;  $L$  – ширина щілини, тобто листа;  $l$  – довжина оформлюючих губок.

З рівняння (1.10) знаходимо вираз для довжини оформлюючих губок:

$$l = \left[ \frac{aLh^{k+2}}{2^{k+1}(k+2)Q_0} \right]^{\frac{1}{k}} p. \quad (1.11)$$

З останнього виразу видно, що якщо довжина щілини (губок) пропорційна тиску розплаву полімеру в усіх точках по довжині головки, то можуть бути отримані абсолютно однакові швидкості екструзії по ширині головки [1,50]. Це означає, що продуктивність на одиницю ширини головки постійна, тобто  $dQ_0/dz$  ( $z$  — координата, співпадаюча з віссю колектора) стає рівною  $Q_0/L$  (рис. 1.28). Необхідно знайти рівняння, що зв'язує довжину губок  $l$  з координатою  $z$ , яка направлена вдовж осі колектора головки. З цього рівняння можна було б отримати таблицю величин, зв'язаних залежністю  $l=f(z)$ , яка необхідна для проектування головки рівного опору. Сумісний розгляд потоку через колектор 1 і плоску щілину 2 і припущення про однакову швидкість екструзії по ширині головки приводять до диференціального рівняння такого вигляду [1,50]:

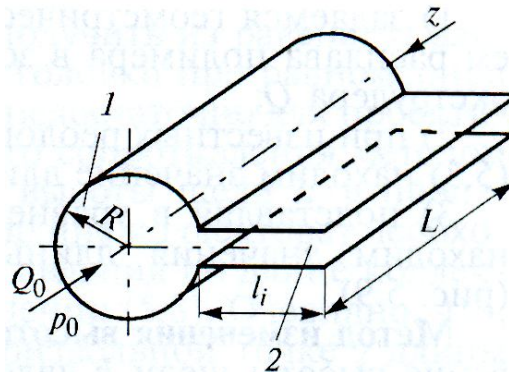


Рис. 1.28. До розрахунку плоскощілинної головки рівного опору

$$dl = \left[ \frac{(k+3)h^{k+2}}{2\pi R^{k+3}(k+2)} \right]^{\frac{1}{k}}. \quad (1.12)$$

Після інтегрування останнього рівняння в межах від  $l$  до  $l_i$ , та від  $z$  до  $L$  і перетворень отримаємо:

$$l = l_i - \left[ \frac{(k+3)L^{k+1}h^{k+2}}{2\pi R^{k+3}(k+3)} \right]^{\frac{1}{k}} \frac{k}{k+1} \left[ 1 - \left( \frac{z}{L} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right], \quad (1.13)$$

де  $l$  — довжина губки в довільній точці  $z$  довжини колектора;  $z$  — координатна вісь, направлена по осі колектора в бік, протилежний потоку розплаву полімеру; при цьому  $z$  збільшується від нуля на глухому кінці колектора до  $L$  у зони живлення (на вході в колектор);  $l_i$  — довжина губки в зоні живлення;  $R$  — радіус колектора.

Рівняння (1.13) показує зміну довжини губок в залежності від координати  $z$ .

Для проектування плоскощілинних екструзійних головок рівного опору методом зміни довжини оформлюючих губок можна рекомендувати такий порядок розрахунку [1,50]:

- 1) задаємося геометричними розмірами колектора, тиском розплаву полімеру в зоні живлення  $p_0$  і продуктивністю екструдера  $Q$ ;
- 2) при відомих реологічних коефіцієнтах по рівнянню (1.11) знаходимо

значення довжини губок в зоні живлення  $l_i$ ;

3) підставляючи в рівняння (1.13) зростаючі значення  $z/L$ , знаходимо значення довжини губок  $l$  у довільних точках  $z$  (рис. 1.28).

**Метод зміни висоти щілині.** Практично тільки регулювання висоти щілини  $h$  є найбільш простим засобом для досягнення рівномірного виходу екструдату (листа) по ширині головки, особливо для існуючих головок. У таких випадках необхідне точне знання того, яке регулювання висоти щілини необхідне для досягнення рівномірної по ширині листа екструзії.

Припускаючи, що пружні ефекти відсутні, можна легко вивести рівняння для розрахунку такого співвідношення висот щілини в центрі і в довільних перетинах по ширині головки, яке забезпечило б рівність гідравлічних опорів для всіх елементарних струменів розплаву полімеру. Представимо для цього колекторну плоскощілинну головку як круглу трубу, відкриту з одного і закриту з іншого кінця, з подовжньою щілиною по всій трубі (рис. 1.7, 1.15 та 1.28). Допустимо, що початок координат знаходиться в нескінченності [1,50]. Цим самим ми як би виключаємо з розгляду вплив бічних стінок підвідного каналу. Розглядаючи течію розплаву полімеру через таку головку (рис. 1.28) [1,50], знаходимо, що елементарний потік в губках (у даній точці ширини головки) рівний:

$$q = \frac{azh^{k+2}p^k}{(k+2)2^{2+k}l^k}. \quad (1.14)$$

Припустимо, що потік в головці вирівняний, тобто елементарні потоки  $q$  в кожному перетині по ширині головки рівні один одному. Тоді  $q = const$  і  $dq/dz = 0$ .

Диференціюючи рівняння (1.14) отримаємо:

$$\frac{dz}{z} + \frac{dh^{k+2}}{h^{k+2}} + \frac{dp^k}{P_k} = 0. \quad (1.15)$$

Приймаємо такі граничні умови: на глухому кінці головки  $z = z_1 = \infty$ ;  $h = h_1$  і  $p = p_1$ ; на вході в головку (у зоні живлення)  $z = z_1 + L$ ;  $h = h_0$ ;  $p = p_0$ . Після інтеграції останнього рівняння у вказаних межах і перетворення з урахуванням того, що  $z_1 = \infty$ , отримаємо [1,50]:

$$\frac{h_0}{h_1} = \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{k}{k+2}}. \quad (1.16)$$

Такий самий вираз можна отримати із рівності елементарних потоків через центр і краї головки при рівномірній екструзії. Проте рівняння (1.16) ще недостатньо для проектування плоскощілинних головок рівного опору методом зміни висоти щілині. Для розрахунку висоти щілини  $h_i$  в довільних перетинах по ширині головки (довжині колектора) необхідне знання закономірності падіння тиску по довжині колектора, тобто знання величини  $p/p_0$  в рівнянні (1.16). Очевидно, що, підставляючи замість  $p_1$  тиск  $p_z$  в довільній точці  $z$  довжини колектора, по рівнянню (1.16) можна знайти висоту щілини  $h_z$  в цій же точці. Для розрахунку тиску в колекторі розглянемо потік розплаву полімеру.

При однаковій швидкості екструзії по ширині головки потік у колекторі виразиться таким чином:

$$Q_k = \frac{Q_0}{L} z, \quad (1.17)$$

де  $Q_0$  – загальний потік через головку (продуктивність);  $Q_0/L$  – потік на одиницю довжини колектора.

За початок координат приймаємо глухий кінець колектора головки (рис. 1.28). З іншого боку, потік через колектор (через круглий канал) головки рівний [1,50]:

$$Q_k = \frac{\pi a R^{k+3}}{2^k (k+3)} \left( \frac{dp}{dz} \right)^k. \quad (1.18)$$

Сумісним рішенням рівнянь (1.17) та (1.18) знайдемо, що:

$$\frac{\pi a R^{k+3}}{2^k (k+3)} \left( \frac{dp}{dz} \right)^k = \frac{Q_0}{L} z. \quad (1.19)$$

Для вирішення рівняння (1.19) приймаємо такі граничні умови: у довільній точці  $z$  тиск рівний  $p_z$ , а на вході в колектор  $z = L$ ;  $p = p_0$ . В результаті інтегрування рівняння (1.19) у вказаних межах і відповідного перетворення отримаємо:

$$p_z = p_0 - ML^{\frac{k+1}{k}} Q_0^{\frac{1}{k}} \left[ 1 - \left( \frac{z}{L} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right], \quad (1.20)$$

$$\text{де } M = \frac{2k(k+3)^{\frac{1}{k}}}{(k+1)(\pi a R^{k+3} L)^{\frac{1}{k}}}.$$

Підставляючи в рівняння (1.20) значення  $z$  від 0 до  $L$ , можна знайти відповідні ним величини тиску  $P_z$ . При  $z = 0$ , тобто на глухому кінці колектора, формула (1.20) набуває вигляду:

$$p_1 = p_0 - ML^{\frac{k+1}{k}} Q_0^{\frac{1}{k}}. \quad (1.21)$$

З рівнянь (1.20) і (1.21) видно, що закономірність зміни тиску по довжині колектора головки не залежить від розмірів підвідного каналу і дроселюючих пристроїв на шляху розплаву полімеру. Вплив останніх проявляється тільки на величинах тиску  $p_z$ ,  $p_0$  та  $p_1$ . З іншого боку, у виразі для коефіцієнта  $M$  входить константа реології полімеру  $a$ , залежна від температури переробки [1,50]. Це означає, що при зміні температури переробки буде інша закономірність зміни тиску по довжині колектора. Знаючи закономірність зміни тиску по довжині колектора, можна перейти до проектування плоскощілинної головки рівного опору методом зміни висоти щілини. Проектування плоскощілинних головок рівного опору вказаним методом слід вести за такою схемою [1]:

1. При постійній довжині оформлюючих губок  $l = l_1 = \text{const}$  знаходимо висоту щілини в зоні живлення. З рівняння (1.10) можна легко знайти залежність

тиску від висоти щілини:

$$h^{\frac{k+2}{k}} = \left[ \frac{aL}{2^{k+1}(k+2)Q_0 l^k} \right]^{\frac{1}{k}} p_0. \quad (1.22)$$

2. Визначаємо відношення тиску в довільній точці колектора  $p_z$  до тиску  $p_0$  на вході в головку. Рівняння для розрахунку  $p_z/p_0$  знаходимо з формули (1.20), розділивши для цього обидві її частини на  $p_0$ . Тоді маємо:

$$\frac{p_z}{p_0} = 1 - ML^{\frac{k+1}{k}} \frac{Q_0^{\frac{1}{k}}}{p_0} \left[ 1 - \left( \frac{z}{L} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]. \quad (1.23)$$

Підставляючи в останній вираз зростаючі значення  $z$ , отримаємо відповідне значення  $p_z/p_0$ .

3. При відомих значеннях  $p_z/p_0$  і константи реології  $k$  з рівняння (1.16) знаходимо висоту щілини у відповідній точці  $z$ . Тиск на вході в головку зазвичай задається проектувальником або легко розраховується сумісним рішенням рівнянь продуктивності екструдера і витрати через екструзійну головку.

**Розрахунок трикутних плоскощілинних головок рівного опору.** При розрахунку трикутних плоскощілинних головок рівного опору (головки типу «риб'ячий хвіст» [1,50]) течія розплаву полімеру в них розглядається як одномірна. Нерівномірний вихід екструдату в цих головках обумовлений трикутною ділянкою (рис. 1.29), до якої як би послідовно по всій ширині  $B$  головки приєднана оформлююча зона довжиною  $L$ . Розглянемо потік розплаву полімеру на ділянці шириною  $\Delta B$  (рис. 1.29) При цьому потік через центр головки рівний:

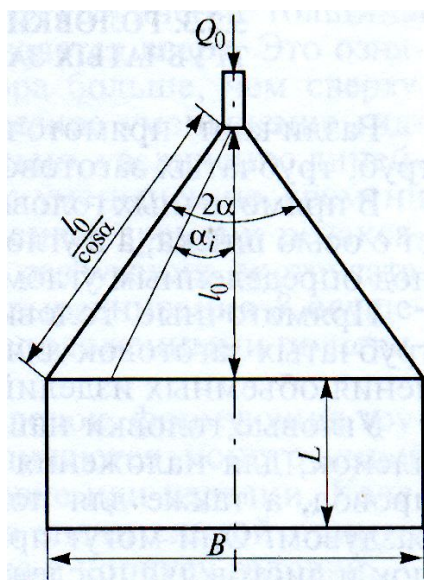


Рис. 1.29. Схема трикутної плоскощілинної головки

$$q_0 = \frac{a_0}{2^{k+1}(k+2)} \frac{\Delta B h_0^{k+2}}{(l_0 + L)^k} p_0^k. \quad (1.24)$$

Потік через край головки складає:

$$q_1 = \frac{a_1}{2^{k+1}(k+2)} \frac{\Delta B h_1^{k+2}}{\frac{l_0}{\cos \alpha} + L} p_0^k, \quad (1.25)$$

де  $p_0$  – тиск на вході в головку;  $\alpha$  – половина кута розкриття трикутної ділянки головки.

При ізотермічному процесі  $a_0 = a_1 = a$ .

Допустимо, що головка забезпечує рівномірний вихід екструдату по всій ширині головки  $B$ .

Тоді потік на одиницю ширини головки буде величиною постійною, тобто

$$q_0 = q_1 = q_i.$$

При сумісному вирішенні рівнянь (1.24) та (1.25) отримуємо таке рівняння:

$$\frac{h_0}{h_1} = \left( \frac{\frac{l_0 + L}{\frac{l_0}{\cos \alpha} + L}}{\frac{l_0}{\cos \alpha} + L} \right)^{\frac{k}{k+2}},$$

де  $l_0 + L$  – довжина щілистого каналу уздовж осі симетрії (рис. 1.29);  $l_0/\cos\alpha + L$  – довжина щілистого каналу по краях головки;  $h_0, h_1$  – висота щілистого каналу уздовж осі симетрії і на краю головки відповідно.

При заданій висоті щілини уздовж осі симетрії  $h_0$  і даних геометричних розмірах головки можна легко знайти таку висоту щілини на краю головки, при якій забезпечується рівномірний вихід екструдату по ширині головки. Підставляючи в рівняння (1.24)  $l_0/\cos\alpha_i$ , замість  $l_0/\cos\alpha$ , ми отримуємо висоту щілини  $h_i$  у напрямі довільних променів, проведених під кутом  $\alpha_i$  відносно осі симетрії.

В роботі Раувендаала К. [16] наведені результати Гермара для головки типу «вішалка», який, використовуючи закон гіперболічного синуса як рівняння стану для розплаву полімеру, отримав досить просте вираження для залежності радіусу розподільного каналу від відстані:

$$R(x) = R_0 \left( \frac{x}{b} \right)^{1/3},$$

а для довжини формуючого каналу –

$$L(x) = L_0 \left( \frac{x}{b} \right)^{2/3},$$

де  $x$  – відстань від краю головки;  $b$  – напівширина;  $R_0$  – радіус розподільного каналу в центрі;  $L_0$  – довжина зони попереднього формування в центрі.

### **Розрахунок «підковоподібної» екструзійної головки.**

Основною особливістю геометрії модифікованої головки типу «вішалка» є підковоподібний розподіл потоку у головці (рис. 1.30).

Якщо відношення ширини каналу  $W$  до глибини каналу  $H$  більше 10, то чинник форми стає незалежним від індексу течії. Геометрія такого розподільного каналу, зображена на рис. 1.30, з постійною шириною  $W$

описується формулами [16]:

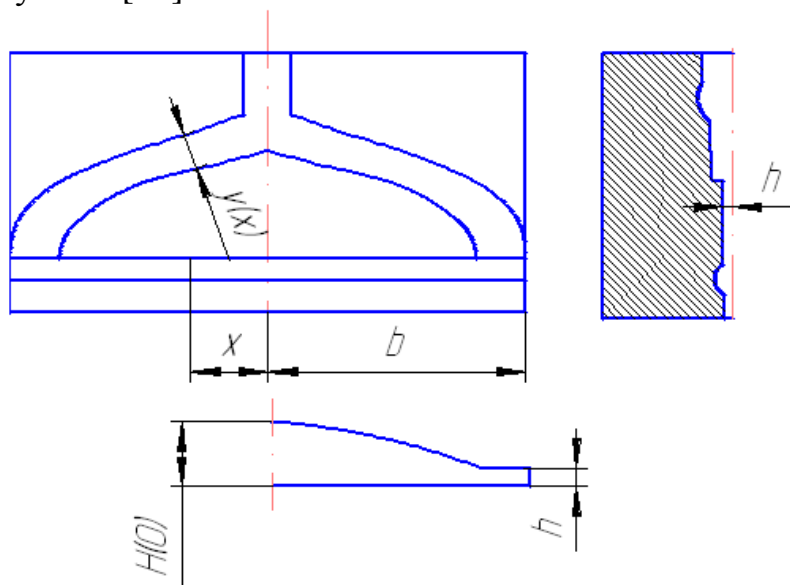


Рис. 1.30. Геометрія головки з підковоподібним розподільчим каналом

$$H(x) = h\sqrt{(b-x)/W} ;$$

$$y(x) = 2W\sqrt{(b-x)/W - 1}.$$

Для розподільного каналу з постійним відношенням  $W/h = a$  а профіль по глибині каналу описується формулою:

$$H(x) = h\left(\frac{b-x}{ah}\right)^{1/3},$$

а відповідна лінія контуру визначається співвідношенням

$$y(x) = \frac{3b}{2A} \left[ \left( \frac{1+g(x)}{g^2(x)} \right)^{1/2} - 0.5 \ln \left( \frac{\sqrt{1+g(x)-1}}{\sqrt{1+g(x)+1}} \right) \right] + C,$$

$$\text{де } g(x) = \frac{h^2}{F^{2n} H^2(x) - h^2}.$$

Постійна інтеграції  $C$  визначається умовою  $H(x)_{y=0} = h$ . Фронт-фактор  $A$  визначається як

$$A = \frac{F^{3n} b}{ah},$$

де  $F$  – фактор форми.

Якщо фактор форми прийняти рівним одиниці, то лінія контуру визначається як



$$y(x) = \frac{3}{2} ah \left[ \frac{\sqrt{1-\alpha^2}}{\alpha^2} - \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1-\sqrt{1-\alpha^2}}{1+\sqrt{1-\alpha^2}} \right) \right] + h,$$

$$\text{де } \alpha = \frac{h}{H(x)} = \left( \frac{ah}{b-x} \right)^{1/3}.$$

Недолік «підковоподібного» розподільного каналу в тому, що в ньому зона попереднього формування дуже довга, при цьому головка стає чутливішою до відділення щік в центральній частині унаслідок високого тиску розплаву полімеру всередині. З вказаної причини такий розподільний канал виявляється не дуже придатним для дуже широких головок, якщо в них виникає високий внутрішній тиск.

Існують й інші відомі методики розрахунку плоскощілинних головок авторів Торнера Р.В., Жданова Ю.А., Сокольського О.Л. [12,17,30,37-40,46,49,86,111,130]. Приведені вище методики не дозволяють визначити оптимальні геометричні розміри формуючих каналів та не враховують залежності в'язкості розплаву полімеру від температури, що є дуже суттєвим при розрахунку витрат в головці.

Проаналізувавши вище наведені методики та інші методики [46,115], згрупуємо їх таким чином (табл.1.2):

Групування методик розрахунку геометричних розмірів внутрішніх каналів головок дозволяє визначити для кожної групи недоліки, які властиві групі:

1. Для чисельного методу: а) складність стикування різницевих схем для прямокутних та циліндричних координат; б) складно забезпечити стійкість та збіжність різницевих схем.

2. Для методу кінцевих елементів: а) важко стикувати кінцеві елементи при переході від циліндричних систем до прямокутних; б) використання припущень по виду функцій току.

3. Для розрахунків, які засновані на емпіричних формулах: а) рівняння справедливі лише для вузького діапазону зміни параметрів; б) рівняння не враховують реологічних характеристик полімеру.

4. Методи, які засновані на поділі головки на прості фігури: а) на кожній ділянці невідомі перепади тиску, а отже, неможливо визначити на них витрати; б) не існує алгоритму поєднання ділянок.

Дослідження показало, що на сьогодні не існує науково обґрунтованої інженерної методики розрахунку плоскощілинної головки трикутного типу для отримання плівки з розплавів полімерів, реологічні властивості яких описуються «степеневим законом».

З вищенаведеного випливає, що сучасному виробництву необхідна головка, яка буде забезпечувати добре вирівнювання швидкостей розплаву полімеру на виході із головки, що дасть можливість отримувати більш тонку плівку. Завершальне вирівнювання швидкостей може бути забезпечене планкою, що деформується, яка розміщена за розподільчою ділянкою, або пружними губками.

Існуючі методи розрахунку плоскощілинних головок

Чисельні методи	Метод кінцевих елементів	Емпіричні формули	Ділення головки на прості фігури
$\nabla \vartheta = 0$ рівняння нерозривності	$\rho \frac{D\vartheta}{Dt} = -\nabla[\nabla\pi] + \rho q$ Рівняння тензору напруг полімеру	$L = \frac{P}{\mu} \left[ \frac{h^{n+2}(1+I_k)}{2^{n+2}(n+2)\bar{q}} \right]^{\frac{1}{n}}$	$q_{\text{цил}} = \frac{\pi \cdot R^{3+n}}{(n+3) \cdot \mu_0^n} \left( \frac{dp}{dx} \right)^n$ витрати для циліндра
$\rho \frac{D\vartheta}{Dt} = -\nabla P + \mu_0 \nabla^2 \vartheta + \rho q$ рівнянні руху (рівняння Нав'є-Стокса)	$\rho \frac{D\vartheta}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vartheta + \rho q$ рівнянні руху (рівняння Нав'є-Стокса)	$I_k = \left[ 1 - \frac{(1+0.05n)^{\frac{1}{n}} (\mu_0/\mu)^{1+\frac{1}{n}}}{n+1} \right]^n$	$q_{\text{щел}} = \frac{h^{n+2}}{(n+2) \cdot \mu_0^n} \left( \frac{dp}{dx} \right)^n$ витрати для щілини
<b>ПОЗНАЧКИ</b>			
$\vartheta$ - швидкість $\nabla$ - диференціальний оператор Набла; $\rho$ - щільність рідини; $t$ - час; $P$ - тиск; $\nabla^2$ - лапласіант ( $\nabla^2 = \nabla \cdot \nabla$ ) $\mu$ - динамічна в'язкість рідини; $q$ - прискорення вільного падіння	$\pi$ - тензор напруг складається із двох складових; $\tau$ - тензора-девіатора напруг, $P$ - тензор-скаляр тиску	$L$ - довжина губок профілюючої щілини $I_k$ - індекс різновшчинності $\bar{q}$ - середні витрати полімеру	$R$ - радіус труби; $n$ - індекс плинучості; $p$ - тиск полімеру; $\mu_0$ - ефективна в'язкість при малих значеннях швидкості деформації; $x$ - поточна координата. $h$ - ширина щілини

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ В'ЯЗКОЇ РІДИНИ В ФОРМУЮЧИХ КАНАЛАХ ПЛОСКОЩІЛИННОЇ ГОЛОВКИ

#### 2.1. Розробка математичної моделі руху полімеру в плоскощільній головці

Першою вимогою до конструкції плоскощільної головки є здатність рівномірно розподіляти розплав полімеру по всій її довжині, що визначається коефіцієнтом рівнотовщинності, який залежить від конструкції головки та від технологічних параметрів процесу. Тобто одна і та ж плоскощільна головка при різних технологічних параметрах процесу буде виробляти продукт з різними коефіцієнтами рівнотовщинності. До технологічних параметрів відноситься температура розплаву, тиск на вході в головку, швидкість формування плівки. При розробці математичної моделі течії розплаву полімеру у формуючих каналах плоскощільної головки зроблені такі припущення: розплав є нестисливою рідиною; течія розплаву полімеру ламінарна; гравітаційні сили настільки малі, що ними можна нехтувати; у місці контакту розплаву полімеру зі стінками головки немає проковзування.

Розплавлений полімер є неньютонівською рідиною, і основне рівняння, що описує його поведінку при різних швидкостях зсуву, має вигляд [17,36-41,48,66]:

$$\tau = \mu_0 \dot{\gamma}^n = \mu_0 \left( \frac{dv}{dx} \right)^n, \quad (2.1)$$

де  $\tau$  – напруження зсуву;  $\mu_0$  – "умовна" в'язкість розплаву полімеру;  $\dot{\gamma}$  – швидкість зсуву;  $n$  – індекс течії;  $v$  – швидкість течії полімеру;  $x$  – поточна координата.

При русі полімеру в трубі зміна перепаду тиску вздовж труби визначається рівнянням [36-40,66]:

$$-\frac{r dp}{2 dx} = \mu_0 \left( \frac{dv}{dr} \right)^n, \quad (2.2)$$

де  $r$  – поточний радіус труби;  $p$  – тиск полімеру.

Інтегруючи рівняння (2.2) і визначаючи постійну інтегрування з умови прилипання ( $v = 0$  при  $r = R$ ), одержимо залежність, що описує розподіл швидкостей при ізотермічній течії розплаву в круглому каналі [17,36-40,66]:

$$\frac{v(r)}{V} = \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right], \quad (2.3)$$

де  $V$  – швидкість розплаву на осі каналу;  $R$  – радіус труби.

Швидкість на осі каналу виражається співвідношенням [17,38-40,66]:

$$V = \frac{nR^{\frac{n+1}{n}}}{2^{1/n} \mu_0^{1/n} (n+1)} \left( \frac{dp}{dx} \right)^{1/n}. \quad (2.4)$$

Аналіз рівняння (2.3) показує, що у випадку ньютонівської рідини ( $n=1$ ) епюра швидкостей постійного потоку має форму параболи [17,38-40,66]. У міру зростання аномалії в'язкості форма епюри швидкостей міняється. У центральній частині потоку утворюється все ширша ділянка, у межах якої швидкість міняється незначно. Зміна профілю епюри швидкостей залежить від індексу течії  $n$ . Із зменшенням індексу течії картина проходження потоку все більше нагадує течію стержневого типу, при якому центральна частина потоку рухається, як твердий недеформований стержень, оточений шаром деформованої рідини.

Об'ємна витрата розплаву полімеру через поперечний переріз труби визначається з рівняння [17,37-41,66]:

$$Q_m = 2\pi \int_0^R v(r) dr = \frac{\pi n R^{\frac{3n+1}{n}}}{(3n+1)} \left( \frac{dp}{2\mu_0 dx} \right)^{1/n}, \quad (2.5)$$

де  $Q_m$  – об'ємна витрата розплаву полімеру через трубу.

У випадку сталої течії у плоскій щілині висотою  $2h$ , у якій вісь  $X$  збігається з віссю симетрії потоку, рівняння для визначення поля напруження  $P_{xy}$  зсуву полімеру набуває вигляду [17,38-40]:

$$P_{xy} = y \frac{dp}{dx}, \quad (2.6)$$

де  $P_{xy}$  – напруження зсуву;  $y$  – поточна координата від осі щілини.

Розподіл швидкостей описується виразом, аналогічним рівнянню (2.4) [17,38-40]:

$$v_{uz}(y) = V_{uz} \left[ 1 - \left( \frac{y}{h} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right], \quad (2.7)$$

де  $v_{uz}(y)$  – поточна швидкість полімеру на координаті  $y$ ;  $V_{uz}$  – швидкість на осі щілини;  $h$  – половина товщини щілини.

Швидкість  $V_{uz}$  на осі каналу дорівнює [38-40]:

$$V_{uz} = \frac{nh^{\frac{n+1}{n}}}{(n+1)} \left( \frac{dp}{\mu_0 dx} \right)^{1/n}. \quad (2.8)$$

Епюри напруження, швидкостей і градієнтів швидкості, визначені в площині, яка є нормальною по відношенню до напрямку потоку, будуть такими ж, як і у випадку течії по круглій трубі.

Величина об'ємної витрати через одиницю ширини плоскої щілини визначається виразом [17,38-40]:

$$Q_{щ} = \frac{nh^{\frac{2n+1}{n}}}{(2n+1)\mu_0} \left( \frac{1}{dx} \frac{dp}{dx} \right)^{1/n}, \quad (2.9)$$

де  $Q_{щ}$  – об'ємна витрата розплаву полімеру через щілину.

Для конічної труби об'ємні витрати визначаються виразом [66]:

$$Q_{к} = \frac{\pi\mu_0}{2^{2n+3}(n+3)} \left[ \frac{6\Delta P t g \alpha}{n \left[ \frac{1}{d_2^{3n}} - \frac{1}{d_1^{3n}} \right]} \right]^n. \quad (2.10)$$

де  $Q_{к}$  – об'ємна витрата розплаву полімеру через конічну трубу;  $\Delta P$  – перепад тиску на конічному каналі;  $d_1$  – більший діаметр конічної труби;  $d_2$  – менший діаметр конічної труби;  $2\alpha$  – кут конусності.

Рівняння (2.5, 2.9, 2.10) дозволяють визначити при відомих витратах перепад тиску або при відомому перепаді тиску – витрати в трубі, щілині або конічному каналі.

Для розрахунку плоскощілинних головок нами пропонується методика, яка оснований на розбивці головки на елементарні ділянки. Так, колектор розбивається на конусні труби різних діаметрів, а щілина, що утворена плитами, на плоскі прямокутні щілини рис. 2.1. З цих об'єктів можна одержати практично будь-який профіль каналів плоскощілинної головки. Основні геометричні позначення головки, які використовуються в математичній моделі, представлені на рис. 2.1. Для кожної ділянки можна записати рівняння об'ємної витрати полімеру через поперечний переріз ділянки, коли відоме значення перепаду тиску, або, навпаки, визначити перепад тиску, коли відоме значення об'ємної витрати. Слід відзначити, що для створення рівномірності витікання полімеру із головки кінцева губка (щілина В2) має всередині прогин на величину  $\Delta u$ .

У математичній моделі крім вищевказаних рівнянь, потрібно враховувати місцеві опори  $\Delta p_m$ , які виникають через звуження каналів, повороти та інше. Відомо, що місцеві опори розраховуються рівняннями виду [17,37-41]:

$$\Delta p_m = \xi \cdot \rho \frac{v^2}{2}, \quad (2.11)$$

де  $\Delta p_m$  – місцеві опори;  $\xi$  – коефіцієнт місцевого опору;  $\rho$  – щільність полімеру.

Система рівнянь, які будуть описувати рух полімеру в елементарних ділянках, з яких складається плоскощілинна головка, є невизначеною. Для більшості елементарних ділянок невідомі ні витрати, ні перепади тиску на них.

Потрібно мати ще рівняння, які зроблять систему статично визначеною. Такими рівняннями є рівняння балансу витрат в цілому для всієї головки:

$$Q_{BX} = 2 \sum_{i=1}^m q_{i2} \quad , \quad (2.12)$$

де  $Q_{BX}$  – витрати на вході у головку;  $q_{i2}$  – витрати на виході  $i$ -ї ділянки вузької прямокутної щілини;  $m$  – кількість розбивань половини головки на елементарні призми по ширині головки,

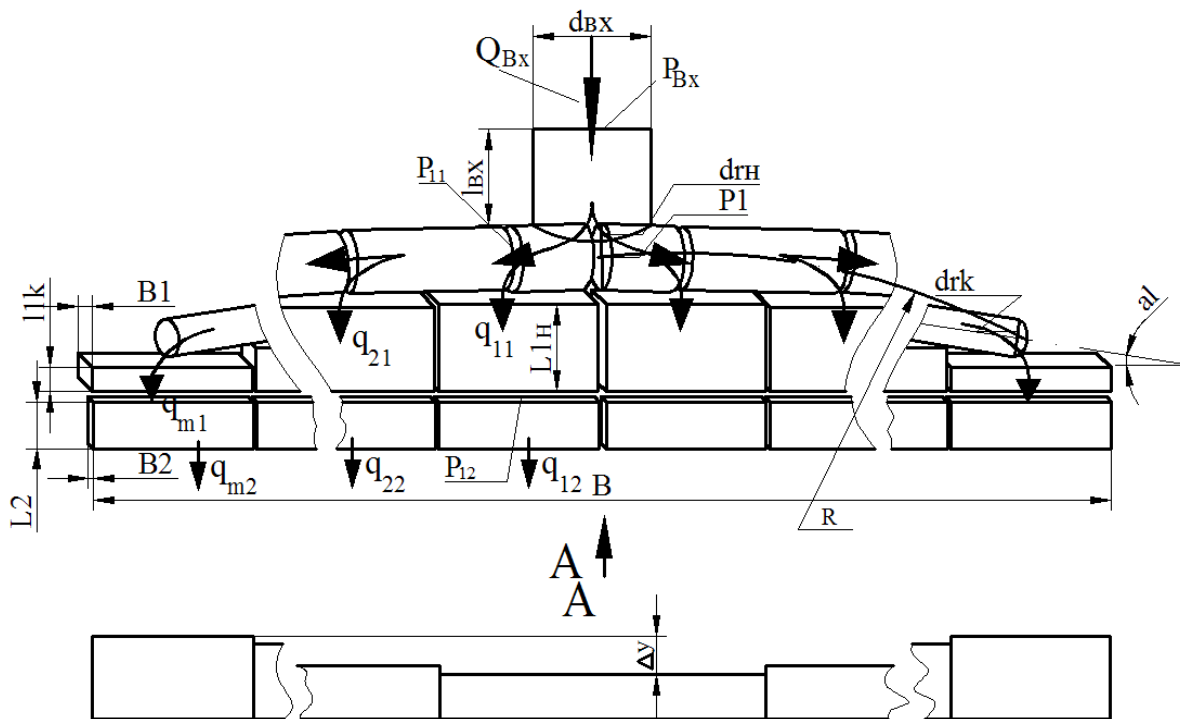


Рис. 2.1. Розрахункова схема плоскощілинної головки:

$d_{BX}$  – діаметр вхідного патрубка;  $Q_{BX}$  – вхідна об’ємна витрата;  $P_{BX}$  – вхідний тиск;  $l_{BX}$  – довжина вхідного патрубка;  $P1$  – тиск на вході у колектори;  $d_{гн}$  – діаметр рукава колектора на вході;  $d_{гк}$  – діаметр рукава колектора на виході;  $P_{11}$  – тиск в кінці першої ділянки колектора;  $P_{12}$  – тиск між перехідною та вузькою щілиною;  $\alpha$  – кут нахилу рукава колектора до горизонту;  $B1$  – товщина розподільчої щілини;  $B2$  – товщина вузької щілини;  $L1H$  – початкова висота перехідної щілини;  $l1k$  – кінцева висота розташування рукава;  $L2$  – висота вузької щілини;  $B$  – довжина головки;  $R$  – радіус кривизни колектора;  $\Delta u$  – прогин губки.

а також рівняння балансу витрат на окремих ділянках між широкою та вузькою прямокутними щілинами:

$$q_{i2} = q_{i1}, \quad i=1,2,\dots,m, \quad (2.13)$$

де  $q_{i1}$  – витрати на виході  $i$ -ї ділянки широкої прямокутної щілини.

## 2.2. Дослідження залежності реологічних характеристик розплаву полімеру від його температури

Як видно з математичного опису руху полімеру в каналах плоскощілинної головки, він залежить від в'язкості полімеру. На думку авторів [17,37-41,66,142], доцільно вивчити в'язкість полімерів, використовуючи графічну залежність напруження від швидкості зсуву  $\ln \tau = f(\ln \dot{\gamma})$  при різних значеннях температури в логарифмічних координатах (рис. 2.2).

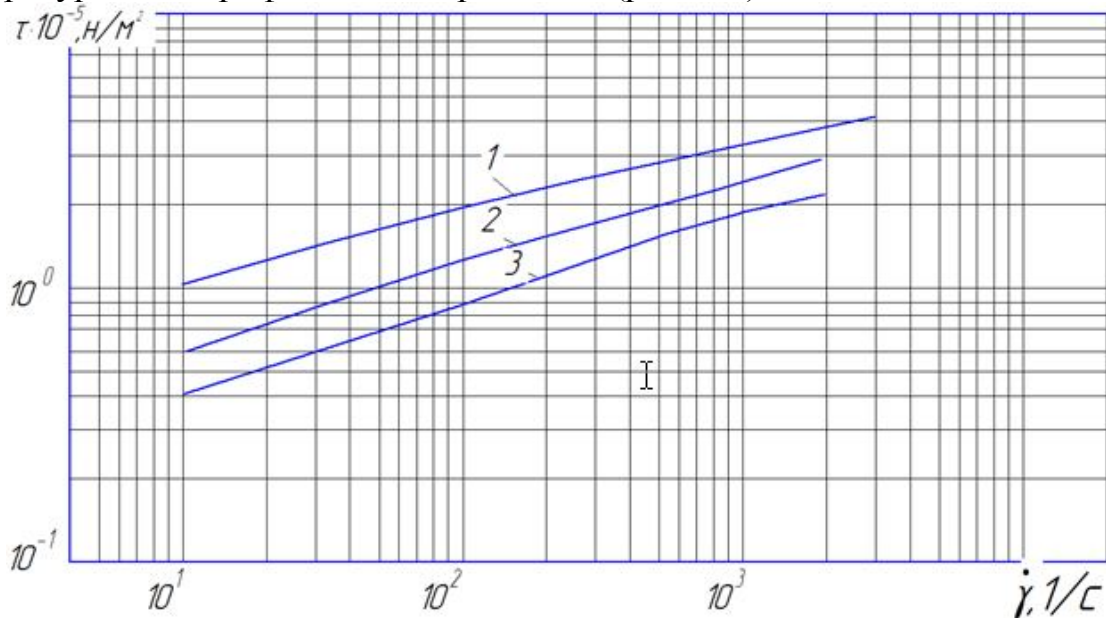


Рис. 2.2. Залежність напруження зсуву від його швидкості для поліетилену марки 20806-024:

1 –  $T_1 = 120^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T_2 = 150^\circ\text{C}$ ; 3 –  $T_3 = 180^\circ\text{C}$ .

Із графіків (додаток А) напруження від швидкості зсуву в логарифмічних координатах для різних марок поліетилену видно, що вони мають при різних температурах лінійну залежність, тому доцільно описати їх математичним виразом (2.1), який у логарифмічних координатах буде мати вигляд:

$$\ln \tau = \ln \mu_0 + n \ln \dot{\gamma} \quad (2.14)$$

Таким чином, для знаходження індексу течії  $n$  (тангенс кута нахилу прямих) потрібно мати дві точки на прямій графіка (рис. 2.2) при одній і тій же температурі:

$$n = \frac{\log \tau_1 - \log \tau_2}{\log \dot{\gamma}_1 - \log \dot{\gamma}_2} \quad (2.15)$$

де  $\tau_1, \tau_2$ , – значення напруження зсуву в першій і другій точках;  $\dot{\gamma}_1, \dot{\gamma}_2$  – значення швидкості зсуву в першій і другій точках.

З рівняння 2.14 знайдемо “умовну” в'язкість  $\mu_0$ , яка, як видно з рис. 2.2, залежить тільки від температури:

$$\ln \mu_0 = \ln \tau - n \ln \dot{\gamma} . \quad (2.16)$$

Використовуючи рівняння (2.16), розрахуємо “умовну” в’язкість  $\mu_0$  для різних температур (наприклад, для рис. 2.2 маємо три “умовні” в’язкості). Температурну залежність “умовної” в’язкості  $\mu_0$  від температури представимо у вигляді рівняння Арреніуса [17,37-41,66,142]:

$$\mu_0 = A \cdot e^{E/RT} , \quad (2.17)$$

де  $A$  – коефіцієнт, що залежить від виду полімеру;  $E$  – енергія активації течії;  $R$  – газова стала ( $R=1.98$  кал/моль);  $T$  – температура.

В рівнянні (2.17) невідомими є величини  $A$  і  $E$ , і для їх знаходження приведемо дане рівняння до вигляду:

$$E = \frac{R(\ln \mu_{01} - \ln \mu_{02})}{1/T_1 - 1/T_2} , \quad (2.18)$$

$$A = \frac{\mu_{01}}{e^{E/RT_1}} , \quad (2.19)$$

де  $\mu_{01}, \mu_{02}$  – “умовні” в’язкості при температурах  $T_1$  та  $T_2$ .

Для розрахунку індексу течії  $n$ , “умовної” в’язкості  $\mu_0$  для різних температур та швидкостей зсуву нами розроблена програма [115]. В результаті розрахунків за допомогою програми для різних типів полімерів отримано залежності індексу течії  $n$  від температури (рис. 2.3, рис. 2.4).

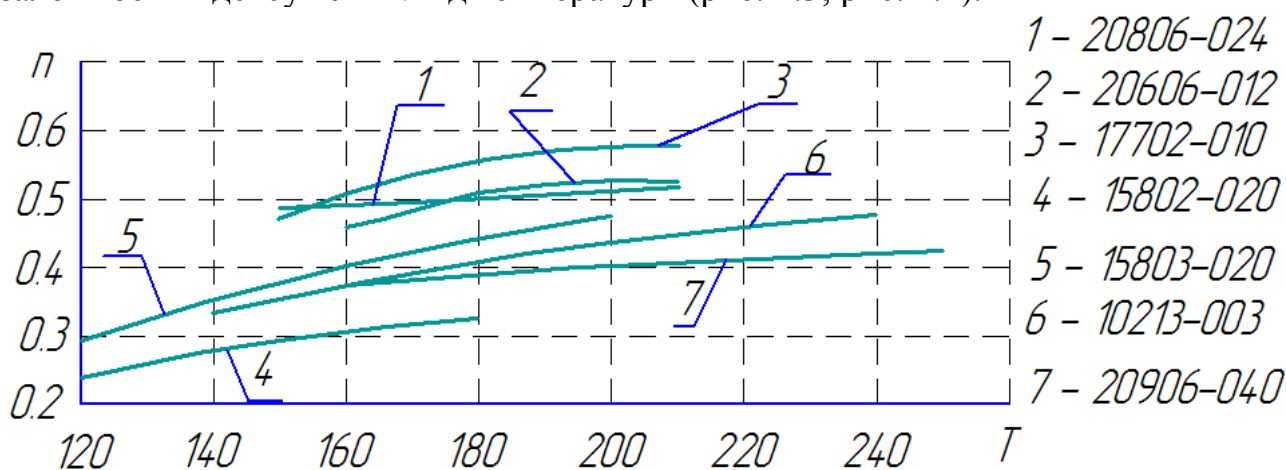


Рис. 2.3. Залежності індексу течії від температури для різних марок поліетилену

Як видно з графіків, індекс течії розплаву полімерів в значній мірі залежить від температури та має нелінійний характер. З нашої точки зору, графіки можливо апроксимувати квадратичним рівнянням типу [145]:

$$n = c \cdot T^2 + d \cdot T + z , \quad (2.20)$$

де  $c, d, z$  – безрозмірні коефіцієнти.



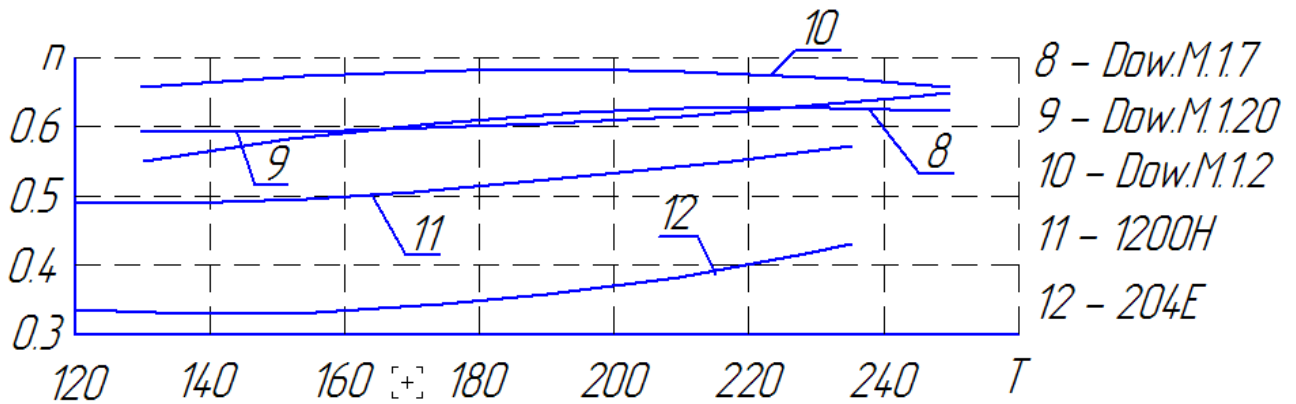


Рис. 2.4. Залежності індексу течії від температури для різних марок поліетилену

Безрозмірні коефіцієнти  $c$ ,  $d$ ,  $z$  знаходимо за рівняннями для трьох різних температур [145]:

$$d = \frac{(T_1^2 - T_2^2)(n_2 - n_3) - (T_2^2 - T_3^2)(n_1 - n_2)}{(T_1^2 - T_2^2)(T_2 - T_3) - (T_2^2 - T_3^2)(T_1 - T_2)}, \quad (2.21)$$

$$c = \frac{-d(T_1 - T_2) + (n_1 - n_2)}{T_1^2 - T_2^2}, \quad (2.22)$$

$$z = n_1 - c \cdot T_1^2 - d \cdot T_1, \quad (2.23)$$

де  $T_1, T_2, T_3$  – температури в трьох різних точках;  $n_1, n_2, n_3$  – індекси течії в трьох різних точках температур.

Таким чином, залежність напруження зсуву від його швидкості для різних температур має вигляд:

$$\tau = A \cdot e^{E/RT} \dot{\gamma}^{cT^2 + dT + z}. \quad (2.24)$$

Розрахунок коефіцієнтів  $c$ ,  $d$ ,  $z$ ,  $A$  та енергія активації течії  $E$  проводиться по експериментальним результатам залежності напруги зсуву від його швидкості. Проведені розрахунки дозволяють отримати рівняння залежності напруження зсуву від його швидкості та температури розплаву поліетилену для різних марок поліетилену. Вказані рівняння представлені в табл. 2.1. Порівняння даних, отриманих за графіками, які наведені авторами [17,37-41,66] (додаток А), та розрахованих за рівняннями, наведеними в табл. 2.1, показало, що похибка не перевищує 8%.

На рис. 2.5 представлені розрахункові залежності напруження зсуву від його швидкості для поліетилену марки 15802-020. Цей поліетилен застосовується при ламінуванні технічних паперів. Порівняння цих залежностей для вказаних температур із залежностями, наведеними на рис. 2.2, показує, що похибка не перевищує 5%.

Слід зауважити, що рівняння 2.24 дозволяє розрахувати напруження зсуву від його швидкості та температури і дозволяє побудувати цю залежність в просторових координатах у вигляді поверхні, рис. 2.6. Як видно з рисунку,

поверхня має складний просторовий вигляд.

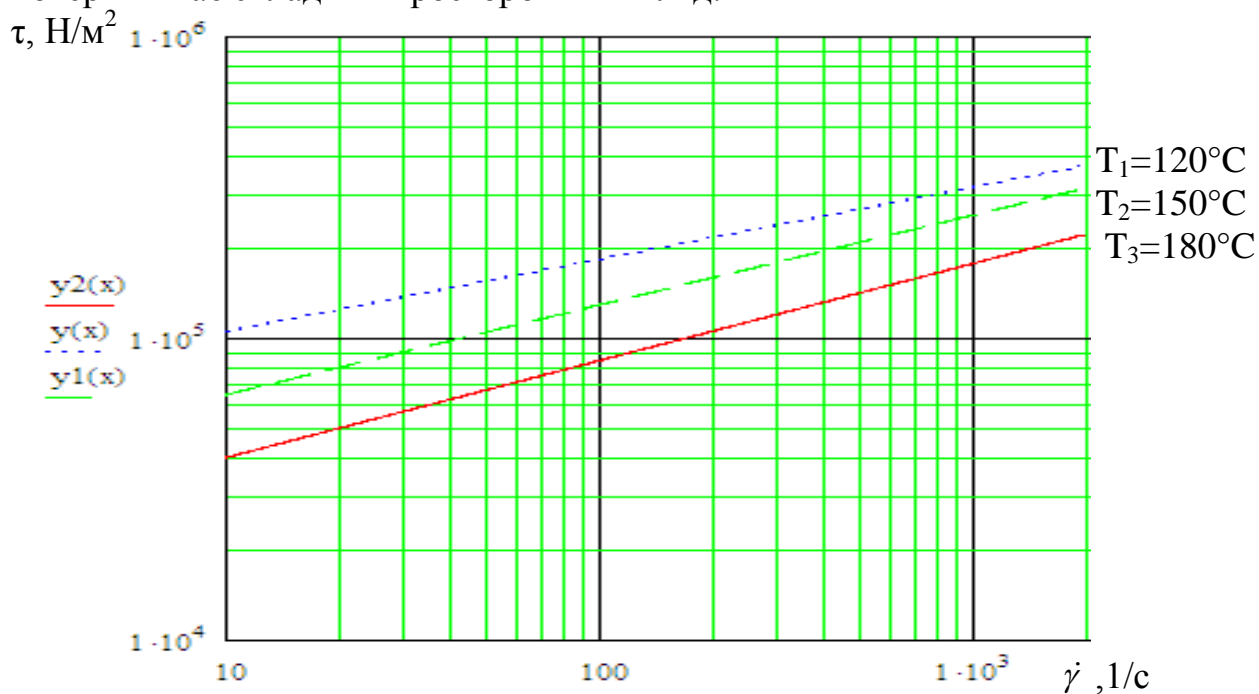


Рис. 2.5. Залежність напруження зсуву від його швидкості для поліетилену 15802-020

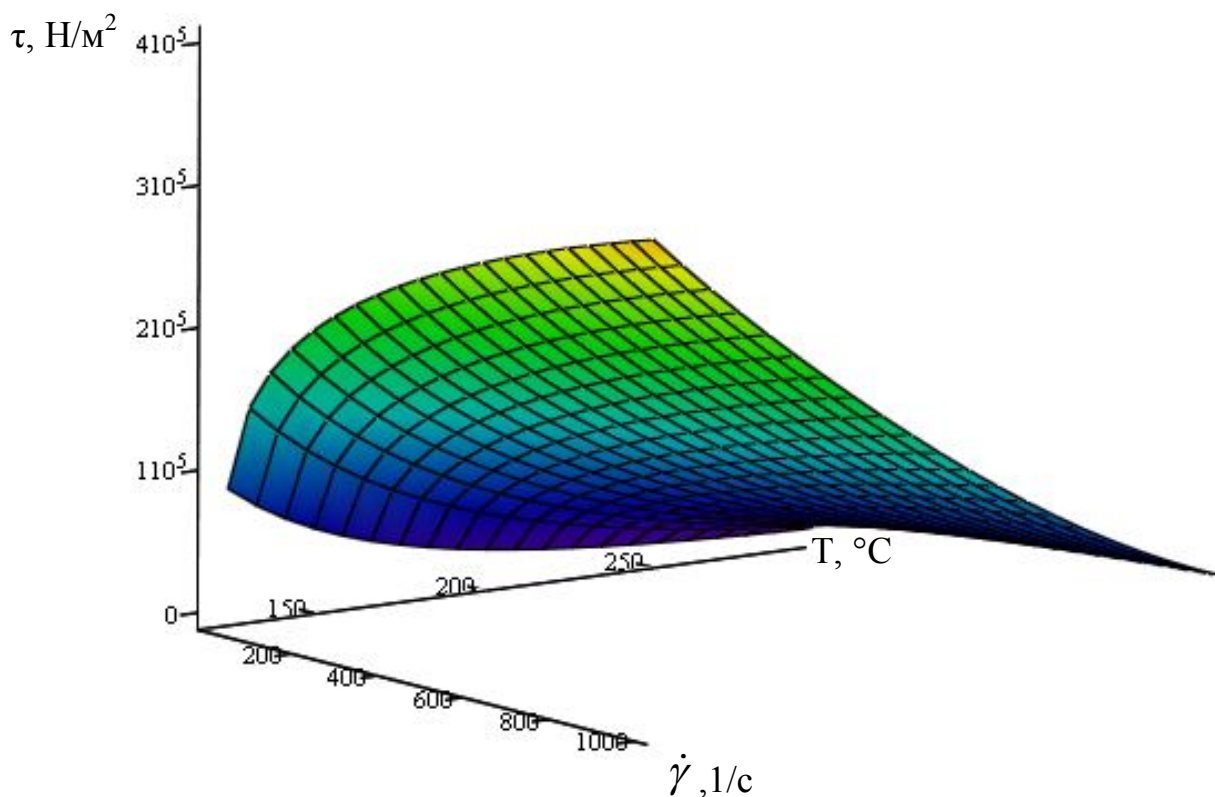


Рис. 2.6. Залежність напруження зсуву від його швидкості і температури для поліетилену 15802-020

Слід відмітити, що поліетилен марки 15802-020 частіше використовується при виробництві плівки і покриття нетканих матеріалів. Інші марки поліетилену не так часто застосовуються при виробництві покриття, але також

Таблиця 2.1

Рівняння для розрахунку умовної в'язкості розплаву полімеру і індексу течії від температури

№ р/р	Марка поліетилену	Рівняння для розрахунку умовної в'язкості від температури	Рівняння для розрахунку індексу течії від температури
1	Поліетилен 20806-024	$\mu_0 = 25.1 \cdot e^{4992.24 / (R \cdot (273 + T))}$	$n = 0.43 + 1.75 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1.25 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
2	Поліетилен 20606-012	$\mu_0 = 49.7 \cdot e^{4629.55 / (R \cdot (273 + T))}$	$n = -0.53 + 1.02 \cdot 10^{-2} \cdot T - 2.50 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$
3	Поліетилен 17702-010	$\mu_0 = 0.67 \cdot e^{8208.77 / (R \cdot (273 + T))}$	$n = -0.68 + 1.20 \cdot 10^{-2} \cdot T - 2.88 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$
4	Поліетилен 15802-020	$\mu_0 = 9.81 \cdot e^{6791.64 / (R \cdot (273 + T))}$	$n = -0.34 + 7.08 \cdot 10^{-3} \cdot T - 1.90 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$
5	Поліетилен 15803-020	$\mu_0 = 0.46 \cdot e^{8936.84 / (R \cdot (273 + T))}$	$n = -0.20 + 5.26 \cdot 10^{-3} \cdot T - 9.53 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
6	Поліетилен 10213-003	$\mu_0 = 9.10 \cdot e^{7051.44 / (R \cdot (273 + T))}$	$n = -5.75 \cdot 10^{-2} + 3.62 \cdot 10^{-3} \cdot T - 5.69 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
7	Поліетилен 20906-040	$\mu_0 = 295 \cdot e^{3688.94 / (R \cdot (273 + T))}$	$n = 0.13 + 2.05 \cdot 10^{-3} \cdot T - 3.55 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
8	Поліетилен 204E	$\mu_0 = 40.6 \cdot e^{5646.26 / (R \cdot (273 + T))}$	$n = 0.55 - 3.14 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1.11 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$
9	Поліетилен 1200H	$\mu_0 = 0.89 \cdot e^{7184.55 / (R \cdot (273 + T))}$	$n = 0.62 - 2.02 \cdot 10^{-2} \cdot T + 7.70 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
10	Поліетилен Dow. M.1.2.	$\mu_0 = 5.72 \cdot e^{5591.68 / (R \cdot (273 + T))}$	$n = 0.45 + 2.47 \cdot 10^{-3} \cdot T - 6.55 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
11	Поліетилен Dow. M.1.20.	$\mu_0 = 0.77 \cdot e^{6637.16 / (R \cdot (273 + T))}$	$n = 0.59 - 1.60 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1.61 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
12	Поліетилен Dow. M.1.7	$\mu_0 = 1.33 \cdot e^{6650.63 / (R \cdot (273 + T))}$	$n = 0.29 + 2.78 \cdot 10^{-4} \cdot T - 5.83 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$

мають складну просторову залежність напруження зсуву від його швидкості і температури (додаток Б).

### 2.3. Розробка математичної моделі витягування плівки між плоскощілинною головкою та валком

Товщина полімерного покриття і його рівномірність залежить не тільки від формуючих каналів плоскощілинної головки, а від процесу витягування плівки між головкою та місцем доторкання плівки до ламінуючого матеріалу. Під час цього процесу зменшується як товщина плівки, так її ширина. Тому аналітичне дослідження процесу витягування дозволить визначити вплив геометричних та технологічних параметрів проведення процесу витягування на товщину та ширину плівкового покриття.

Однією із основних технологічних операцій при отриманні плоских плівок з полімерних матеріалів є їх витягування. До виходу із плоскощілинної головки розплав полімеру тече в її плоских каналах. Для зниження пульсацій тиску розплаву канал головки має достатню довжину. Після виходу полімеру з головки профіль швидкості плівки за товщиною трансформується із параболічного в прямокутний (рис. 2.7). Тангенціальна швидкість тягнучого валка більше осьової швидкості полімеру в розбухломому перерізі, що дозволяє уникнути прогину плівки в зоні формування і забезпечує щільне прилягання її до поверхні валка. Розбухання закінчується за декілька міліметрів від губок головки, і довжина зони витягування практично дорівнює довжині від губок головки до точки дотику плівки з валком. На рис. 2.8 наведена схема процесу витягування плоскої плівки в зоні формування. В точці Р на поверхні плівки обираємо координати таким чином:  $\varepsilon_1$  – відповідає напрямку течії;  $\varepsilon_2$  – напрямку поперек течії;  $\varepsilon_3$  – нормаль до поверхні плівки.

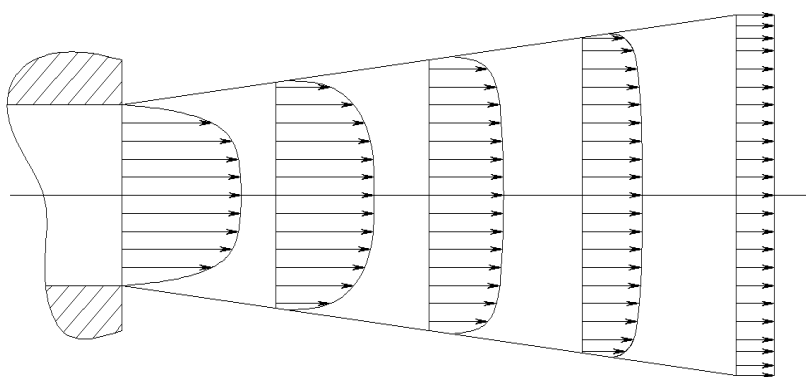


Рис. 2.7. Схема зміни профілю швидкості плівки за товщиною на виході із головки при розбуханні

Початок нерухомої системи координат розташований в точці  $\mathbf{0}$  найбільшого розбухання. Вісь  $X$  спрямована по довжині плівки. Величини  $b$  та  $\delta$  характеризують, відповідно, поточну ширину та товщину плівки. Тензор швидкостей деформації  $\|d\|$  характеризується діагональними компонентами

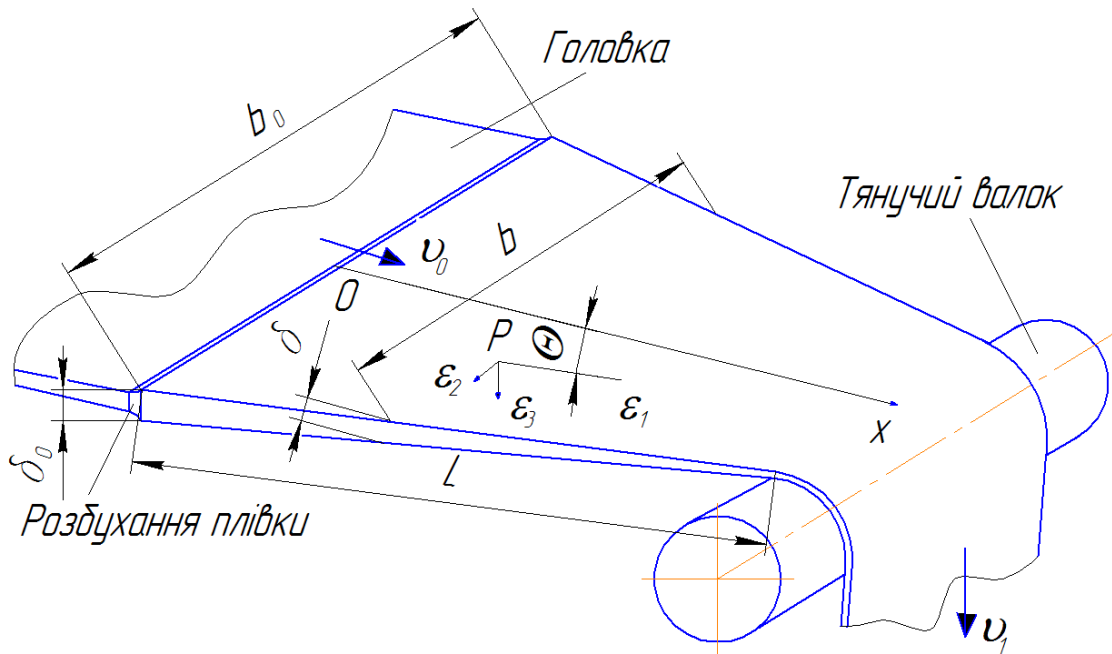


Рис. 2.8. Схема процесу витягування плоскої плівки в зоні формування

$d_{11}, d_{22}, d_{33}$ , а всі недиагональні компоненти дорівнюють нулю [143,144]. Коли ширина плівки змінюється від початкового значення  $b_0$  до поточного  $b$ , то відносна деформація складе  $\ln(b/b_0)$ . Відповідно, деформація по товщині складе  $\ln(\delta/\delta_0)$ . Швидкості деформації знаходяться таким чином [143]:

$$d_{22} = \frac{d}{dt} \left( \ln \frac{b}{b_0} \right) = \frac{1}{b} \frac{db}{dt}, \quad d_{33} = \frac{1}{\delta} \frac{d\delta}{dt}, \quad (2.25)$$

де  $d_{22}, d_{33}$  – тензори швидкостей деформації;  $b_0, b$ , – початкова та поточна ширина плівки;  $\delta$  – поточна товщина плівки;  $t$  – час.

Перетворюючи рівняння (2.25) для тензору швидкостей деформацій  $d_{22}$  отримуємо:

$$d_{22} = \frac{1}{b} \frac{db}{d\epsilon_1} \frac{d\epsilon_1}{dt}. \quad (2.26)$$

З врахуванням співвідношення [139]:

$$d\epsilon_1 = \frac{dx}{\cos \theta}, \quad \frac{dx}{dt} = v_m, \quad \frac{db}{dx} = b', \quad (2.27)$$

отримуємо  $d_{22} = v_m b' / b$ . Тут і нижче штрих означає похідну за  $x$ . З врахуванням умови нерозривності  $Q = v_m b \delta$ , отримуємо [143]:

$$d_{22} = \frac{Qb'}{\delta b^2}. \quad (2.28)$$

Аналогічно отримуємо вираз для  $d_{33}$ :

$$d_{33} = \frac{Qb'}{b\delta^2}. \quad (2.29)$$

Осьова компонента швидкості визначається із рівняння нерозривності [142]:

$$d_{11} = -d_{22} - d_{33} = -\frac{Q}{b\delta} \left( \frac{b'}{b} + \frac{\delta'}{\delta} \right). \quad (2.30)$$

Щільність розплаву полімеру стала, тому продиференціювавши рівняння нерозривності  $Q = v_m b \delta$ , отримуємо такий вираз для осьової швидкості деформації:  $d_{11} = v_m'$ , (де  $v_m'$  – осьова швидкість). Тензор швидкостей деформації має вигляд [143]:

$$\|d\| = \begin{vmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{vmatrix} = -\frac{Q}{b\delta} \begin{vmatrix} \frac{b'}{b} + \frac{\delta'}{\delta} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{b'}{b} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\delta'}{\delta} \end{vmatrix}. \quad (2.31)$$

Компоненти напружень у загальному вигляді визначаються таким чином [143]:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij}, \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (2.32)$$

де  $\sigma_{ij}$  – компоненти напружень;  $\tau_{ij}$  – компоненти напружень зрушення.

Силами поверхневого натягу нехтуємо і припускаємо, що на плоскій поверхні плівки тиск атмосферний, тоді отримуємо:

$$\sigma_{33} = 0. \quad (2.33)$$

Підставляючи (2.33) в (2.32), виразимо гідростатичний тиск через дівіаторну компоненту:

$$p = \tau_{33}. \quad (2.34)$$

Оберемо таке реологічне рівняння для полімеру [143]:

$$\tau_{ij} = 2\mu_0 (I_2)^{\frac{n-1}{2}} d_{ij}, \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (2.35)$$

де  $I_2/2 = d_{11}^2 + d_{22}^2 + d_{33}^2$  – другий інваріант тензора швидкостей деформацій.

Підставивши (2.34) в (2.32), отримуємо для напруження:  $\sigma_{11} = \tau_{11} - \tau_{33}$ ,  $\sigma_{22} = \tau_{22} - \tau_{33}$  або із врахуванням (2.35):

$$\sigma_{11} = 2\mu_0 (I_2)^{\frac{n-1}{2}} (d_{11} - d_{33}), \quad (2.36)$$

$$\sigma_{22} = 2\mu_0 (I_2)^{\frac{n-1}{2}} (d_{22} - d_{33}). \quad (2.37)$$

У поздовжній течії розрізняють режими плоского та одновісного витягування. Для одновісного витягування характерна рівність:  $\sigma_{33} = \sigma_{22} = 0$ , що дає для швидкостей деформації  $d_{22} - d_{33} = 0$ . З врахуванням рівнянь (2.28) та

(2.29) можна записати:  $b'/b = \delta'/\delta$ ,  $-2b'/b = v_m'/v_m$ . Інтегруючи ці рівняння з врахуванням умов  $x=0, b=b_0, \delta=\delta_0, v_m=v_0$ , отримуємо:

$$b/b_0 = \delta/\delta_0, \quad (2.38)$$

$$v_m/v_0 = (b/b_0)^2. \quad (2.39)$$

Тензор швидкостей деформацій в умовах одновісного витягування [143]:

$$\|d\| = -\frac{Qb}{\delta b^2} \begin{vmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{vmatrix} = v' \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.5 & 0 \\ 0 & 0 & -0.5 \end{vmatrix}. \quad (2.40)$$

При одновісному витягуванні має місце геометрична подібність поперечних перерізів [143]. При плоскому витягуванні ширина плівки не змінюється ( $b'=0, d_{22}=0$ ). Витягування здійснюється за рахунок стоншення плівки. Інтегрування рівняння  $b'=0, -\delta'/\delta = v_m'/v_m$  дає  $b=b_0, \delta/\delta_0 = v_m'/v_m$ . Тензор швидкостей деформацій у цьому випадку має вигляд [143]:

$$\|d\| = -\frac{Q\delta'}{\delta^2 b} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{vmatrix} = v_m' \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{vmatrix}. \quad (2.41)$$

Зіставляючи (2.36) та (2.37), отримуємо  $\sigma_{22} = 0.5\sigma_{11}$ . Отже, для реалізації плоского витягування до країв плівки необхідно прикласти зовнішнє напруження величиною:

$$\sigma_{22} = \sigma_{11} / 2. \quad (2.42)$$

Таким чином, згідно з третім законом Ньютона, сила, яка стягує плівку в поперечному напрямку, дорівнює половині сили, яка розтягує плівку вздовж. Плівка при витягуванні попадає на валок, на якому на неї діють такі сили: поздовжня розтягуюча сила  $F$ ; поперечна сила  $F_{cm}$ , яка стягує плівку до осі; сила тертя плівки з валком  $F_{mp}$  (будемо вважати, що всі ці сили прикладені в одній точці торкання).

Оскільки вісь  $OX$  є вісью симетрії плівки в поперечному напрямку, то на осі поперечної сили не буде. Виходячи з цього, розіб'ємо плівку на смуги і прикладемо до них такі сили, які показані на рис. 2.9.

Смуга буде у стані рівноваги, коли сума сил, які діють на неї вздовж осі  $Y$ , дорівнює нулю:

$$F_{mp} + F \cdot \sin \theta - F_{cm} = 0, \quad (2.43)$$

де  $F_{mp}$  – сила тертя;  $F$  – сила розтягування смуги;  $F_{cm}$  – сила стягування.

Сила тертя виражається через рівняння:

$$F_{mp} = f \cdot F, \quad (2.44)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя розплаву полімеру з матеріалом, який ламінується.

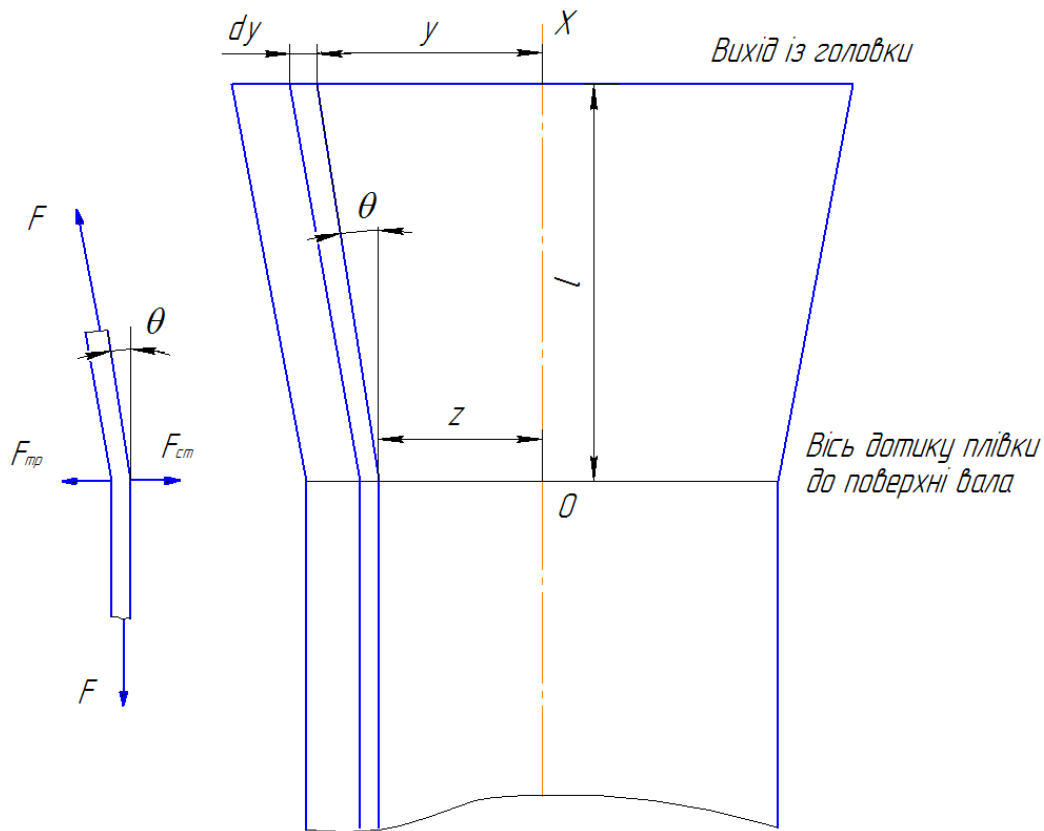


Рис. 2.9. Схема дії сил на ділянці звуження плівки між головкою та валом

Поперечна сила  $F_{cm}$  змінюється від нуля на осі  $OX$  до максимального свого значення  $F/2$  згідно з рівнянням (2.40) і буде визначатися:

$$F_{cm} = \frac{F}{2} \frac{2z}{b} = F \frac{z}{b}, \quad (2.45)$$

де  $z$  – поточна координата ширини плівки.

Синус кута  $\theta$  розраховують наближеною формулою:

$$\sin \theta = \frac{y - z}{\sqrt{l^2 + (y - z)^2}}, \quad (2.46)$$

де  $l$  – відстань від головки до охолоджуючого валка.

Підставляючи рівняння (2.44-2.46) в рівняння (2.43), отримуємо:

$$f + \frac{y - z}{\sqrt{l^2 + (y - z)^2}} - \frac{z}{b} = 0. \quad (2.47)$$

Слід відзначити, що із співвідношення пропорції плівки по ширині після головки і в довільному місці витягування маємо:

$$\frac{y}{b_0} = \frac{z}{b}. \quad (2.48)$$

Виразимо із наведеного рівняння  $y$  і, підставивши його в рівняння (2.47), отримуємо:



$$f + z \left( \frac{b_0 - b}{\sqrt{l^2 b^2 + z^2 (b_0 - b)^2}} - \frac{1}{b} \right) = 0. \quad (2.49)$$

Враховуючи, що на краю плівки координата  $z$  дорівнює  $b$ , перетворимо рівняння (2.49) до вигляду:

$$b = b_0 - l \frac{1 - f}{\sqrt{1 - (1 - f)^2}}. \quad (2.50)$$

Таким чином, ширина витягнутої плівки ( $b$ ) буде залежати від початкової ширини ( $b_0$ ), довжини зони витягування ( $l$ ), а також від коефіцієнта тертя ( $f$ ). Із рівняння (2.50) видно, що ширина витягнутої плівки ( $b$ ) лінійно зменшується зі зростанням довжини зони витягування ( $l$ ) при сталому значенні коефіцієнта тертя ( $f$ ). На рис. 2.10 наведені залежності ширини витягнутої плівки від довжини зони витягування при різних значеннях коефіцієнтів тертя і сталій початковій ширини  $b_0=2100$  мм.

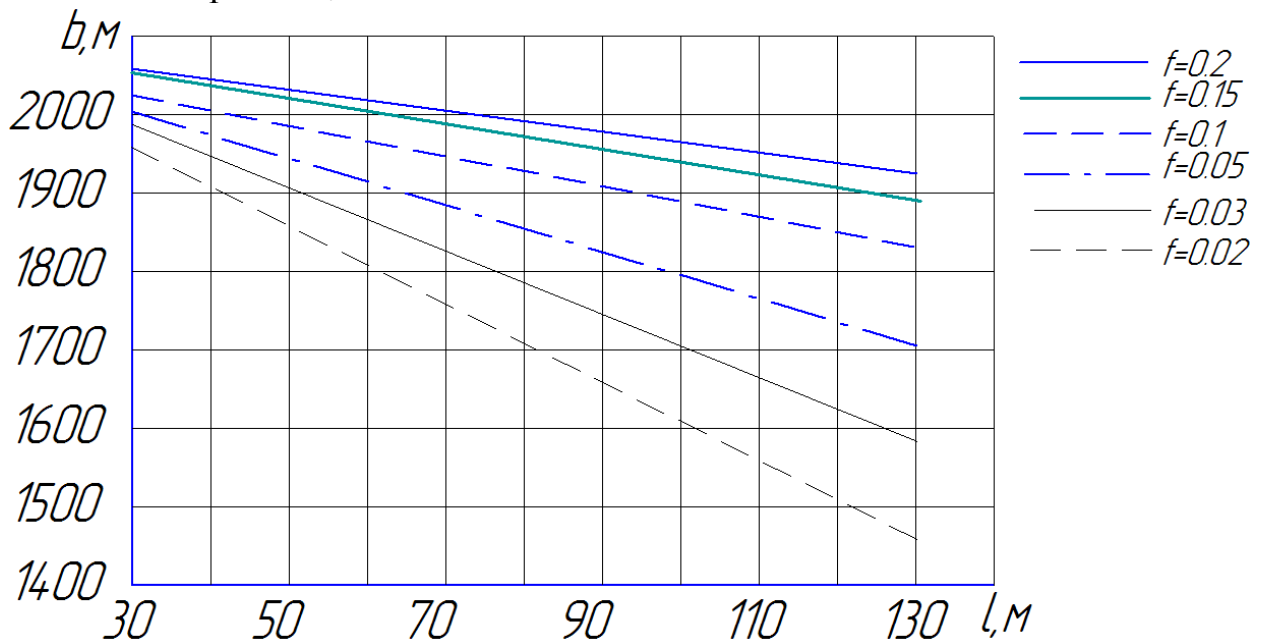


Рис. 2.10. Залежність ширини витягнутої плівки ( $b$ ) від довжини зони витягування ( $l$ ) при різних значеннях коефіцієнта тертя ( $f$ )

Згідно з [6] коефіцієнт тертя поліетилену по паперу при температурі від  $(230 - 250)^\circ\text{C}$  складає 0.08-0.12. Таким чином, середнє значення коефіцієнта тертя буде  $f=0.1$ . Знаючи коефіцієнт тертя і довжину зони витягування, можна по рівнянню 2.50 розрахувати ширину витягнутої плівки.

Товщина витягнутої плівки  $\delta_1$  розраховується з рівняння балансу витрат плівки в перерізах на вході і на валку за рівнянням:

$$\delta_1 = \delta_0 \frac{b_0 v_0}{b v_1}. \quad (2.51)$$

## 2.4. Алгоритм і програма гідравлічного розрахунку плоскощільної головки

З урахуванням вище наведених рівнянь математична модель руху полімеру для розрахункової схеми рис. 2.1 має такий вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{ll}
 Q_m = \frac{\pi n R^{\frac{3n+1}{n}}}{(3n+1)} \left( \frac{dp}{2\mu_0 dx} \right)^{1/n}; & 1 \\
 Q_{\text{щ}} = \frac{\pi n h^{\frac{2n+1}{n}}}{(2n+1)} \left( \frac{1}{\mu_0} \frac{dp}{dx} \right)^{1/n}; & 2 \\
 Q_{\kappa} = \frac{\pi \mu_0}{2^{2n+3} (n+3)} \left[ \frac{6 \Delta p t g \alpha}{n \left[ \frac{1}{d_2^{3n}} - \frac{1}{d_1^{3n}} \right]} \right]^n; & 3 \\
 \Delta p_{\text{м}} = \xi \rho \frac{v^2}{2}; & 4 \\
 Q_{\text{BX}} = 2 \sum_{i=1}^m q_{i2}; & 5 \\
 q_{i2} = q_{i1} \quad i = 1, 2, \dots, m; & 6 \\
 \mu_0 = A e^{E/RT}; & 7 \\
 n = cT^2 + dT + T; & 8 \\
 \text{Геометричні розміри головки} & 9 \\
 d_{\text{BX}}, l_{\text{BX}}, al, drn, drk, B1, B2, l1k, L2, \Delta y, B; & \\
 b = b_0 - l \frac{1-f}{\sqrt{1-(1-f)^2}}; & 10 \\
 \delta_1 = \delta_0 \frac{b_0 v_0}{b v_1}; & 11 \\
 \text{Умови:} \quad \text{Граничні:} \quad \begin{array}{ll} \text{Тиск на вході} & P_{\text{BX}}; \\ \text{Тиск на виході} & P_{\text{ВИХ}}; \end{array} & 12 \\
 \text{Початкові: } T = f_T(l_1) \quad \text{де} \quad l_1 = i \frac{B}{m}. & 13
 \end{array} \right. \quad (2.52)$$

Система рівнянь для опису руху полімеру по елементарних ділянках, із яких складається плоскощільна головка, в цілому є невизначеною. Для більшості елементарних ділянок невідомі ні витрати, ні перепади тиску на них. Потрібно підібрати рівняння, які зроблять систему статично визначеною. Такими рівняннями є рівняння балансу витрат в цілому для всієї головки (2.12) і

рівняння балансу витрат на окремих ділянках між широкою та вузькою прямокутними щілинами (2.13).

Сьоме та восьме рівняння системи (2.52) описують залежність в'язкості та індексу течії від температури. Десяте та одинадцять рівняння системи (2.52) дозволяють визначити, якої ширини  $b$  і товщини  $\delta_l$  отримуємо плівку в результаті її витягування.

В процесі розрахунку плоскощілинної головки її геометричні та технологічні параметри процесу формування (тиск перед головкою  $P_{BX}$ , тиск на виході із головки  $P_{ВИХ}$  (дванадцята умова системи (2.52)), розподіл температур полімеру всередині головки по її довжині  $T=fT(l_i)$  (тринадцята умова системи (2.52)) розглядаються як відомі. В основу розрахунку покладений баланс тисків і баланс витрат при отриманих тисках по всіх ділянках і по всій головці. Суть такого балансу полягає в тому, що задається значення тиску  $P_1$  (в межах від 0 до  $P_{BX}$ ) після першої ділянки циліндричної труби. Після цього розраховуються витрати полімеру  $Q_{BX}$  на вході циліндричної труби довжиною  $l_{BX}$  за першим рівнянням системи (2.52). Розраховані витрати полімеру  $Q_{BX}$  розподіляються рівними частинами на два нахилених конусних колектори, тому що головка вважається симетричною. Витрати  $Q_{BX}/2$  та вхідний тиск  $P_1$  відомі, і за третім рівнянням системи (2.52) розраховуємо тиск в кінці конічного каналу  $P_{11}$ . Для визначення витрат полімеру  $q_{11}$  на першій ділянці широкої щілини задаємо тиск  $P_{12}$  в межах від 0 до  $P_1$ . Використовуючи рівняння 2 системи (2.52), розраховуємо  $q_{11}$ . Аналогічно розраховуємо витрати на вузькій щілині  $q_{12}$  за другим рівнянням системи (2.52), з урахуванням того, що тиск на вході цієї щілині  $P_{12}$ , а на виході із головки надлишковий тиск  $P_{ВИХ}$  дорівнює нулю. Враховуючи, що витрати на широкій та на вузькій щілинах будуть різними, методом дихотомії змінюємо тиск  $P_{12}$  таким чином, щоб виконувалось сьоме рівняння системи (2.52)  $q_{11}=q_{12}$  із заданою точністю (похибка не повинна перевищувати значення  $\Delta q=1.0 \cdot 10^{-11}$ ). Слід зауважити, що ця точність дає похибку на виході менше 0.0001% за витратами полімеру.

Після визначення витрат на перших ділянках щілин  $q_{11}$  визначаємо витрати на другій конічній трубці як різницю  $Q_{BX}/2 - q_{11}$ . Після цього можна розрахувати тиск в кінці другої ділянки конічної труби  $P_{21}$ , процес розрахунку повторити для другої ділянки щілин і так далі, до останньої ділянки. Після проведених розрахунків маємо значення витрат на всіх ділянках на виході із головки. Наступним кроком є перевірка, чи виконується рівняння балансу витрат на вході і виході із головки, п'яте рівняння системи (2.52). Нами прийнята точність балансу витрат на вході та на виході із головки ( $\Delta q=1.0 \cdot 10^{-6}$ ), яка дає похибку за загальними витратами менше 0.01%. Коли витрати на вході перевищують витрати на виході, величину тиску  $P_1$  необхідно збільшувати, якщо навпаки, витрати на вході менші, ніж витрати на виході, тиск  $P_1$  необхідно зменшувати. Для знаходження значення тиску, при якому буде зберігатися із заданою точністю баланс витрат входу і виходу, застосуємо метод дихотомії.

Отримані витрати на виході головки дозволяють розрахувати товщину плівки на виході за одинадцятим рівнянням системи (2.52) та її ширину за

десятим рівнянням системи (2.52) при відомому значенні швидкості ( $v_0$ ) матеріалу, який ламінується.

Таким чином, в цілому для всієї головки на кожній ділянці буде зберігатися баланс тисків та витрат полімеру. Принципова схема руху полімеру та розподіл тиску в плоскощільній головці згідно з розрахунковою схемою (рис. 2.1) наведена в додатку В.

Алгоритм вирішення поставленої задачі представлений у вигляді принципової блок-схеми (додаток Д). На основі цього алгоритму було розроблено програму для знаходження тисків та витрат для всієї головки при відомих її геометричних параметрах, вхідному та вихідному тисках, а також розподілу температур полімеру по ширині головки. Програма розроблена на алгоритмічній мові Delfi.

Загальний вигляд програми наведено на рис. 2.11.

Исходные данные	
Тип полиэтилена	15802-020
Входной диаметр (м)	0.07
Длина входного канала (м)	0.5
Начальный диаметр рукава коллектора (м)	0.068
Конечный диаметр рукава коллектора (м)	0.055
Угол наклона рукава	4.4
Толщина узкой щели (м)	0.0006
Толщина переходной щели (м)	0.0015
Высота узкой щели (м)	0.026
Ширина фильеры (м)	2.1
Конечная высота расположения рукава (м)	0.005
Давление начальное (Па)	10000000
Температура (С)	180
Прогиб (м)	0.000008
Скорость бумаги (м/с)	2
Заданная толщина пленки (мкм)	20
Расстояние до валика (м)	0.14
Коэффициент трения	0.1

Рис. 2.11. Загальний вигляд програми розрахунку товщини плівки на виході із головки

Програма дозволяє задавати тип полімеру і його реологічні властивості, геометричні параметри головки, температуру поліетилену, тиск, швидкість подачі основи для ламінування.

Для оцінки витрат полімеру на виході головки нами використано коефіцієнт рівнотовщинності ( $k$ ), який розраховується за рівнянням:

$$k = \frac{q_{i2\min} b_0 v_0}{q_{i2\max} b v_1}, \quad (2.53)$$

де  $q_{i2\min}$ ,  $q_{i2\max}$  – мінімальні і максимальні, відповідно витрати на виході.

Програма дозволяє провести розрахунок, розглянути конструкцію та схему головки, отримати графік залежності витрат поліетилену на виході головки в залежності від її довжини, отримати результати розрахунку. Крім того, вона дозволяє зберегти отримані результати в текстовому і графічному виді (рис. 2.12).

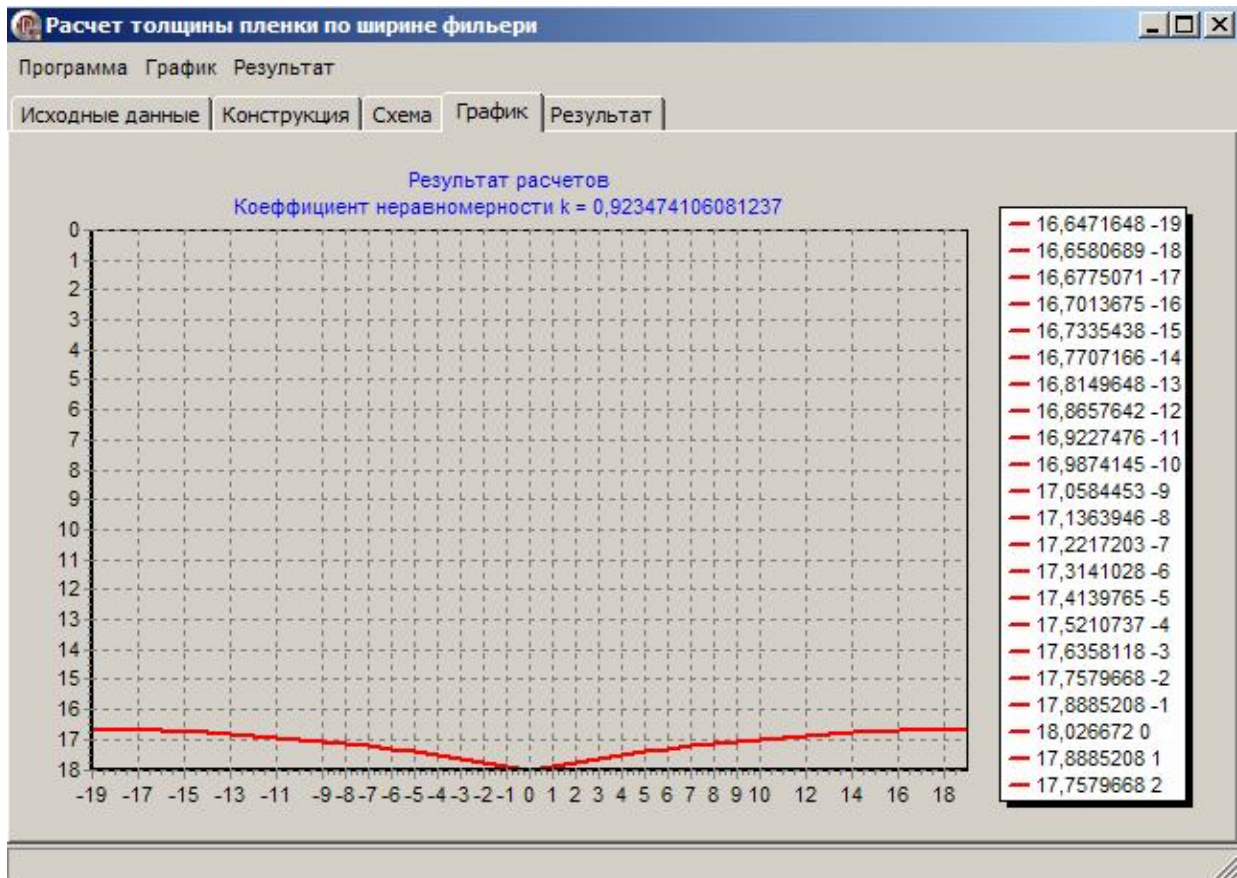


Рис. 2.12. Результати розрахунку зміни товщини поліетиленової плівки по ширині головки

Як показує графік, в центрі головки товщина плівки більша, ніж на її краях, а коефіцієнт рівнотовщинності  $k = 0,92$ .

Для проведення розрахунків в якості базових параметрів прийняті геометричні величини внутрішніх каналів плоскощільної головки, які наведені в табл. 2.2, а також вказані діапазони, в яких вони змінювались.

Враховуючи, що при ламінуванні в основному використовується поліетилен марки 15802-020, всі подальші розрахунки будуть проводитися для цієї марки поліетилену.

Таблиця 2.2.

## Геометричні параметри внутрішніх каналів плоскощілинної головки

№ р/р	Найменування показника	Позначення	Розмірність	Базове значення	Діапазон змін параметра
1	Вхідний діаметр підвідної труби	$d_{вх}$	м	0.07	-
2	Довжина підвідної труби	$l_{вх}$	м	0.3	-
3	Діаметр колектора початковий	$d_{гн}$	м	0.068	0.03-0.08
4	Діаметр колектора кінцевий	$d_{гк}$	м	0.055	0.03-0.06
5	Кут нахилу колекторів	$\alpha$	град.	6	4-10
6	Перша ширина щілини	B2	м	0.0004	0.0002-0.0007
7	Друга ширина щілини	B1	м	0.0015	0.001-0.008
8	Довжина вузької частини губок	L2	м	0.058	0.02-0.08
9	Ширина головки	B	м	2.1	-
10	Кінцева висота розташування	llk	м	0.005	0.002-0.01
11	Прогин губки	$\Delta y$	м	0.000008	0.000002-0.00001

Технологічні параметри, а саме: вхідний тиск, температура, швидкість паперу змінюються в діапазонах, які дозволені технологічним регламентом виробництва та конструкцією установки (табл. 2.3).

Таблиця 2.3

## Технологічні параметри проведення процесу ламінування

№ р/р	Найменування показника	Позначення	Розмірність	Базове значення	Діапазон змін параметра
1	Вхідний тиск в головці	$P_{вх}$	Мпа	12	10-14
2	Вхідна температура	T	°C	250	230-260
3	Швидкість ламінованого матеріалу	$v_l$	м/с	1.8	1,6-2,0

Програма дозволяє проводити зміну геометричних та технологічних параметрів практично в необмеженому діапазоні. Діапазони зміни параметрів, які наведено в табл.2.2, обрані у відповідності з параметрами промислової головки та технологічного регламенту.

Змінюючи розміри головки, можна дослідити, як її геометричні параметри впливають на товщину плівки при ламінуванні і на рівнотовщинність.

Обробка результатів розрахунків дозволяє провести аналіз впливу геометричних розмірів внутрішніх каналів плоскощілинної головки на рівнотовщинність плівки полімеру на виході із головки, а також дослідити, як змінюється товщина плівки в центрі головки та на її краях.

Із рис. 2.13 видно, що із зростанням кута нахилу колектора товщина плівки на краю головки не змінюється, а в центрі головки різко зменшується.

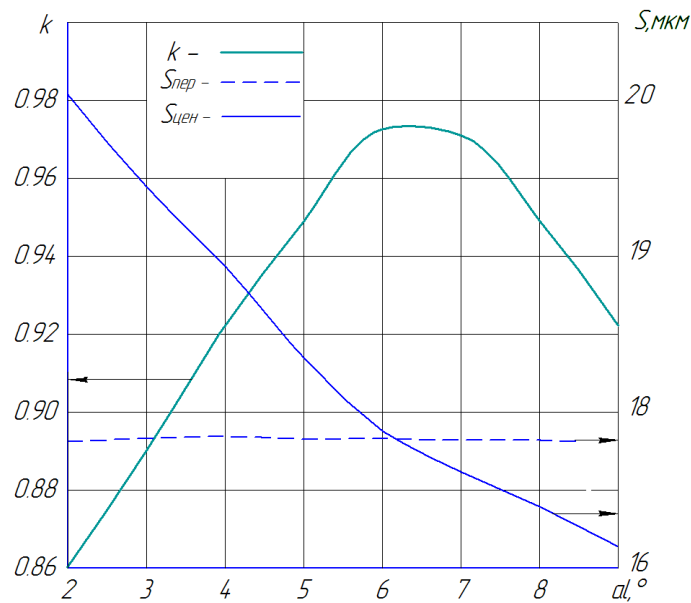


Рис. 2.13. Залежність коефіцієнта рівнотовщинності ( $k$ ) та товщини плівки полімеру в центрі ( $S_{\text{цен}}$ ) та на краю ( $S_{\text{пер}}$ ) головки від кута нахилу колектора ( $\alpha$ )

Очевидно, що існує оптимальне значення кута нахилу колектора ( $\alpha=6.4^\circ$ ), при якому коефіцієнт рівнотовщинності витрат полімеру із головки буде найкращим (близьким до 1).

На рис. 2.14 та рис. 2.15 показано вплив кінцевого діаметра колектора ( $d_{\text{рк}}$ ) на параметри плівки.

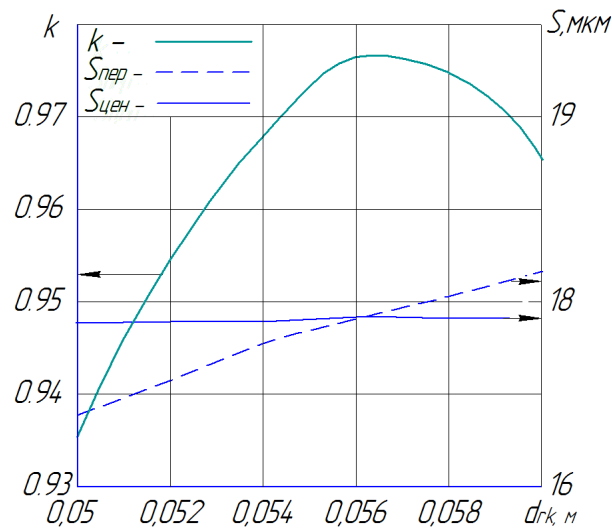


Рис. 2.14. Залежність коефіцієнта рівнотовщинності ( $k$ ) та товщини плівки полімеру в центрі ( $S_{\text{цен}}$ ) та на краю ( $S_{\text{пер}}$ ) головки від діаметра колектора кінцевого ( $d_{\text{рк}}$ )

Як видно з рис. 2.14, існує оптимальне значення діаметра колектора кінцевого ( $d_{\text{рк}}$ ), при якому плівка має найкращий коефіцієнт рівнотовщинності (близький до 1). Слід відзначити, що початковий діаметр колектора ( $d_{\text{гн}}$ ) практично не впливає на коефіцієнт рівнотовщинності та товщину плівки (рис. 2.15).

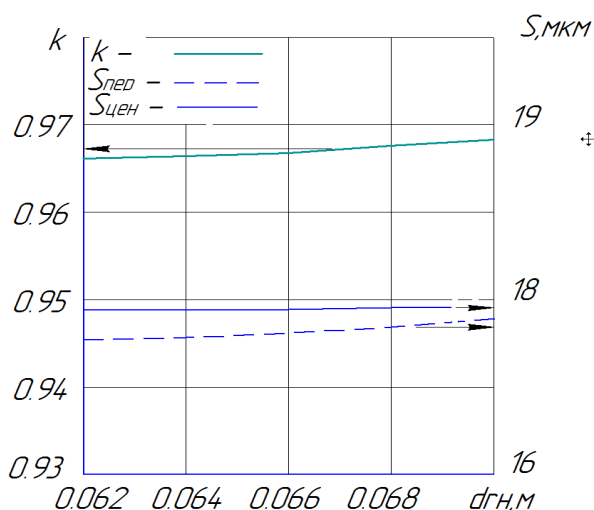


Рис. 2.15. Залежність коефіцієнта рівнотовщинності ( $k$ ) та товщини плівки полімеру в центрі ( $S_{цен}$ ) та на краю ( $S_{пер}$ ) головки від діаметра колектора початкового ( $d_{гн}$ )

Вплив вузької ширини щілини ( $B_2$ ) показано на рис. 2.16. Збільшення вузької ширини щілини призводить до збільшення товщини плівки і в центрі головки, і на її периферії. При цьому, існує оптимальне значення ( $B_2$ ), при якому значення коефіцієнта рівнотовщинності ( $k$ ) буде найкращим.

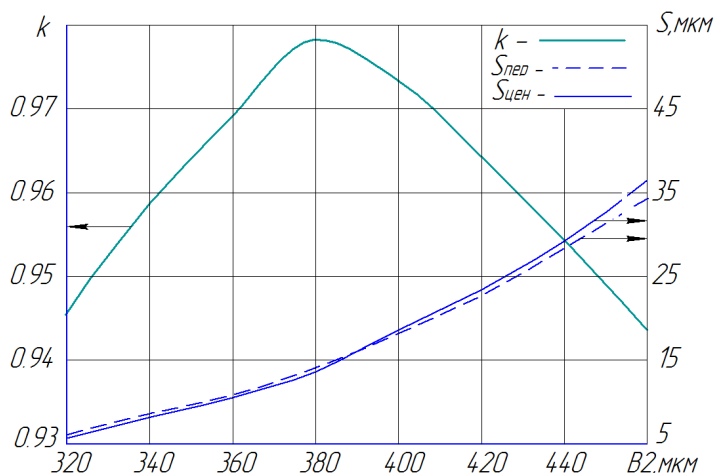


Рис. 2.16. Залежність коефіцієнта рівнотовщинності ( $k$ ) та товщини плівки полімеру в центрі ( $S_{цен}$ ) та на краю ( $S_{пер}$ ) головки від вузької товщини щілини ( $B_2$ )

При зміні широкої товщини щілини ( $B_1$ ) зростання товщини плівки на периферії незначне, на відміну від центру, де воно значніше. З цього випливає, що існує оптимальне значення  $B_1=1.35$  мм, при якому отримується плівка з незначними відхиленнями товщини по ширині плівки (рис. 2.17).

Розрахунки показують, що із зростанням довжини вузької щілини ( $L_2$ ) несуттєво змінюється значення коефіцієнта рівнотовщинності ( $k$ ), а товщина плівки в центрі та на периферії головки суттєво зменшується (рис. 2.18).



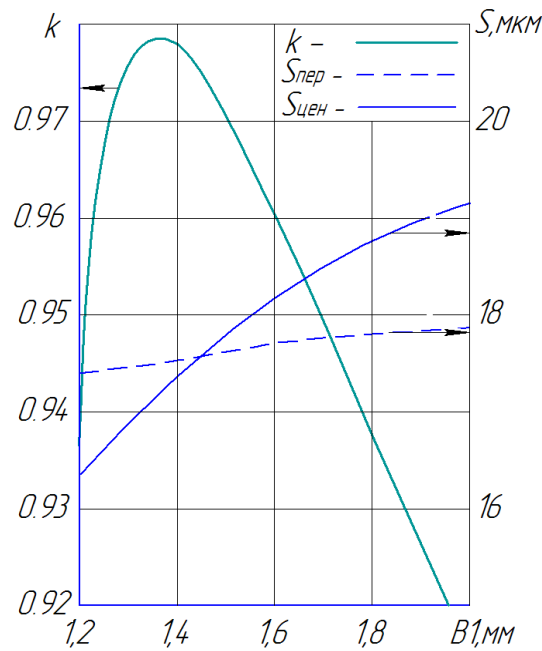


Рис. 2.17. Залежність коефіцієнта рівнотовщинності ( $k$ ) та товщини плівки полімеру в центрі ( $S_{\text{цен}}$ ) та на краю ( $S_{\text{пер}}$ ) головки від широкої товщини щілини ( $B_1$ )

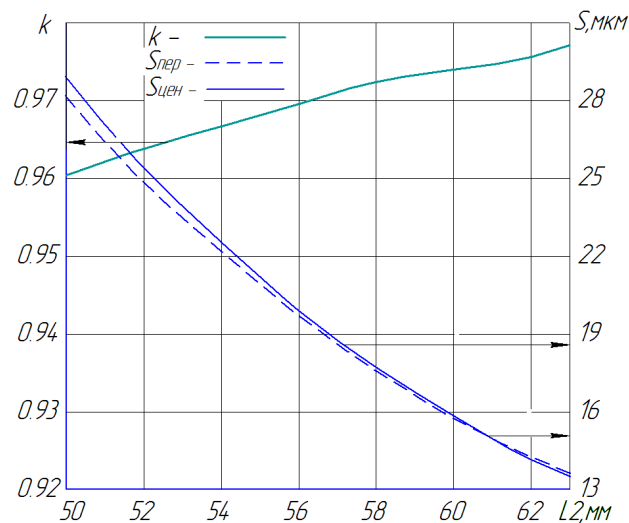


Рис. 2.18. Залежність коефіцієнта рівнотовщинності ( $k$ ) та товщини плівки полімеру в центрі ( $S_{\text{цен}}$ ) та на краю ( $S_{\text{пер}}$ ) головки від довжини вузької щілини ( $L_2$ )

Вплив кінцевої висоти розташування колектора ( $llk$ ) на товщину плівки та коефіцієнт рівнотовщинності показано на рис. 2.19. Як видно із рисунка висота розташування колектора ( $llk$ ) практично не впливає на коефіцієнт рівнотовщинності, а товщина плівки змінюється несуттєво.

Прогин губки ( $\Delta y$ ), як видно з рис. 2.20, значно впливає на товщину плівки в центрі головки. Чим більшим є прогин, тим меншою є товщина плівки по центру головки.

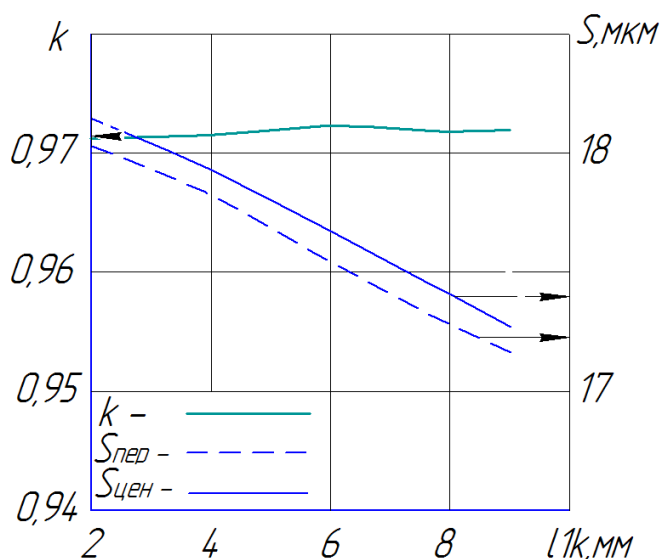


Рис. 2.19. Залежність коефіцієнта рівнотовщинності ( $k$ ) та товщини плівки полімеру в центрі ( $S_{\text{цен}}$ ) та на краю ( $S_{\text{пер}}$ ) головки від кінцевої висоти розташування колектора ( $l_k$ )

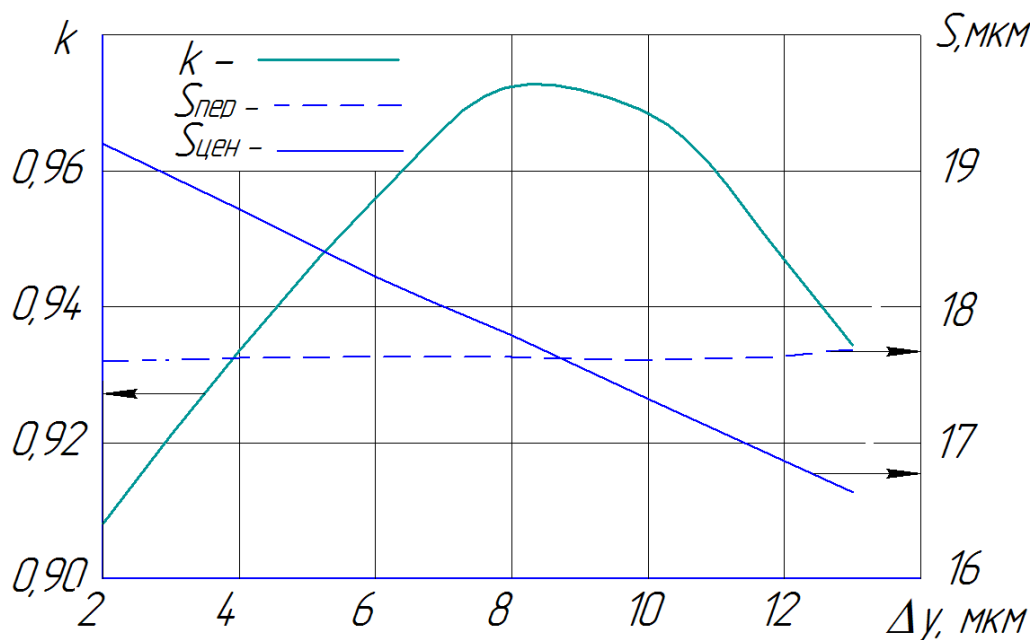


Рис. 2.20. Залежність коефіцієнта рівнотовщинності ( $k$ ) та товщини плівки полімеру в центрі ( $S_{\text{цен}}$ ) та на краю ( $S_{\text{пер}}$ ) головки від прогину губки ( $\Delta y$ )

Таким чином, програма дозволяє дослідити вплив геометричних параметрів головки на товщину та рівнотовщинність покриття. Розрахунки показують, що такі геометричні параметри, як кут нахилу колекторів ( $\alpha$ ), кінцевий діаметр колектора ( $d_{\text{тк}}$ ), перша ( $B_2$ ) та друга ( $B_1$ ) товщини щілини значно впливають на рівномірність товщини плівки по її ширині. Тому їх розрахунок при проектуванні головки є особливо важливим. Компенсувати неправильно розраховані геометричні розміри внутрішніх каналів головки прогином губки не завжди можливо.

Вплив технологічних параметрів (тиск та температура) на товщину плівки та на її рівнотовщинність наведено на рис. 2.21 і рис. 2.22. Як видно з рисунків,

технологічні параметри несуттєво впливають на коефіцієнт рівнотовщинності ( $k$ ), а їх вплив на товщину плівки значний.

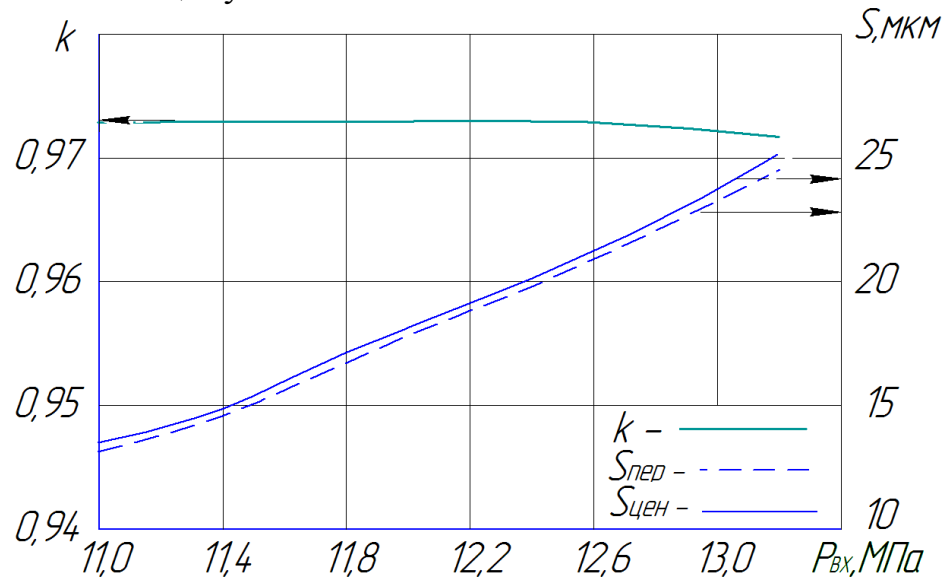


Рис. 2.21. Залежність коефіцієнта рівнотовщинності ( $k$ ) та товщини плівки полімеру в центрі ( $S_{\text{цен}}$ ) та на краю ( $S_{\text{пер}}$ ) головки від тиску ( $P_{BX}$ )

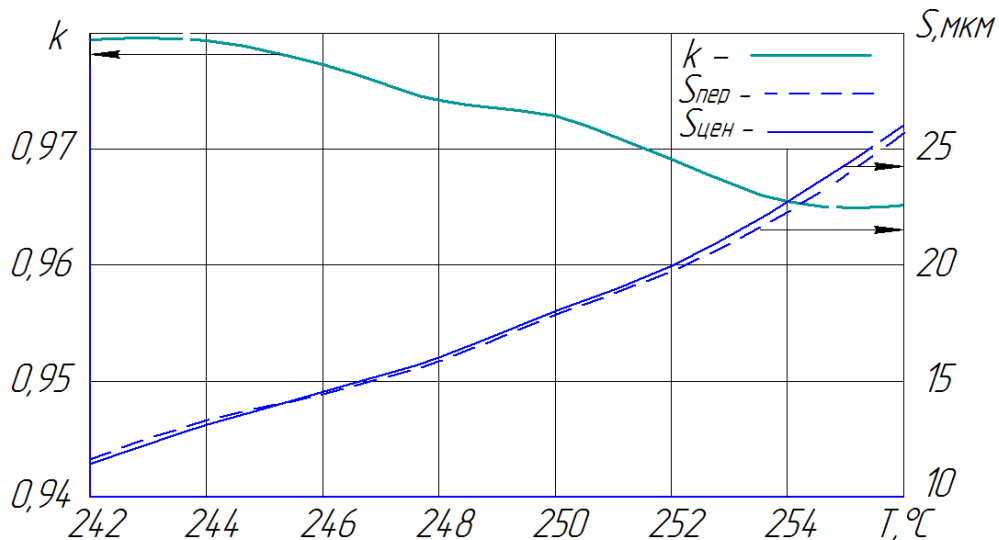


Рис. 2.22. Залежність коефіцієнта рівнотовщинності ( $k$ ) та товщини плівки полімеру в центрі ( $S_{\text{цен}}$ ) та на краю ( $S_{\text{пер}}$ ) головки від температури ( $T$ )

Приведені теоретичні залежності показують, що існують оптимальні геометричні значення головки, при яких полімерна плівка буде формуватися рівномірної товщини. Для знаходження оптимальних розмірів формуючих каналів головки потрібно запропонувати цільову функцію та метод оптимізації.

Враховуючи вище наведене, можна зробити висновок, що теоретично існують оптимальні розміри плоскощільної головки, при яких витрати розплаву полімеру по ширині головки будуть рівними, що забезпечить рівнотовщинність покриття. Далі потрібно зробити перевірку математичної моделі на промисловій установці. Слід зауважити, що при проведенні експериментів на промисловій плоскощільній головці неможливо змінювати кут нахилу колектора і товщину щілини. Це можливо тільки при створенні нової

конструкції плоскощільної головки, що потребує значних матеріальних витрат.

## 2.5. Формування цільової функції оптимізації та особливості вибору методу оптимізації

Аналіз вищенаведених рівнянь показує, що на рівномірність витрат полімеру вздовж щілини значно впливають геометричні параметри головки, які наведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Геометричні параметри головки, що оптимізуються

№ р/р	Найменування параметра	Позначення	Розмірність	Початкові значення
1	Кут нахилу колекторів	$\alpha$	град.	6
2	Діаметр колектора початковий	$d_{rn}$	м	0.056
3	Діаметр колектора кінцевий	$d_{rk}$	м	0.056
4	Кінцева висота розташування колектора	$l_k$	м	0.005
5	Довжина вузької частини губок головки	$L_2$	м	0.026
6	Перша ширина щілини	$B_2$	м	0.0015
7	Друга ширина щілини	$B_1$	м	0.0005
8	Прогин губки	$\Delta y$	м	0.000008

Враховуючи, що наведені геометричні параметри впливають на витрати полімеру по ширині головки, знайти аналітичним методом їх оптимальні значення неможливо. Для визначення оптимальних геометричних параметрів головки, при яких витрати полімеру вздовж щілини будуть однаковими, потрібно вибрати цільову функцію оптимізації.

При цьому в якості цільової функції оптимізації нами пропонується рівняння:

$$F = a_1 \cdot (1 - k)^2 + e \cdot \sum_i^{2m} (S_i - S_{nom})^2, \quad (2.54)$$

де  $F$  – цільова функція;  $a_1$ ,  $e$  – коефіцієнти;  $S_i$  – товщина плівки, яка розраховується, на  $i$ -й ділянці;  $S_{nom}$  – товщина плівки, яку потрібно отримати.

Це рівняння враховує коефіцієнт рівномірності і задану товщину полімерного покриття.

Оптимальні геометричні розміри формуючих каналів плоскощільної головки, які дозволять отримати задану товщину плівки полімерного покриття із заданою рівномірністю, будуть тоді, коли значення цільової функції будуть найменшими. Слід відзначити, що без другої складової ( $S_i$ ) у рівнянні цільової функції отримати оптимальні геометричні параметри неможливо, оскільки оптимальними будуть такі параметри, при яких на виході із головки витрати полімеру нульові. Значення коефіцієнтів  $a_1$  та  $e$  визначаються конструктором у залежності від властивостей отримуваної плівки. При зростанні коефіцієнту  $e$  накладаються жорсткіші умови на товщину; якщо він зменшується - на рівномірність витрат полімеру по ширині головки.

Рівняння 2.54 дозволяє отримати оптимальні геометричні параметри головки, при яких рівнотовщинність плівки ( $k$ ) не перевищує 0,8%.

Метод оптимізації покоординатного спуску [145] дозволяє враховувати, який із параметрів найбільш сильно впливає на рівномірність витікання і знайти його оптимальне значення. Потім отримане значення тільки незначно коректується.

## 2.6. Алгоритм і програма оптимізації геометричних розмірів внутрішніх каналів плоскощільної головки

У попередньому розділі була сформована цільова функція, яка дозволяє провести оптимізацію геометричних параметрів плоскощільної головки. Для знаходження таких оптимальних геометричних розмірів розроблено алгоритм рішення, який представлений у вигляді принципової блок-схеми (додаток Е).

Запропонована цільова функція, алгоритм оптимізації плоскощільної головки та розроблена програма дозволяють розрахувати її оптимальні геометричні розміри, при яких можна отримати ламінований матеріал з тонкою полімерною плівкою. На рис. 2.23 зображена аналітична залежність рівнотовщинності покриття від кута нахилу колектора для різних марок поліетилену. З рисунка можна зробити висновок, що для більшості поліетиленів оптимальний кут нахилу колекторів лежить у межах від 5 до 7 градусів.

Аналіз кривих наведених на рис. 2.23 показав, що для різних марок полімерів оптимальний кут нахилу рукавів колекторів різний, що прямо пов'язано з реологічними властивостями розплавів полімерів.

Як видно з цього рисунка, поліетилену марок 15802-020 та 20906-004 мають явно виражені параболічні залежності коефіцієнта рівнотовщинності плівки від кута нахилу колекторів і при куті 6 градусів мають оптимальне значення. Це обумовлено тим, що ці поліетилену мають більш низький показник індексу течії, тобто їх реологічні характеристики описуються степеневим законом.

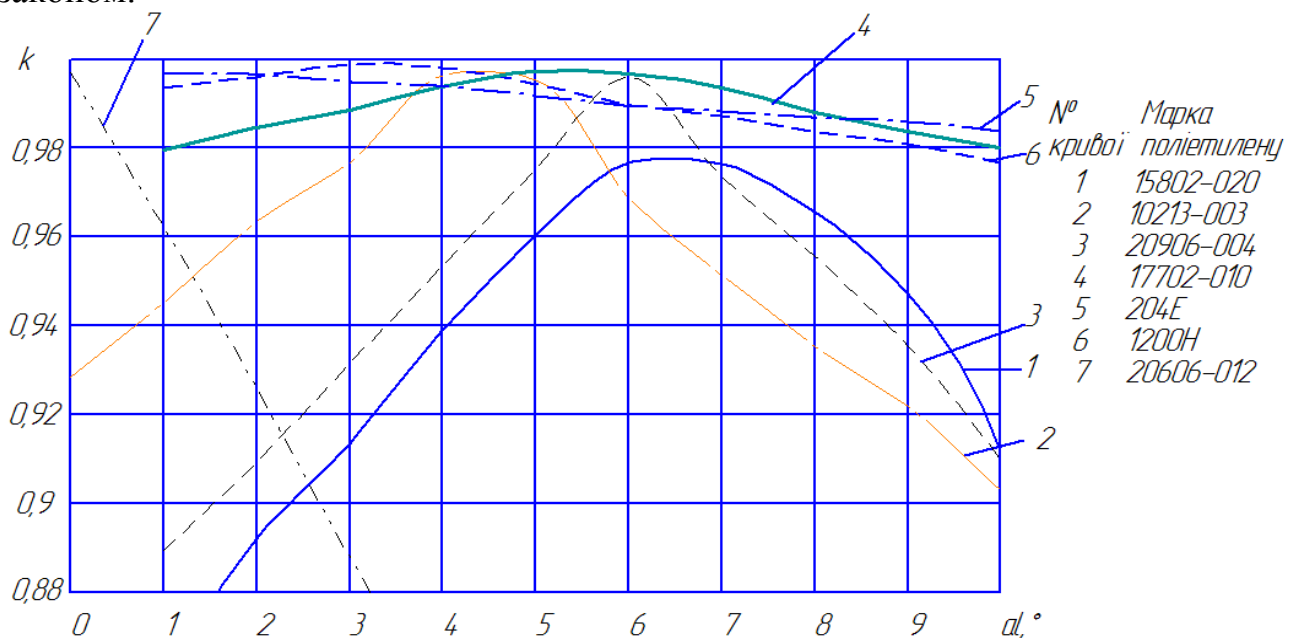


Рис. 2.23. Залежність рівнотовщинності покриття від кута нахилу колекторів для різних марок поліетилену

### РОЗДІЛ 3

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА І ПРОМИСЛОВА УСТАНОВКИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕЧІЇ ПОЛІМЕРНОЇ РІДИНИ В ПЛОСКОЩІЛИННІЙ ГОЛОВЦІ

### 3.1. Експериментальна установка та методика проведення досліджень течії полімерної рідини

Враховуючи, що для перевірки адекватності розробленої математичної моделі в промислових масштабах потрібно виготовляти декілька промислових плоскощілинних головок, прийнято рішення з розділення експериментальних досліджень на два етапи:

1. Виготовлення зменшеної моделі плоскощілинної головки з можливістю зміни її геометричних розмірів в широкому діапазоні та застосування імітаційної рідини, яка б відповідала поведінці розплаву поліетилену.

2. Перевірка адекватності математичної моделі на промисловій головці з можливістю зміни технологічних параметрів у діапазонах, дозволених технологічним режимом.

#### 3.1.1. Опис експериментального стенда для дослідження процесу течії рідини в формуючих каналах плоскощілинної головки

Оскільки проведення експериментальних досліджень з використанням полімерів на промисловому стенді потребує значних фінансових витрат (дорогі полімери і обладнання для їх переробки та значні витрати на їх плавлення), досліді проводились на експериментальному стенді з використанням імітаційної рідини. Імітаційна рідина підбиралась таким чином, щоб закон зміни напруження зсуву від швидкості був степеневим, тому що більшість полімерів підпорядковується цьому закону [36-41,142]. Враховуючи, що така рідина не застигає і не створює твердої плівки, проводились дослідження не товщини плівки, а її витрат. Слід зауважити, що у промислових плоскощілинних головках кінцева щілина є рівномірною і формує товщину плівки по ширині головки, тому перехід від дослідження рівномірності товщини плівки до дослідження рівності витрат на виході плоскощілинної головки по її ширині є цілком виправданими [37-41,144,146]. Під час виробництва плівки на виході з головки має місце, головним чином, поздовжнє витягування [1,3,5,8,9,12,14,144]. Це підтверджує аналіз фотознімків плівки (додаток Ж) на виході з головки. Встановлено, що усадка по ширині плівки дорівнює 50-70 мм з обох сторін, це складає до 3% від поперечного розміру плівки. Крім того, на сучасних лініях з виробництва ламінованого паперу використовують електростатичні притискачі, які ще більше зменшують поперечне витягування [1,5,8,12,14]. Тому витрати полімеру доцільно порівнювати з товщиною плівки, а рівномірність товщини - з рівномірністю витрат по ширині головки. З урахуванням цього розроблено експериментальну установку, яка дозволяє вивчати процес течії рідини в колекторних каналах плоскощілинної головки (рис. 3.1).

Досліди на експериментальній установці проводились таким чином: спочатку ванна 6 заповнюється імітаційною рідиною, після чого включається напірний насос 8, який нагнітає імітаційну рідину, тиск якої перевіряється манометром 2. Далі імітаційна рідина напірним насосом 8 подається розчинопроводом 1 в плоскощільну головку 3, де протікає по колекторних каналах і на виході формується в умовну плівку, яка далі потрапляє у ванну 6. Після виходу на стаціонарний режим приймальну кювету 4 повертають, і вона розташовується таким чином, що плівка потрапляє в неї. Кювета розділена на 20 секцій.

Для візуалізації процесу плоскощільну головку виготовлено із органічного скла БФ-2 ГОСТ 12172-14. Головка складається із окремих трьох частин: верхньої плити, до якої кріпиться вхідний патрубок; середньої та кінцевої плит. Завдяки спеціальним прокладкам, які встановлюються між нерознімною та рознімними плитами, можливо збільшувати товщину розподільчої та кінцевої колекторної зон.

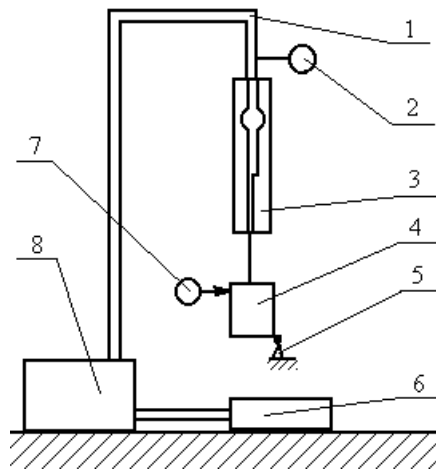


Рис. 3.1. Схема експериментального стенда для дослідження плоскощільної головки:

1 – розчинопровід; 2 – манометр; 3 – плоскощільна головка; 4 – приймальна кювета; 5 – поворотна консоль; 6 – ванна; 7 – контактний секундомір; 8 – напірний насос.

У плоскощільній головці для зміни кута нахилу колекторів застосовано розрізну втулку з похилими конусоподібними каналами, які переходять у формуючу щілину [54].

Конструкція головки дозволяє легко замінювати розрізну втулку на втулку з іншими геометричними параметрами. Розрізна втулка дає змогу оцінити вплив кута нахилу колекторів на значення як товщини, так і рівномірності плівки по ширині. На рис. 3.2,а зображено вигляд спереду; на рис. 3.2,б - поздовжній розріз головки, а на рис. 3.2,в – розріз втулки. Плоскощільна головка (рис. 3.2), містить верхню 1 і нижню 2 частини корпусу, які утворюють розчинопровід 3. Між ними встановлено розрізну втулку 4, натискні гвинти 5, а також ліву 6 та праву 7 губки формувальної щілини 8, які додатково регулюються рядом нижніх натискних гвинтів 9. У розрізній втулці виконано вхідний канал 10 та

конусоподібні канали (колектори) 11, які переходять у формуючу вихідну щілину 12.

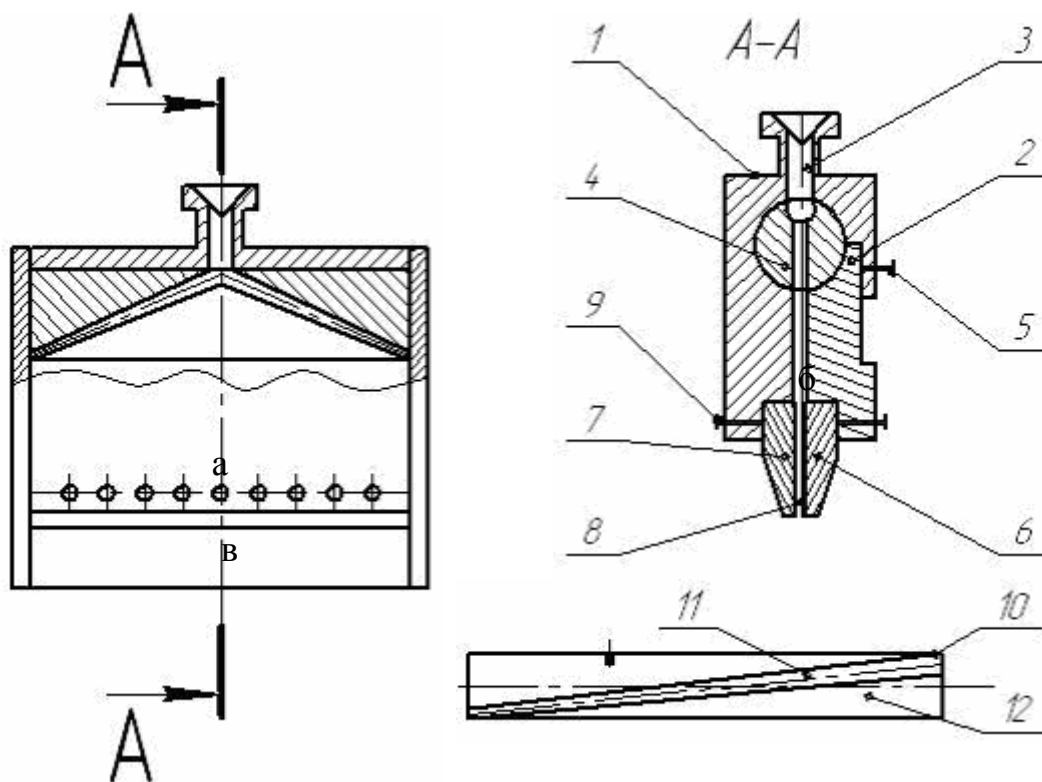


Рис. 3.2. Конструкція експериментальної плоскощілинної головки:

а) – вид спереду; б) – поздовжній розріз; в) – розріз втулки:

1,2 – корпус верхній та нижній; 3 – розчинопровід; 4 – розрізна втулка; 5,9 – натискні гвинти; 6,7 – губка ліва та права; 8 – формуюча щілина; 10 – вхідний канал розрізної втулки; 11 – конусоподібний канал розрізної втулки; 12 – вихідна щілина розрізної втулки.

Головка працює таким чином. З розчинопроводу 3 надходить імітаційна рідина у в'язкотекучому стані. Рідина потрапляє у вхідний канал втулки 10 і розподіляється по довжині каналів таким чином, щоб рівномірно надходити до всіх ділянок щілини 8, де формується плівка. Особливостями такого процесу формування є те, що при зміні технологічного режиму (тиску) змінюються локальні витрати матеріалу в кожному перерізі формуючої щілини. Регулювання товщини щілин, де проходить полімер, здійснюється за допомогою гвинтів 5 та 9.

Особливістю конструкції розрізної втулки є те, що в ній колекторні канали 11 виконані конусоподібними і під кутом, що дозволяє розплаву більш рівномірно розподілятися по ширині формуючої вихідної щілини 12. Для полегшення встановлення і центрування втулки на її поверхні виконано центральні отвори.

Після плоскощілинної головки умовна плівка (імітаційна рідина) потрапляє в приймальну ванну, яку поділено на 20 рівних частин. При наповненні ванни імітаційною рідиною візуально оцінюється її заповнення, потім виконується відведення ванни від потоку рідини та автоматично



вимикається контактний секундомір.

Досліди проводились таким чином: виставлялася необхідна ширина щілини на виході головки і вивчався вплив тиску на рівномірність витікання.

### **3.1.2. Вибір імітаційної рідини та опис установки для визначення її в'язкості**

Для проведення дослідів на експериментальному стенді в якості імітаційної рідини використовувався водний розчин полівінілового спирту. Серед інших рідин цей спирт найбільше підходить як рідина, що найкраще моделює реологію полімерів і має степеневий закон зміни напруження від швидкості зсуву [17].

Для приготування водного розчину полівінілового спирту його необхідно замочити на 6 годин у воді, а потім протягом 3 – 4 годин варити на водяній бані при температурі 96 – 98 °С, безперервно помішуючи.

Готовий розчин може легко змінювати свої властивості простим розбавленням водою, при цьому він не втрачає своїх в'язкісних властивостей при кімнатній температурі.

Для оцінки реологічних властивостей рідин використовують екструзійний пластометр МР600. Цей прилад дозволяє визначити індекс розплаву термопласту або параметрів напруження зсуву та швидкості зсуву на основі вимірювання швидкості витікання експериментальної рідини через калібрований капіляр при визначеному тиску та температурі. Випробування проводились за ДСТУ 11645.

Паспортом пластометра передбачені такі умови навколишнього середовища для роботи приладу:

- відносна вологість навколишнього повітря до 80 %;
- атмосферний тиск –  $(0,9 \div 1,14) \cdot 10^5$  Па (630-800 мм. рт. ст.);
- робоча температура повітря –  $10 \div 35^0$  С.

Робоча температура експериментальної рідини у віскозиметрі задається за допомогою електронагрівників. Потрібний тиск на рідину створюється за допомогою поршня, на який можна навісити додатковий вантаж. Рідина продавлюється через капіляр головки.

Досліди проводились з концентрацією водного розчину полівінілового спирту від 2 до 10%. При цих концентраціях водний розчин полівінілового спирту поводить ся як полімер [17].

### **3.1.3. Методика визначення реологічних характеристик імітаційної рідини**

Експериментальні дослідження проводились при кімнатній температурі. Під час випробувань розчин продавлювався під різною вагою через капіляр, який має діаметр 1,18 мм і довжину 5 мм згідно з ГОСТом 11645.

Випробування проводилися в такій послідовності. Експериментальну рідину заливали в екструзійну камеру і встановлювали поршень (запобіжна

планка в цей момент закриває капіляр головки). Протягом 15 хвилин прилад й експериментальна рідина прогрівалися водою до потрібної температури. Потім планку знімали і вимірювався час, за який рідина витікає в пробірку, і визначали масу рідини в пробірці.

Зваживши масу рідини, що витекла, визначали швидкість зсуву за формулою [15]:

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi r^3}, \quad (3.1)$$

де  $Q$  – витрати рідини ( $Q = \frac{m}{q\tau_{ep}}$ );  $r$  – радіус капіляра;  $m$  – маса рідини;

$q$  – щільність полівінілового спирту;  $\tau_{ep}$  – час витікання рідини.

Напруження зсуву визначається за формулою [15]:

$$\tau = \frac{\Delta p r}{2l}, \quad (3.2)$$

де  $\Delta p = \frac{4F}{\pi d_n^2}$  – перепад тиску в капілярі;  $l$  – довжина капіляра;  $F = M_e g$  – наван-

таження на поршень;  $d_n$  – діаметр поршня;  $M_e$  – маса вантажу;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Ефективна в'язкість знаходиться за формулою [15]:

$$\mu_0 = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}. \quad (3.3)$$

### 3.1.4. Методика вимірювання витрат рідини за шириною плоскощілинної головки

У приймальній кюветі плівка завдяки 19 перегородкам потрапляла в 20 секцій. В ході експериментів було встановлено, що при зміні тиску в діапазоні від 0 до 0,1 МПа на виході із головки плівка не утворювалася, а утворювалися струмки рідини, які впливають на рівномірність розподілу. З ростом тиску та збільшенням ширини щілини утворювалася плівка. Після заповнення секцій за певний проміжок часу ванна поверталася в початкове положення. Рідина, яка знаходилася в секції зважувалась та розраховувались витрати рідини за час заповнення ванни. По кожній секції плоскощілинної головки розраховувалась середня товщина умовної плівки і визначався розкид значення товщини плівки по ширині плоскощілинної головки. Слід відзначити, що цей метод дає середню товщину плівки на окремій ділянці.

Для перевірки точності товщини плівки, яка розраховувалася за експериментальними результатами, та визначення її локальної товщини в окремому місці по її ширині нами запропоновано новий метод, який полягає в наступному.

Поперек потоку полімеру (перпендикулярно до плівки) розташовувався тонкий золотий дріт (рис. 3.3) з мікросхеми ПБС 470 товщиною 20 мкм. Дріт

обрано золотим для запобігання його окислення.

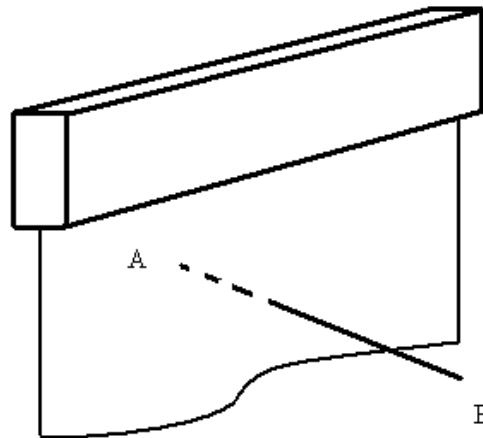


Рис. 3.3. Схема розташування дроту в потоці плівки

На фотографіях, наведених у додатку И, показано, що при використанні дроту діаметром більше 20 мкм спостерігається збільшення товщини плівки (набігання рідини). Тому в подальших експериментах використовували золотий дріт діаметром 20 мкм. На дріт подавалася напруга, за рахунок якої він нагрівався і його питомий опір змінювався. При попаданні плівки на дріт в залежності від її товщини температура дроту зменшується і його питомий опір змінюється. Для поновлення опору потрібно змінити напругу на дроті. Таким чином, експериментально можна встановити залежність зміни напруги від товщини плівки. Для цього нами розроблено електронну схему (рис. 3.4), яка дозволяє визначити товщину плівки в залежності від напруги  $U_{\text{вих}}$ .

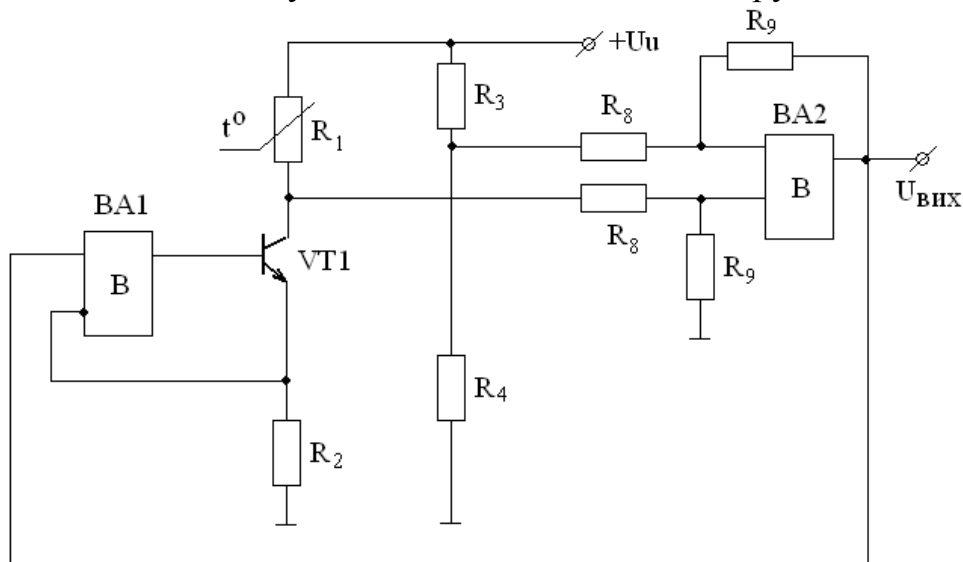


Рис. 3.4. Електронна схема вимірювання напруги  $U_{\text{вих}}$  в залежності від зміни опору  $R_1$ :

BA1, BA2 – операційні підсилювачі; VT1 – транзистор;  $R_1$  – опір дроту, який занурений в рідину;  $R_2, R_3, R_4, R_8, R_9$  – незмінні опори;  $U_U$  – стандартна напруга від універсального джерела живлення БП-5;  $U_{\text{вих}}$  – вихідна напруга, яка вимірюється приладом Tektronik TDS-220 з припустимим відхиленням 2%.

У наведеній схемі вихідна напруга з операційного підсилювача ВА2 поступає на вхід операційного підсилювача ВА1. В результаті, коли температура опору R1 зменшиться за рахунок збільшення товщини плівки, зросте напруга на вході операційного підсилювача ВА2, що викличе зростання напруги операційного підсилювача ВА1. Це призведе до встановлення рівноваги на опорі R1, але вже при більшому струмі. Слід зауважити, що чим більше товщина плівки, тим більше буде напруга  $U_{\text{вих}}$ . Між цими величинами існує залежність, яку можна встановити експериментально, побудувавши тарувальний графік, для побудови якого були виготовлені головки, що дають калібровані значення товщини плівок. Досліди показали, що швидкість витікання рідини практично не впливає на тарувальний графік. Це пояснюється тим, що дріт тонкий і на ділянці, де він торкається рідини, приймає температуру даної рідини. На основі отриманих результатів побудовано тарувальний графік (рис. 3.5).

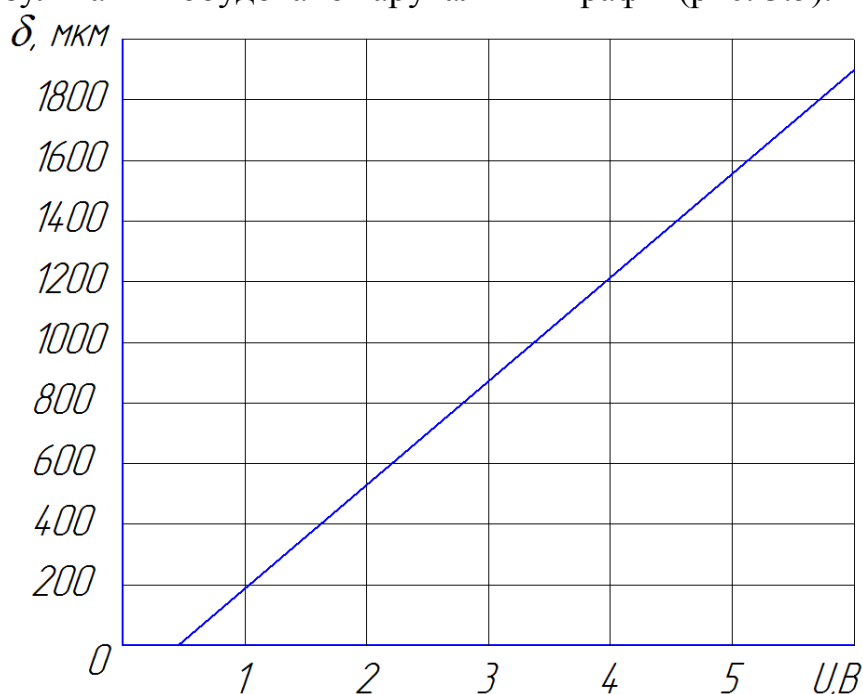


Рис. 3.5. Тарувальний графік залежності товщини плівки ( $\delta$ ) від напруги (U)

## 3.2. Промислова установка ламінування і методика проведення досліджень товщини та ширини полімерного покриття

### 3.2.1. Опис промислової установки ламінування

Досліди на промисловій установці ламінування проводились для перевірки математичної моделі. Враховуючи, що на промисловій установці можливо змінювати тільки ширину вихідної щілини та прогин губки, а інші геометричні параметри головки змінювати неможливо, в ході експериментів змінювались тільки 2 вказаних параметри, а також технологічні параметри – температура і тиск в межах, допустимих для проведення процесу. Інші геометричні параметри головки та технологічні параметри проведення процесу залишалися незмінними.

Вигляд промислової установки ламінування представлено на рис. 3.6. Принцип її роботи полягає в тому, що з пристрою 1 папір розмотується і поступає в ламінатор 2. Там він огинає охолоджуючий валок і на нього зверху із плоскощілинної головки 5 поступає розплавлений поліетилен у вигляді плівки. У загрузочний бункер 3 завантажується поліетиленова крихта, яка далі під дією сили тяжіння поступає в плавильний екструдер 4, де плавиться та під тиском проходить крізь розплавопровід у плоскощілинну головку 5.

У головці розплав поліетилену, проходячи колекторні канали та щілини, перетворюється в плівку, яка потрапляє на рухомий папір. Адгезія розплаву поліетилену і паперу забезпечується притискним валком. Далі ламінований папір поступає у верхню частину машини на пристрій обрізання кромки 6. Після обрізки кромки ламінований папір поступає на машину 7, де відбувається намотка ламінованого паперу в рулон.

Основною базовою частиною плоскощілинної головки є корпус 1, до якого за допомогою болтів 7,8 кріпляться решта деталей головки, а саме: права 2 та ліва 3 напівгубки, права 4 та ліва 5 губки, нагрівачі 6. Регулюючі болти 9 та гвинти 10 застосовуються для регулювання товщини формуючої щілини.

Корпус з обох боків покритий теплоізолюючим матеріалом у вигляді прямокутних пластин, які приєднуються до нього болтами. Він має ряд метричних отворів для приєднання контролюючих пристроїв (термопар).

Геометричні розміри формуючих каналів промислової головки наведені в табл. 3.1., а її фотокартка показана в додатку К.

Таблиця 3.1

Геометричні розміри внутрішніх каналів формуючої головки

Назва геометричного розміру	Розміри плоскощілинної головки
Діаметр вхідного патрубку (м)	0.076
Довжина вхідного патрубку (м)	0.15
Діаметр колектора на вході (м)	0.06
Діаметр колектора на виході (м)	0.04
Кут нахилу колектора до горизонту	6
Товщина вузької щілини (м)	0.000238
Товщина перехідної щілини (м)	0.0015
Довжина найбільш вузької щілини (м)	0.076
Ширина головки (м)	2.1
Кінцева висота положення колектора (м)	0.005
Прогин губки (м)	0.000003

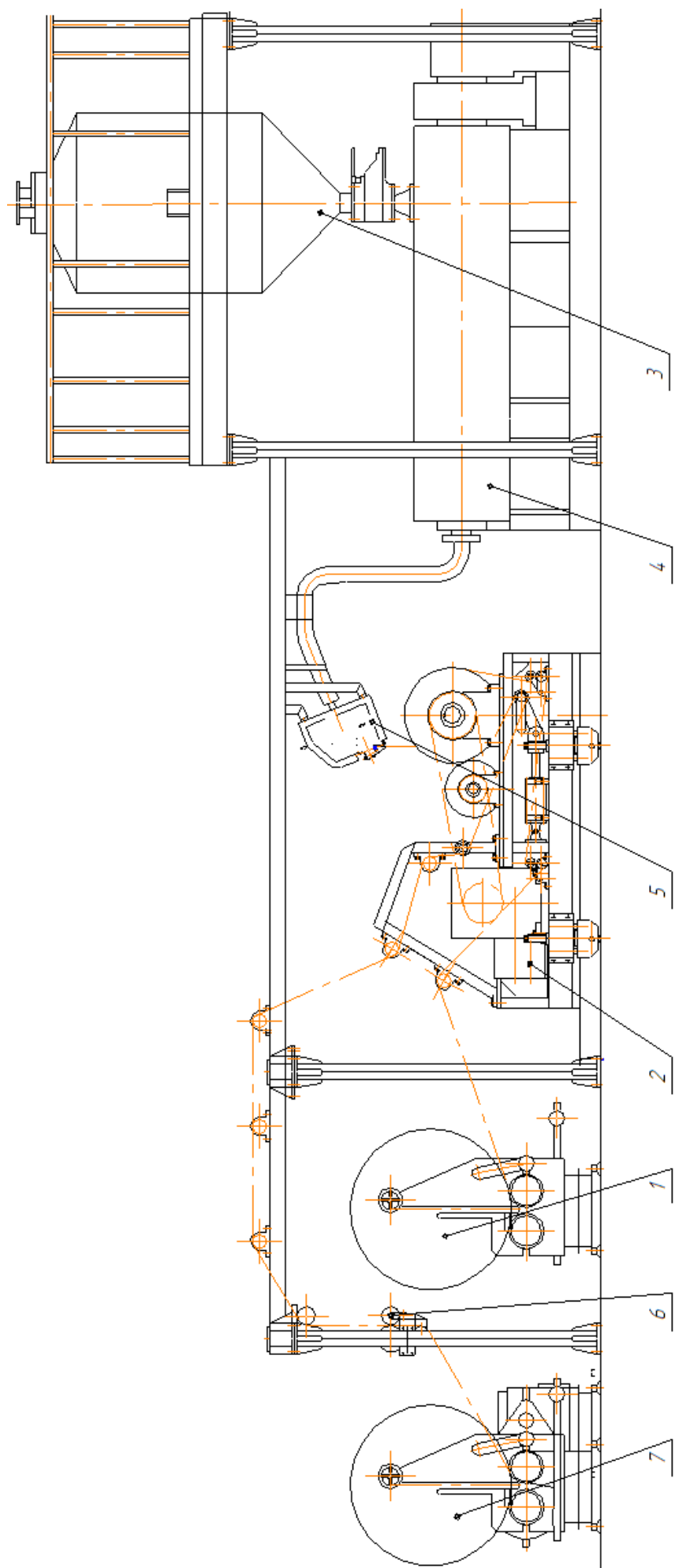


Рис.3.6. Лінія для ламінування паперу

1 - розмогуючий пристрій; 2 - ламінагор; 3 - бункер; 4 - екструдер; 5 - плоскощілинна головка; 6 - пристрій обрізки кромки; 7 - намотувальна машина.

У промисловій установці конструкція плоскощільної головки має вигляд, наведений на рис. 3.7

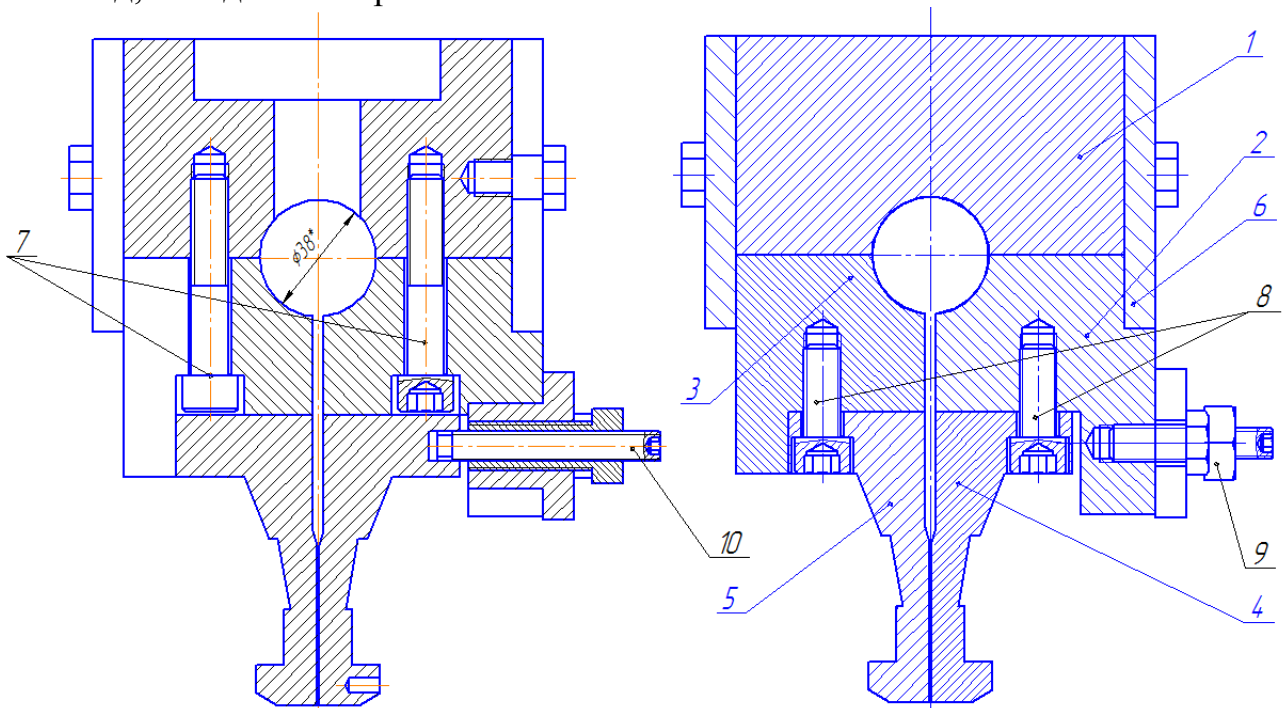


Рис. 3.7. Розрізи промислової плоскощільної головки:

1 – корпус; 2 – права напівгубка; 3 – ліва напівгубка; 4 – права губка; 5 – ліва губка; 6 – нагрівач; 7,8 – кріпильні болти; 9 – регулюючі болти; 10 – регулюючі гвинти.

### 3.2.2. Методика експериментальних досліджень товщини полімерного покриття промислової плоскощільної головки

Виміри товщини полімерного покриття проводились відповідно ТУ У 21.1 -31718340 – 003:2005 [27]. Згідно з цими технічними умовами для виготовлення зразків та вимірювання товщини нанесеного на папір покриття застосовувались:

- лінійка для вимірювання ширини плівки в рулоні та отримання зразків; одиниця виміру – міліметр (мм), похибка не перевищує  $\pm 0,5$  мм;
- ваги, одиниця виміру 500 (гр), похибка не перевищує  $\pm 0,00005$  г.

Всі досліджувані зразки ламінованого паперу беруть з рулонів після виходу на робочий режим виробництва.

Для вирізання зразків визначеного розміру або проведення вимірювання товщини плівки згідно з наведеним вище ТУ, необхідно відступити більше, ніж 0,5 м від кінця рулону для усунення крайових ефектів. Згідно з вищенаведеними технічними умовами вирізають зразки квадратної форми 50x50 мм: ріжуть поздовжні смуги шириною 50 мм, які потім розрізають на квадрати 50x50 мм. В результаті із ламінованого паперу шириною 2 м утворюється 40 зразків розміром 50x50 мм, які нумеруються в послідовному порядку.

Для дослідження товщини полімерної плівки, нанесеної на папір, слід відокремити полімерну плівку від паперу. Отримані зразки розміщують в кюветі

розміром 200x200 мм з уайт-спіритом та витримують там 5 хвилин, після чого плівка легко відокремлюється від паперу. Зразки, на яких плівка залишилась, замінюють на інші зразки з сусідньої смуги з такою ж нумерацією, після чого їх висушують в сушарці з вентиляційною системою відсмоктування повітря при температурі +70° С протягом 10 хвилин. На завершальному етапі зразки термостатують протягом 1,5 годин і зважують на електронних вагах.

### 3.2.3. Методика та установка для дослідження коефіцієнта тертя між папером та полімерним покриттям

При визначенні коефіцієнта тертя між папером та полімерним покриттям застосовується площина з нахилом, рис. 3.8.

Рух тіла по площині з нахилом під дією сили  $F$ , яка виникає від сили тяжіння  $mg$ , запобігає сила тертя  $F_{mp}$ . Ці сили залежать від кута нахилу площини та розміру сили тяжіння, і коефіцієнт тертя визначається:

$$f = \frac{F}{N} = \frac{m g \cdot \sin \alpha}{m g \cdot \cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha \quad (3.4)$$

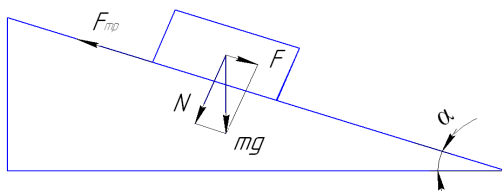


Рис. 3.8. Рух тіла по площині з нахилом

Коефіцієнт тертя рівний тангенсу кута нахилу площини і залежить від матеріалу і стану поверхні.

Згідно з міжнародним стандартом AS TM 1894-63 [147] та ГОСТом 10354-82 [148] для вимірювання коефіцієнта тертя полімерної плівки рекомендується використовувати випробувальну установку у вигляді похилої площини, зображеної на рис. 3.9. В якості рухомого вантажу застосовується металевий брусок масою 200 гр., покритий спіненою гумою завтовшки 3 мм. Цей вантаж обгортається папером, який досліджується, і встановлюється на столі або похилій площині, покритих полімерною плівкою. Стіл приводиться в рух з постійною швидкістю 150 мм/мін.

Установка для дослідження коефіцієнтів тертя пакувальних матеріалів складається із похилої площини 2 із змінним кутом нахилу, металевого бруска навантаження 4, вимірника кута нахилу похилої площини 3, плити установчої 1 (рис. 3.9).

Згідно з ГОСТом 10354-82 для вимірювань необхідно підготувати по 3 зразки розмірами 100x320 мм і 60x120 мм.



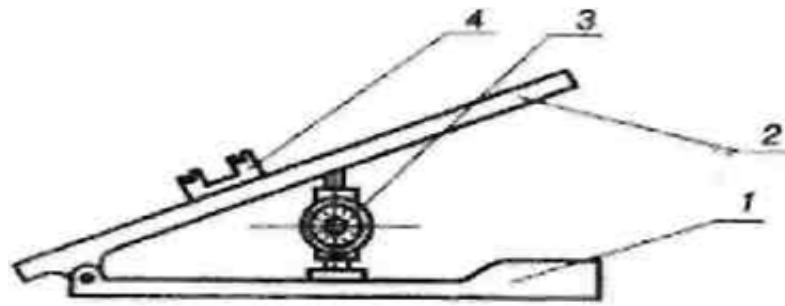


Рис. 3.9. Установка для дослідження коефіцієнта тертя  
1 – плита установча; 2 – похила площина; 3 – механізм підйомний з шкалою кута повороту плити; 4 – брусок навантаження матеріалу.

При визначенні коефіцієнта тертя підготовлений зразок полімерної плівки, розміром 100x320 мм, кладеться уздовж похилої площини, нижній край зразка згинається до нижньої кромки плити і фіксується затискачами. На бруску навантаження двома затискачами закріплюється зразок паперу 60x120 мм. В похилій плиті вмонтовані електронагрівники, які забезпечують нагрівання плівки до потрібної температури.

Досліди рекомендується проводити при температурі повітря  $+22,0 \pm 2,0$  °C і відносній вологості повітря  $50 \pm 5,0\%$ . Перед проведенням випробувань плита приладу встановлюється в горизонтальному положенні по рівню, шкала кута повороту - на відмітку «0». На плиті розміщують брусок навантаження, обгорнутий папером, і повільним обертанням диска плита приводиться в похиле положення. У момент початку руху бруска по похилій площині за шкалою фіксується кут нахилу плити. Тоді статичний коефіцієнт тертя розраховується за формулою:

$$f_{cm} = \operatorname{tg} \alpha . \quad (3.5)$$

Після трьох дослідів при одній і тій же температурі за остаточний результат приймається середнє арифметичне значення отриманих вимірювань і проводиться розрахунок критерію Кохрена.

#### **3.2.4. Методика проведення експериментальних досліджень ширини полімерного покриття, отриманого на промисловій установці**

Раніше було встановлено, що відстань від плоскощільної головки до валка визначає ширину плівки на папері. На рис. 3.10 показано вид зверху плівки при виході з головки. При контакті з папером плівка має меншу ширину, ніж папір. Це обумовлено тим, що не допускається попадання розплавленого полімеру на гумовий валок, який притискає папір з полімерною плівкою до охолоджуючого валка. В промисловій установці ламінування ширина головки складає 2100 мм. Відстань від плоскощільної головки до притискного валка може змінюватися в межах від 60 до 100 мм. Ширина полімерної плівки може змінюватися в межах від 2000 до 1800 мм.

Конструкція установки дозволяє змінювати положення ножів і отримувати

ламінований папір практично будь-якої ширини.

В ході проведення дослідів металевою лінійкою вимірювались:

- відстань від головки до валка  $l$ ;
- ширина головки  $B$ ;
- відстань від лівого краю паперу до полімерної плівки  $b_{л1}$ ;
- відстань від лівого краю полімерної плівки до місця обрізки  $b_{л2}$ ;
- відстань від правого краю паперу до полімерної плівки  $b_{п1}$ ;
- відстань від правого краю полімерної плівки до місця обрізки  $b_{п2}$ ;
- ширина ламінованого паперу після обрізки  $b_{лам}$ .

Ці вимірювання дозволяють дослідити вплив відстані від головки до валка на ширину плівки.

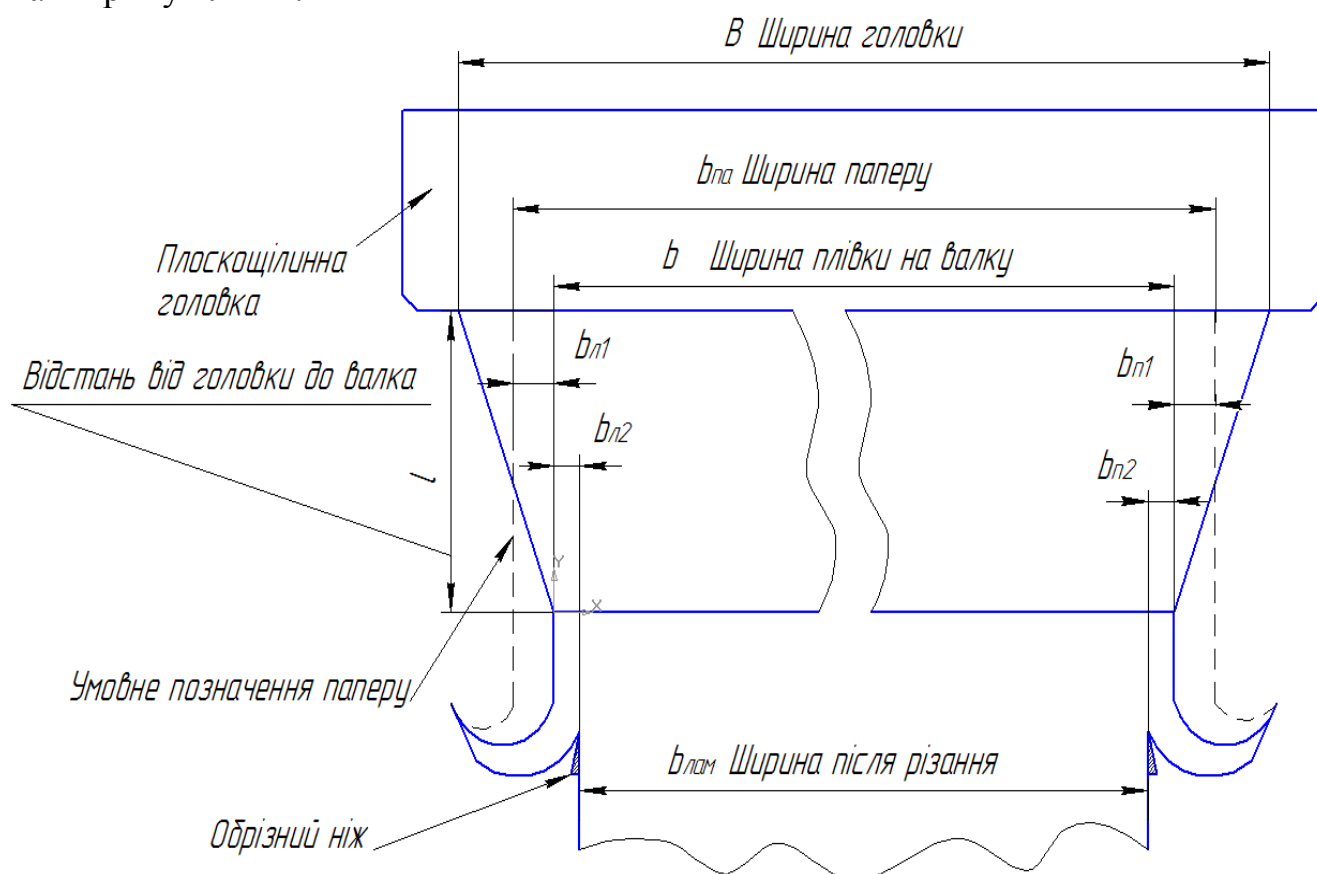


Рис. 3.10. Вид зверху на плівку при виході її із плоскощілинної головки

## РОЗДІЛ 4

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕЧІЇ ПОЛІМЕРНОЇ РІДИНИ В ПЛОСКОЩІЛИННІЙ ГОЛОВЦІ

#### 4.1. Проведення досліджень на експериментальній установці

Результати, які отримані на експериментальній установці, дозволяють порівняти теоретичні та експериментальні результати і встановити адекватність запропонованих математичних моделей. В дослідженнях течії полімерної рідини в плоскощільній головці, які проводились на експериментальній установці, змінювались такі фактори:

1. Тиск на вході в плоскощільну головку (в діапазоні 0,1-0,2 МПа).
2. Ширину щілини на виході із головки (в діапазоні 0,0002-0,0003 мм).
3. Кут нахилу колекторів (в діапазоні 5-12°).

Інші фактори змінити на розробленій установці неможливо.

##### 4.1.1. Дослідження реологічних характеристик імітаційної рідини

При дослідженні реологічних характеристик імітаційної рідини на віскозиметрі МР600 змінювались швидкість та напруження зсуву. За результатами експериментальних досліджень побудовано в логарифмічних координатах залежність напруження від швидкості зсуву різних концентрацій полівінілового спирту (рис. 4.1) при температурі 20 °С.

Для перевірки відтворюваності кожної серії паралельних дослідів обчислюємо середнє арифметичне значення швидкості зсуву ( $\bar{\dot{\gamma}}_j$ )

$$\bar{\dot{\gamma}}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \dot{\gamma}_{ji} \quad (j=1,2,\dots,N), \quad (4.1)$$

де  $\dot{\gamma}_{ji}$  – значення швидкості зсуву;  $j$  – поточне значення дослідів при різних умовах;  $i$  – поточне значення паралельних дослідів;  $N$  – число дослідів, проведених при різних умовах;  $k$  – число паралельних дослідів, проведених за однакових умов.

Далі обчислюємо оцінку дисперсії [149] для кожної серії паралельних дослідів.

$$S_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (\dot{\gamma}_{ji} - \bar{\dot{\gamma}}_j)^2, \quad (4.2)$$

де  $S_j^2$  – дисперсія.

Для перевірки відтворюваності дослідів знаходимо відношення максимальної оцінки дисперсії до суми всіх оцінок [149].

$$G = \frac{\max S_j^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2}, \quad (4.3)$$

де  $G$  – розрахунковий критерій Кохрена.

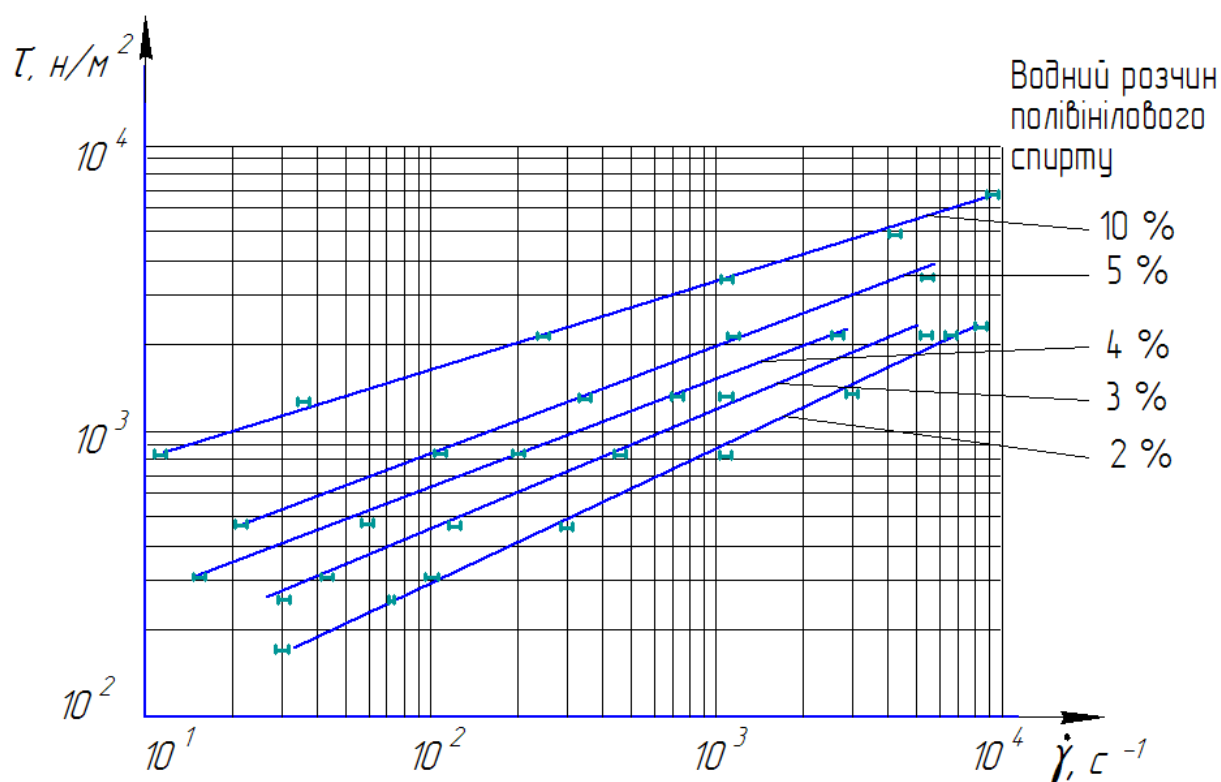


Рис. 4.1. Залежність напруження зсуву від його швидкості для різних концентрацій водного розчину полівінілового спирту

Результати розрахунків критерію Кохрена для проведених дослідів та порівняння його значення з табличним [149] показує, що досліди відтворюються з імовірністю 95 % при трьох паралельних дослідах, проведених за однакових умов.

Із графіків, наведених на рис. 4.1., видно, що для полівінілового спирту залежність напруження від швидкості зсуву в логарифмічних координатах має лінійний характер. Розглянута залежність схожа на залежність для розплаву поліетилену низького тиску, який використовується при виготовленні тонких плівок.

На підставі результатів експерименту для полівінілового спирту отримано математичну залежність напруження від швидкості зсуву та розраховано константи степеневого рівняння при концентрації спирту 5%:

$$\tau = 71,45 \cdot \dot{\gamma}^{0,368} \quad (4.4)$$

Похибка експериментальних значень не перевищує 4% від результатів, отриманих за рівнянням (4.4). Для інших концентрацій полівінілового спирту вигляд рівняння (4.4) змінюється на:

- концентрації спирту 2% –  $\tau = 11,24 \cdot \dot{\gamma}^{0,491}$ ;
- концентрації спирту 3% –  $\tau = 32,17 \cdot \dot{\gamma}^{0,411}$ ;
- концентрації спирту 4% –  $\tau = 59,74 \cdot \dot{\gamma}^{0,366}$ ;
- концентрації спирту 10% –  $\tau = 212,54 \cdot \dot{\gamma}^{0,312}$ .

#### 4.1.2. Дослідження витрат імітаційної рідини за шириною плоскощілинної головки

Результати, отримані на експериментальному стенді при витіканні полівінілового спирту, порівнюються з теоретичними значеннями, отриманими в результаті розрахунків за програмою. При цьому, за допомогою змінних вставок вивчався вплив кута нахилу колекторів на рівномірність товщини плівки.

Основні значення технологічних параметрів проведення процесу формування плівки та геометричні розміри внутрішніх каналів плоскощілинної головки експериментальної установи представлені в табл. 4.1. Діапазон змін значень кута нахилу колектора та першої товщини щілини більший, ніж у промисловій головці.

Таблиця 4.1

Базові значення показників

Назва показника		Значення показника
Діаметр розчинопроводу (м)	( $d_{\text{BX}}$ )	0,02
Довжина вхідного каналу (м)	( $L_{\text{BX}}$ )	0,01
Початковий діаметр колектора (м)	( $d_{\text{ГН}}$ )	0,014
Кінцевий діаметр колектора (м)	( $d_{\text{ГК}}$ )	0,0126
Кут нахилу колектора	( $\alpha$ )	5-12
Перша товщина щілини (м)	( $B1$ )	0,003
Друга товщина щілини (м)	( $B2$ )	0,0003
Довжина найбільш вузької щілини (м)	( $L2$ )	0,079
Ширина головки (м)	( $B$ )	0,40
Кінцева висота положення колектора (м) ( $l_{\text{К}}$ )		0,005
Тиск (МПа)	( $P_{\text{BX}}$ )	0,12
Водний розчин полівінілового спирту (%)		10

В результаті експериментів виявлено:

- при розмірі щілини 0,3 мм та зміні тиску в діапазоні 0,12÷0,15 МПа одержано відносно рівномірний розподіл рідини по ширині головки;
- при підвищенні тиску до 0,2 МПа витрата імітаційної рідини змінюється, але рівномірність витрат по ширині головки залишається незмінною.

Попередні досліди показали, що оптимальний кут нахилу колекторів знаходиться в діапазоні від 5 до 12°. Тому в експерименті використовувались вставні втулки з кутами нахилу колекторів 5, 9 та 12°. Досліди проводились при тиску 0,12 Мпа і 0,15 Мпа та товщині вихідної щілини 0,3 та 0,25 мм.

Співставлення експериментальних та теоретичних результатів зображено на рис. 4.2 – 4.8.

Із рисунків видно, що із зростанням кута нахилу колектора витрати полівінілового спирту по центру головки зменшуються, а на її периферії зростають. Вигляд цих графіків вказує на складний процес перерасподілу рідини в головці. При куті нахилу колекторів 7° коливання витрат по центру та на периферії головки не перевищують 6%.

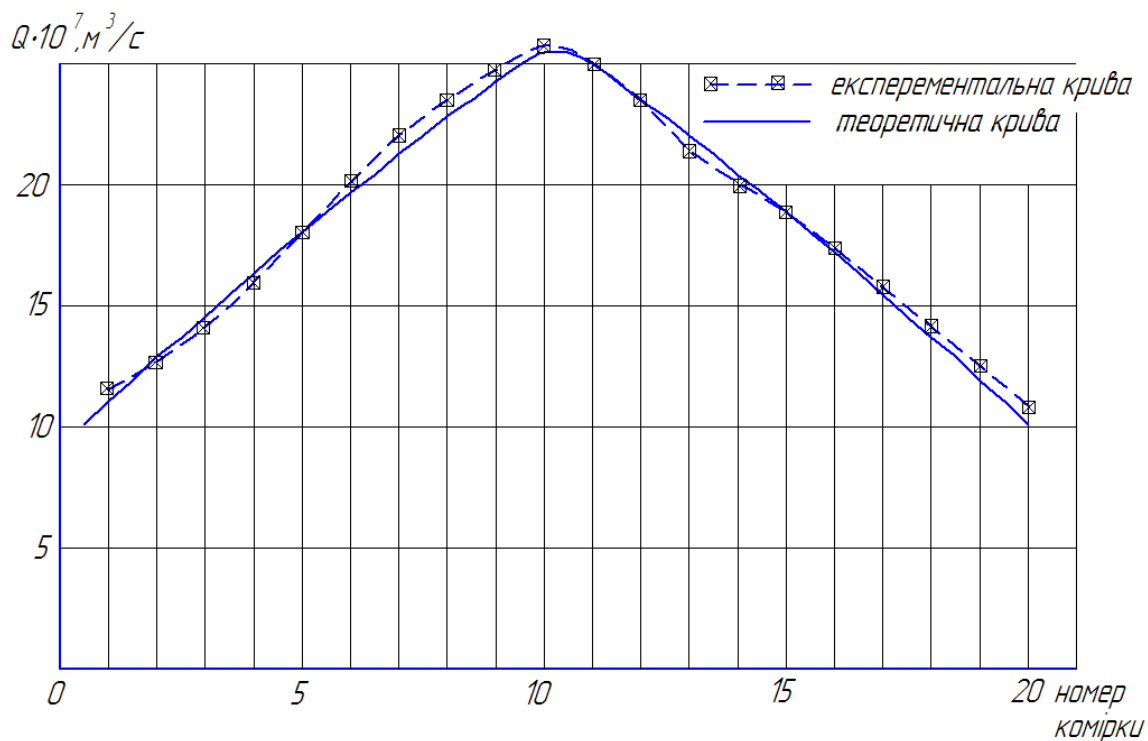


Рис. 4.2. Залежність витрат рідини (Q) по ширині головки при куті нахилу колекторів 4? та товщині щілини 0,0003 м

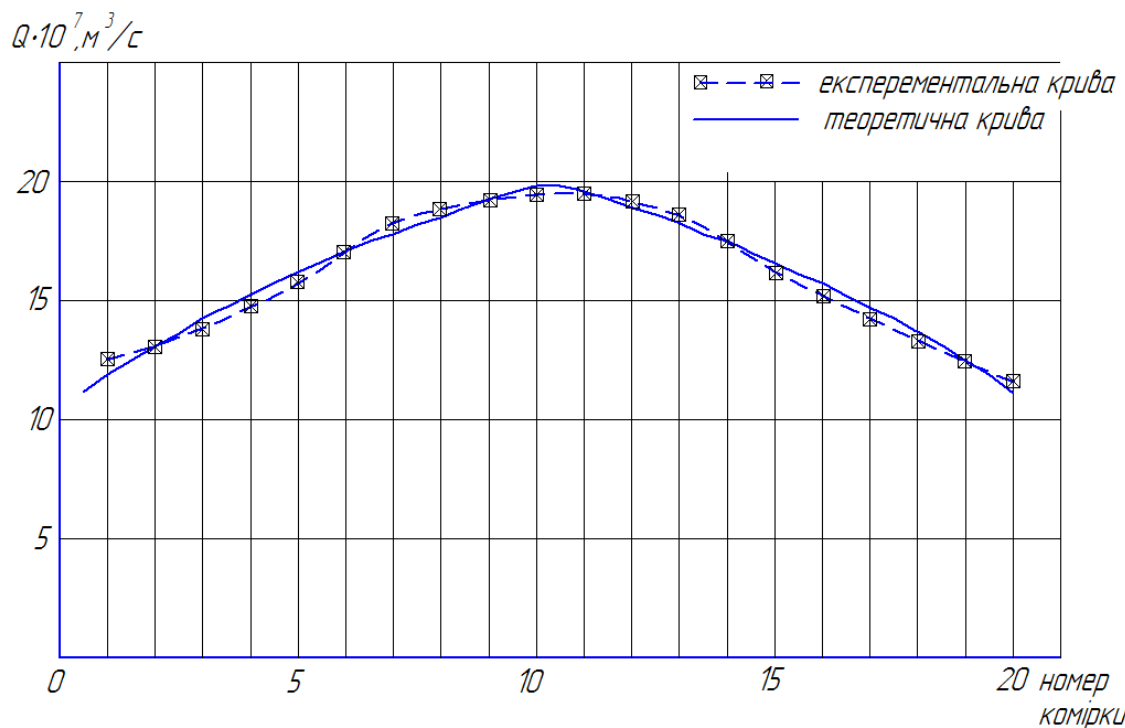


Рис. 4.3. Залежність витрат рідини (Q) по ширині головки при куті нахилу колекторів 5? та товщині щілини 0,0003 м

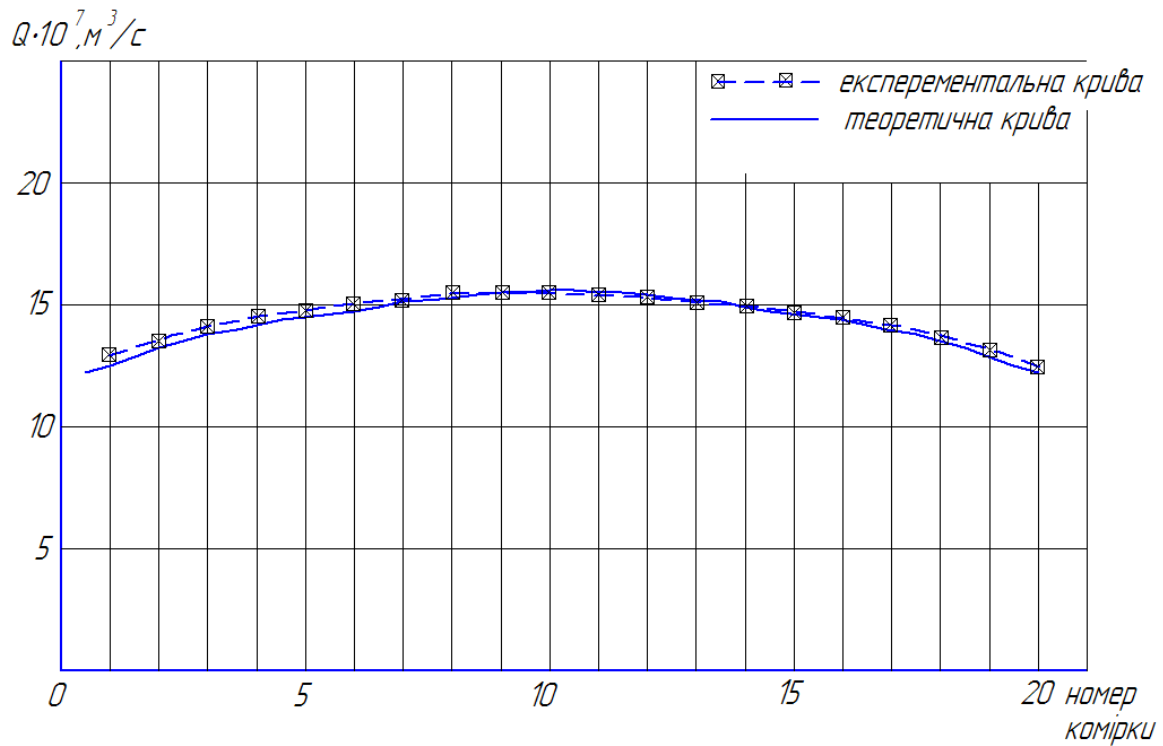


Рис. 4.4. Залежність витрат рідини ( $Q$ ) по ширині головки при куті нахилу колекторів 6? та товщині щілини 0,0003 м

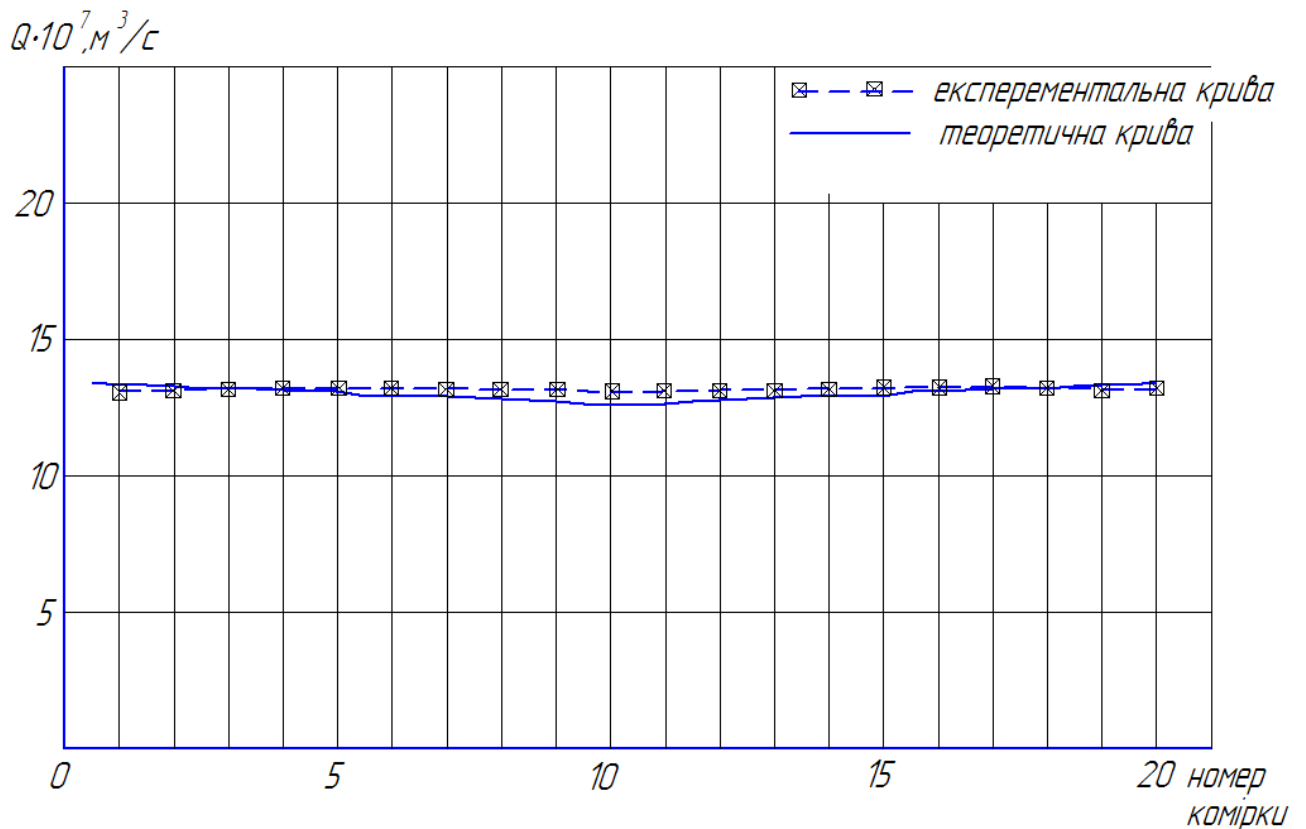


Рис. 4.5. Залежність витрат рідини ( $Q$ ) по ширині головки при куті нахилу колекторів 7? та товщині щілини 0,0003 м

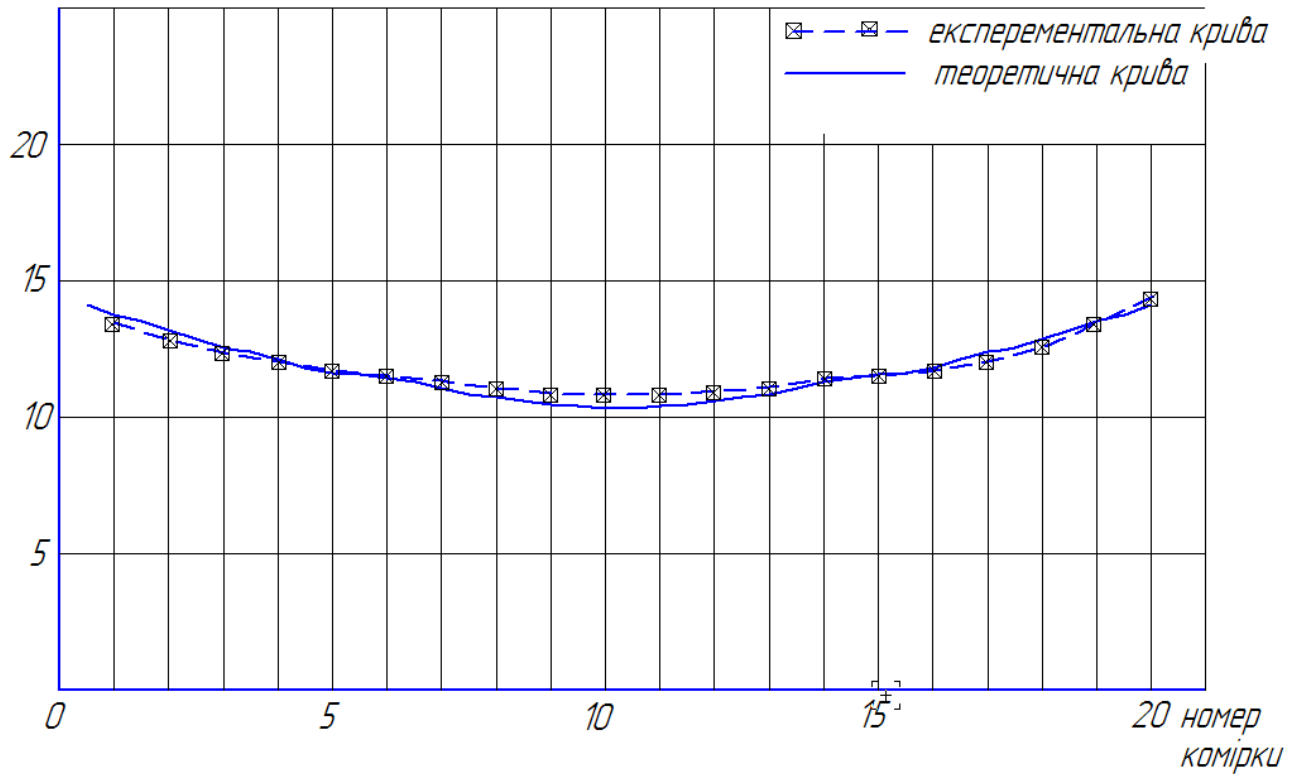
$Q \cdot 10^7, \text{м}^3/\text{с}$ 


Рис. 4.6. Залежність витрат рідини ( $Q$ ) по ширині головки при куті нахилу колекторів 8° та товщині щілини 0,0003 м

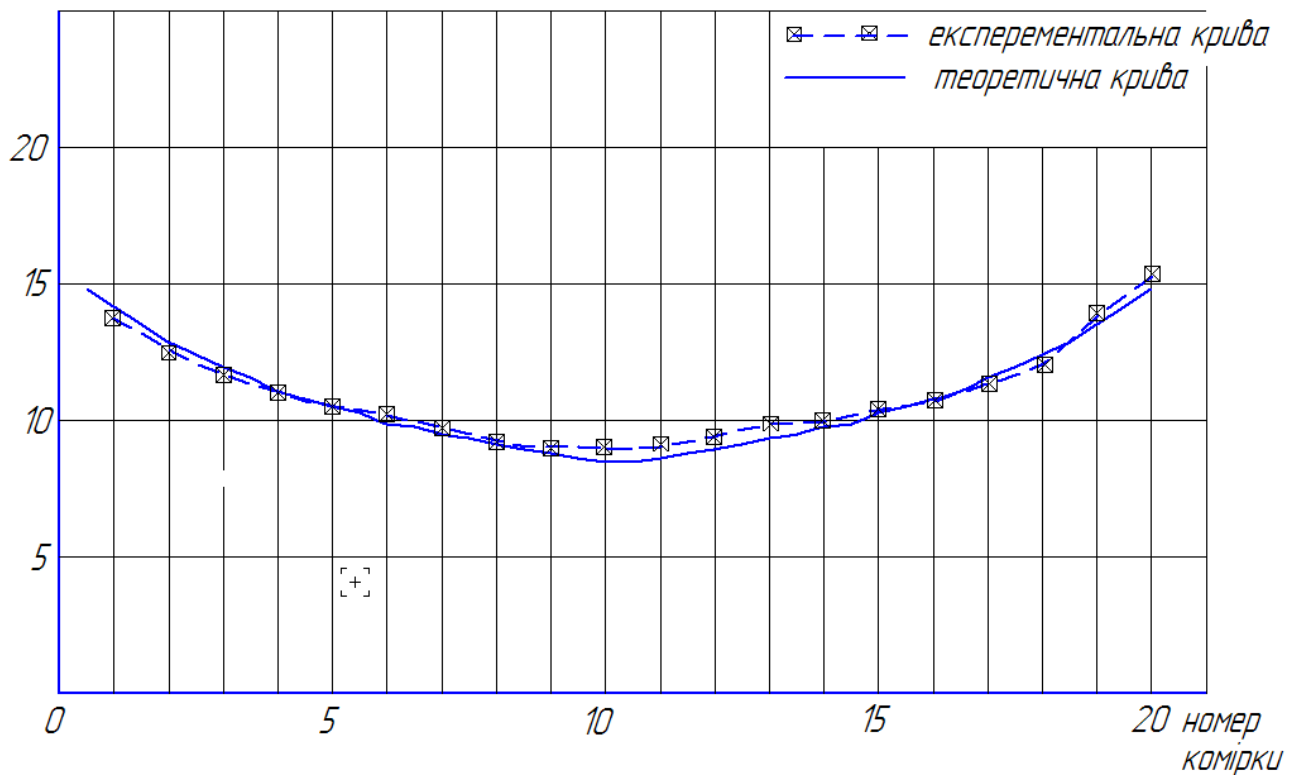
 $Q \cdot 10^7, \text{м}^3/\text{с}$ 


Рис. 4.7. Залежність витрат рідини ( $Q$ ) по ширині головки при куті нахилу колекторів 9° та товщині щілини 0,0003 м



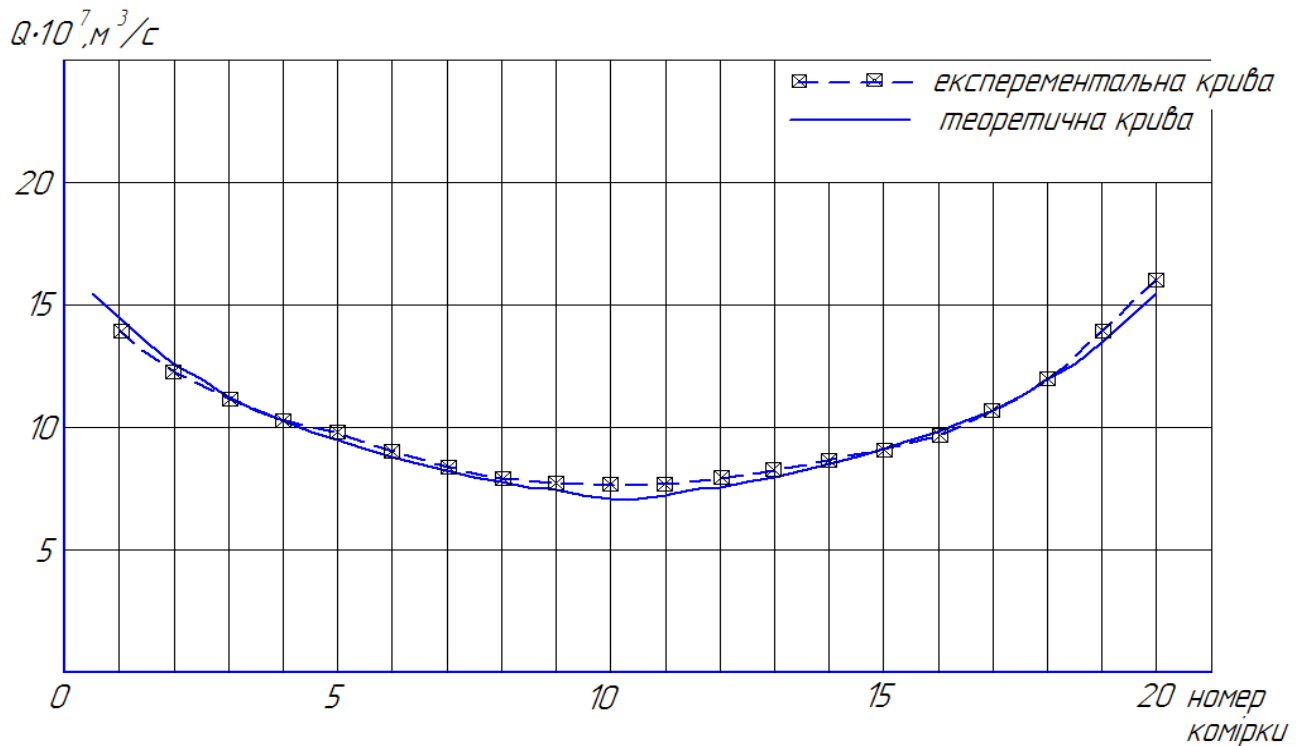


Рис. 4.8. Залежність витрат рідини ( $Q$ ) по ширині головки при куті нахилу колекторів  $10^\circ$  та товщині щілини  $0,0003$  м

Для визначення оптимального кута нахилу колекторів побудуємо графік витрат рідини всередині головки та на її периферії при різних кутах нахилу колекторів (рис. 4.9). Із графіка видно, що при зростанні кута нахилу витрати рідини по центру зменшуються значно скоріше, ніж зростають витрати на периферії головки. При куті нахилу колекторів  $6,8^\circ$  спостерігається рівномірна витрата рідини по ширині головки і відповідно цей кут нахилу колекторів є оптимальним.

Експериментальні дані показали, що імовірність відтворюваності дослідів складає  $95\%$ . Різниця результатів експериментальних значень витрат та теоретичних не перевищує  $12\%$ .

Таким чином, математична модель руху полімерної рідини в плоскощільній головці в даному діапазоні зміни ширини щілини та тиску рідини підтверджується результатами експериментів.

Для аналізу отриманих експериментальних даних побудуємо залежність коефіцієнта рівномірності витрат ( $k_B$ ) від кута нахилу колекторів. Рівномірність витрат розраховується за рівнянням:

$$k_B = \frac{q_{B.\min}}{q_{B.\max}}, \quad (4.5)$$

де  $q_{B.\min}$ ,  $q_{B.\max}$  — відповідно мінімальні та максимальні витрати.

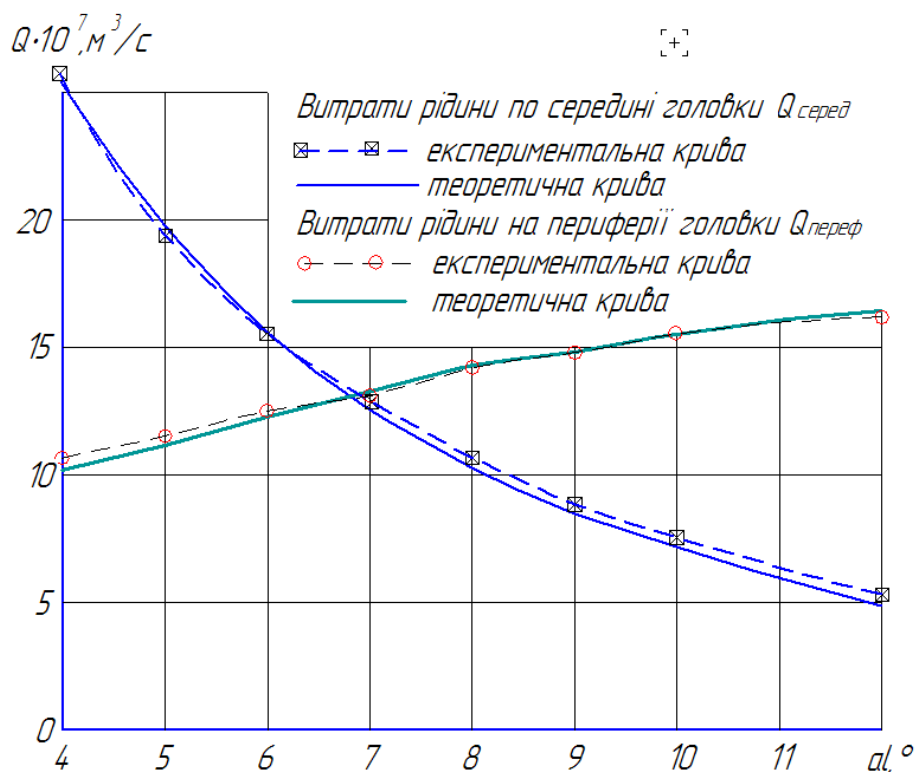


Рис. 4.9. Залежність витрат рідини всередині головки та на її периферії від різних кутів нахилу колекторів

Результати теоретичних розрахунків та експериментальних даних зображені на рис. 4.10.

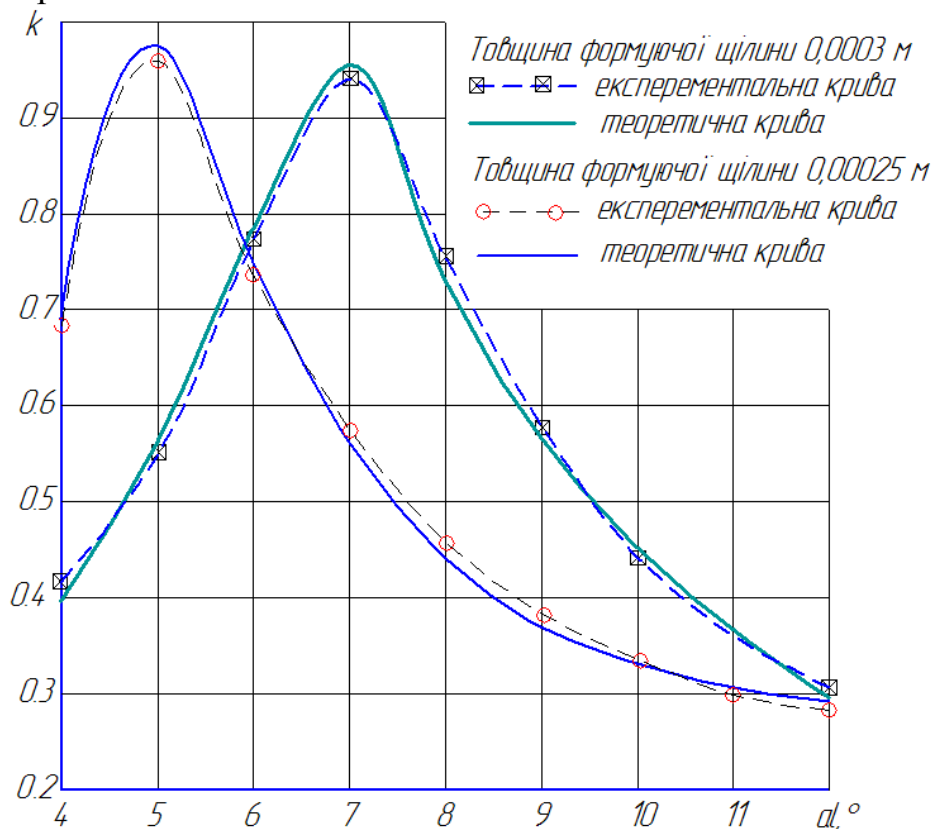


Рис. 4.10. Залежність коефіцієнта рівномірності витрат ( $k_b$ ) від кута нахилу колектора ( $\alpha$ )

З рис. 4.10 видно, що для даних розмірів експериментальної головки та при заданому тиску імітаційної рідини оптимальний кут нахилу колекторів для товщини 0.3 мм дорівнює 5°, а для товщини 0.25 мм відповідно 7°. Це вказує на те, що оптимальний кут нахилу колекторів залежить також і від товщини щілини. Невелика розбіжність між теоретичними та експериментальними даними підтверджує адекватність запропанованої методики розрахунку.

## **4.2. Проведення досліджень на промисловій установці**

Експериментальні дослідження руху імітаційної рідини в каналах експериментальної установки показали адекватність розробленої математичної моделі в частині впливу конструктивних показників плоскощілинної головки. Але для подальшого використання розробленої математичної моделі потрібна її перевірка в умовах реального виробництва. Задачами промислових досліджень було:

- виявлення факторів, що суттєво впливають на процес утворення полімерної плівки при ламінуванні;
- визначення впливу технологічних параметрів процесу на рівномірність товщини полімерної плівки, яка наноситься на папір;
- визначення залежності товщини полімерної плівки та її рівномірності від технологічних факторів.

### **4.2.1. Планування експериментальних досліджень для виявлення впливу конструктивних та технологічних параметрів виробництва на показники покриття**

При плануванні експериментальних досліджень потрібно враховувати, що на промисловій установці можливо змінювати технологічні параметри (тиск на вході в плоскощілинну головку, температуру обігріву головки, швидкість руху основи), а також окремі геометричні розміри, такі як кінцева ширина щілини та прогин губки. Зміна вказаних параметрів повинна бути в межах допустимих при проведенні технологічного процесу. В іншому випадку, при суттєвих змінах технологічних і геометричних параметрів можливий брак кінцевого продукту або поломка дорогого обладнання.

Тому при проведенні експериментальних досліджень в допустимих технологічним процесом межах змінювались такі параметри в діапазоні:

- температура розплаву (250-255°C);
- вхідний тиск (14-15 МПа);
- товщина вузької щілини (0,35-0,4 мм);
- прогин губки (0,0025-0,0045 мм).

Інші параметри процесу неможливо змінювати, оскільки це заборонено технологічним регламентом.

Для вказаних значень параметрів експериментально визначалась товщина полімерного покриття.

Норми технологічного регламенту виробництва ламінованого паперу

дозволяють змінювати технологічні і геометричні параметри проведення процесу в незначному діапазоні. Вихід значень параметрів за вказані межі неприпустимий, тому що це може призвести до руйнації головки.

Мета проведення досліджень експериментів полягала в тому, щоб отримати рівняння залежності товщини покриття та рівняння залежності коефіцієнта рівнотовщинності від технологічних та геометричних параметрів. Далі – порівняти результати експериментальних значень товщини та коефіцієнта рівнотовщинності плівки з результатами, які визначались теоретичними розрахунками за програмою, яка розроблена на основі блок-схеми (додаток Д).

Зміна геометричних та технологічних параметрів промислової установки здійснювалась таким чином:

- 1) вхідний тиск в головці регулювався зміною частоти обертів екструдера;
- 2) температура полімеру в екструдері регулювалась нагрівачами, які встановлені на головці;
- 3) зміна товщини вузької щілини здійснювалась переміщенням правої губки 4 і закріпленням її болтами 8 (рис. 3.7);
- 4) прогин губки регулювався болтами 9 і гвинтами 10 (рис. 3.7).

Досліди з вивчення впливу технологічних параметрів виробництва та геометричних параметрів головки розбиті на два етапи:

1. Вивчення впливу параметрів на товщину полімерного покриття по ширині полотна.
2. Вивчення впливу параметрів на рівномірність товщини полімерного покриття по ширині полотна.

Для отримання достовірних значень параметрів з 95% надійною ймовірністю, з урахуванням критерію Кохрена, відповідно до методики, викладеної в роботі [149] встановлено, що з в кожному досліді необхідно проводити три повторних.

#### **4.2.2. Результати дослідження впливу конструктивних та технологічних параметрів виробництва на товщину плівкового покриття**

Як вказано раніше, проведення експериментальних досліджень на промисловій установці ускладнено тим, що змінювати параметри на ній можливо в межах технологічного регламенту. Тому фактично на промисловій установці можливо проводити тільки пасивний експеримент, в якому фіксуються технологічні параметри проведення процесу ламінування паперу. Експериментальні дослідження показали, що прогин губки не впливає на товщину полімерного покриття, яке виробляється. Для виявлення впливу вхідного тиску  $P_{ВХ}$ , температури полімеру  $T$ , товщини вузької щілини  $B_2$  проведені розрахунки за програмою (рис. 2.11) і порівняно отримані результати з експериментальними даними. Для більшої наочності отриманих розрахунків вони представлені у вигляді номограми (рис. 4.11), яка дозволяє визначити товщину покриття при виробництві ламінованого паперу.

Проведення експериментальних досліджень на промисловій установці у

вказаних діапазонах зміни параметрів неможливе. Тому для порівняння експериментальних та розрахункових даних побудовано номограму в меншому діапазоні зміни тиску  $P_{ВХ}$ , від 14 до 15 МПа рис. 4.12.

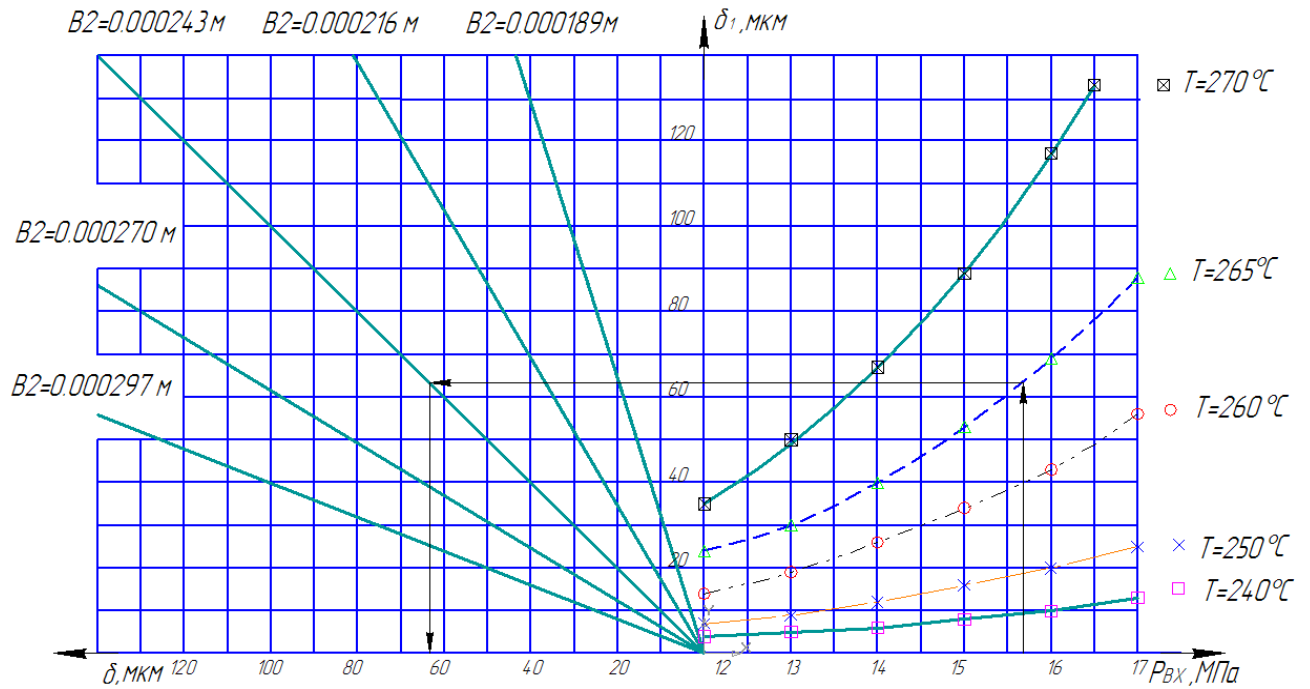


Рис. 4.11. Розрахункова номограма для визначення товщини покриття ( $\delta$ ) в залежності від тиску ( $P_{ВХ}$ ), температури ( $T$ ) та товщини вузької щілини ( $B2$ )

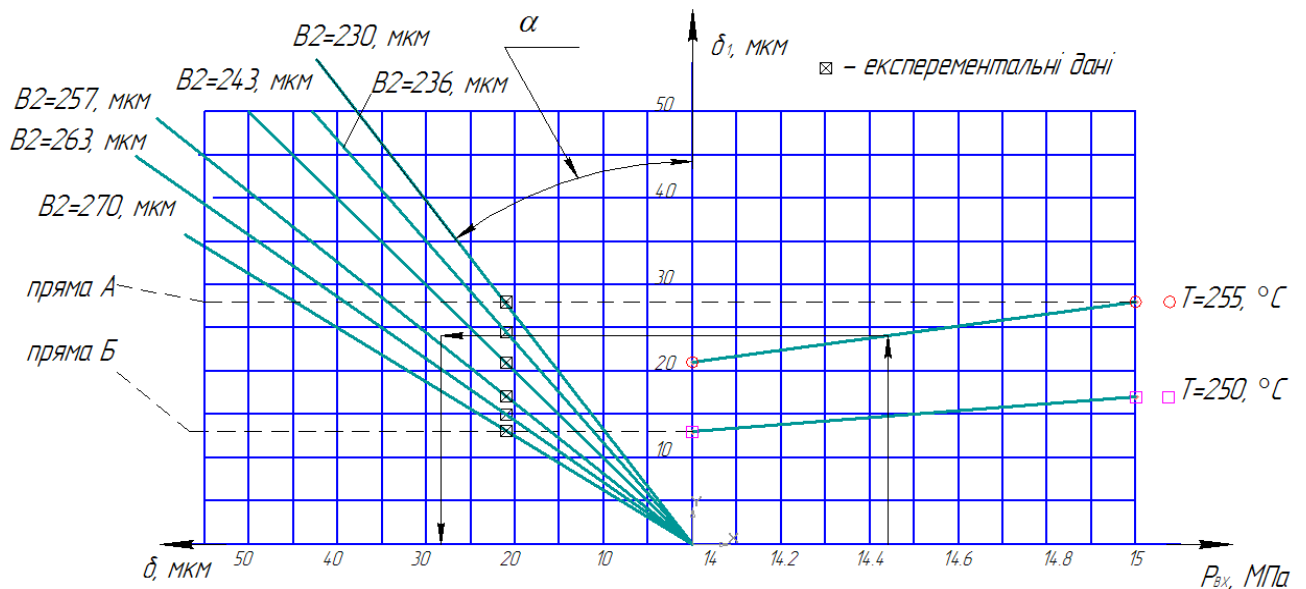


Рис. 4.12. Номограма для визначення товщини покриття ( $\delta$ ) в залежності від тиску ( $P_{ВХ}=14 \dots 15$  МПа), температури ( $T$ ) та товщини вузької щілини ( $B2$ )

Із номограми рис. 4.12 складно встановити похибку експериментальних та розрахункових значень товщини. Тому для порівняння товщини плівки, які отримані в експерименті та розрахованих згідно з номограмою, представлені в табл. 4.3.

Порівняння експериментальних та розрахункових значень товщини плівки

Тиск ( $P_{BX}$ ), МПа	Температура ( $T$ ), $^{\circ}C$	Товщина вузької щілини ( $B2$ ), мкм	Товщина покриття за номограмою ( $\delta$ ), мкм	Експериментальна товщина покриття ( $\delta$ ), мкм	Розбіжність, %
14	250	270	21,12	21,65	2,54
14	255	243	21,15	21,39	1,14
14,5	250	263	20,94	21,82	4,22
14,5	255	236	20,62	21,18	2,74
15	250	257	21,03	21,92	4,23
15	255	231	20,95	21,40	2,17

Як видно із таблиці, розрахункові значення незначно відрізняються від експериментальних і похибка не перевищує 5%.

Для підвищення точності розрахунку товщини покриття за номограмою опишемо її математичним рівнянням. Кінцева товщина покриття згідно з номограмою визначається рівнянням:

$$\delta = \operatorname{tg} \alpha \cdot \delta_1, \quad (4.6)$$

де  $\alpha$  – кут нахилу прямих постійної ширини щілини відносно осі  $\delta_1$ .

Враховуючи, що тангенс кута нахилу прямих є функцією від товщини вузької щілини  $B2$ , побудуємо графік залежності тангенса кута нахилу від ширини вузької щілини  $B2$ . З графіка видно, що крива може бути описана параболічною залежністю. Для розрахунку коефіцієнтів параболічного рівняння розроблена програма на алгоритмічній мові Pascal. Після розрахунку коефіцієнтів за програмою маємо рівняння для визначення тангенса кута  $\alpha$  в залежності від товщини вузької щілини  $B2$ :

$$\operatorname{tg} \alpha = 19.56 - 316805 \cdot B2 + 13 \cdot 10^8 \cdot B2^2. \quad (4.7)$$

В правій частині номограми, рис. 4.9, зображені криві залежності  $\delta_1$  від тиску  $P_{BX}$  для різних температур  $T$ . Ці криві також описуються параболічною залежністю типу:

$$\delta_1 = A_0 + A_1 \cdot P_{BX} + A_2 \cdot P_{BX}^2, \quad (4.8)$$

де  $A_0, A_1, A_2$  – коефіцієнти рівняння, які залежать від температури розплаву  $T$ .

Для розрахунку значень коефіцієнтів  $A_0, A_1, A_2$  була розроблена програма. Для кожного коефіцієнта побудовані графіки їх залежності від температури. Очевидно, що всі залежності можливо описати кубічним рівнянням типу:

$$A_i = d_0 + d_1 \cdot T + d_2 \cdot T^2 + d_3 \cdot T^3, \quad (4.9)$$

де  $d_0, d_1, d_2, d_3$  – коефіцієнти рівняння.

В результаті розрахунків по експериментальним даним визначені всі коефіцієнти в залежності від температури.

Підставивши всі визначені коефіцієнти  $A_i$  та  $d_i$  в рівняння (4.8), отримаємо

рівняння, яке описує вище наведену діаграму (рис. 4.12) і дозволяє розрахувати товщину покриття ( $\delta$ ) в залежності від товщини вузької щілини ( $B2$ ), температури полімеру ( $T$ ) і тиску ( $P_{BX}$ ):

$$\begin{aligned} \delta = & (19.56 - 316800 \cdot B2 + 1302 \cdot 10^6 \cdot B2^2)(389100 + 4748 \cdot T - 19.31 \cdot T^2 \\ & + 2.617 \cdot 10^{-2} \cdot T^3 + P_{BX}(5.557 \cdot 10^4 - 679.8 \cdot T + 2.771 \cdot T^2 - 3.766 \cdot 10^{-3} \cdot T^3) \\ & + P_{BX}^2(-2187 + 26.81 \cdot T - 0.1095 \cdot T^2 + 14.91 \cdot 10^{-5} \cdot T^3)). \end{aligned} \quad (4.10)$$

Отримані згідно з рівнянням (4.10) розрахункові значення відрізняються від експериментальних менш ніж на 5,4 %, що є прийнятним для практичних розрахунків.

#### **4.2.3. Результати дослідження впливу конструктивних та технологічних параметрів виробництва на рівномірність товщини плівкового покриття**

Раніше було показано, що на діючій промисловій установці при експериментальних дослідженнях можна змінювати вхідний тиск ( $P_{BX}$ ), температуру полімеру ( $T$ ), товщину вузької щілини ( $B2$ ) та прогин губки ( $\Delta y$ ). Тому для визначення впливу вказаних параметрів, які впливають на рівномірність товщини покриття, застосуємо чотирьохфакторний експеримент. При його проведенні змінювались фактори та їх рівні згідно з раніше наведеними даними (табл. 4.2). Метою експериментальних досліджень є отримання регресійного рівняння, яке дозволяє визначити вплив технологічних параметрів проведення процесу ламінування та геометричних розмірів формуючих каналів головки на коефіцієнт рівномірності товщини покриття. Розрахунки показали, що коефіцієнти при тиску ( $P_{BX}$ ) та парних взаємодіях вказаних раніше параметрів незначні, і тому регресійне рівняння має лінійну залежність від вказаних параметрів. Після проведення експериментальних досліджень в центрі плану було виявлено, що розрахункове значення критерію Фішера менше за табличне. Таким чином, регресійне рівняння з імовірністю 95% адекватне експериментальним даним і дозволяє розрахувати рівномірність товщини плівкового покриття в залежності від температури ( $T$ ), товщини вузької щілини ( $B2$ ) та прогину ( $\Delta y$ ) і має вигляд:

$$k = 2.4386 - 0.0046 \cdot T - 2087 \cdot B2 + 34350 \cdot \Delta y. \quad (4.11)$$

На підставі розрахунків побудована кругова діаграма (рис. 4.13), яка показує вплив вказаних параметрів у відсотках.

Як видно із кругової діаграми, найбільший вплив на коефіцієнт рівномірності товщини покриття ( $k$ ) має прогин губки ( $\Delta y$ ), що є дуже важливим для виробництва. На підприємстві при виробництві ламінованого матеріалу технолог змінює ці параметри виключно своїй інтуїції та досвіду. Це в більшості випадків призводить до отримання браку.

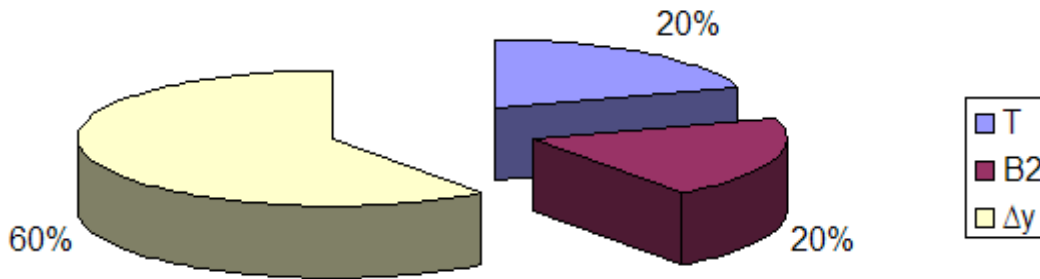


Рис. 4.13. Кругова діаграма, яка показує вплив у відсотках на коефіцієнт рівномірності товщини покриття ( $k$ ) температури полімеру ( $T$ ), товщини вузької щілини ( $B2$ ) та прогину губки ( $\Delta y$ )

Використовуючи номограму (рис. 4.12), технолог, обираючи товщини плівки та вузької щілини ( $B2$ ) визначає в дозволених межах технологічні параметри, а саме: температуру полімеру ( $T$ ) та тиск ( $P_{вх}$ ). Використовуючи рівняння (4.11) технолог може розрахувати прогин губки, при якому буде вироблятися більш якісний ламінований матеріал з більш рівномірною товщиною.

#### 4.2.4. Аналіз результатів експериментальних досліджень на промисловій плоскощілинній головці

З представленої номограми (рис. 4.12) видно, що результати розрахунку за допомогою математичної моделі та результати регресійних залежностей, отриманих експериментально, задовільно узгоджуються. Так, максимальне відхилення експериментальних даних від теоретичних не перевищує для розрахунку товщини покриття 6 %. З рівняння (4.11) видно, що більш рівномірне покриття можна виробляти при найменшій товщині вузької щілини ( $B2$ ) і при максимальному тиску, який може давати екструдер і витримати плоскощілинна головка, та при мінімальній температурі розплаву полімеру. Різниця експериментальних та теоретичних даних не перевищує 8%, що підтверджує адекватність наведених рівнянь. Це підтверджує правомірність використання розробленої математичної моделі для дослідження залежності товщини покриття та її рівномірності від технологічних параметрів, а також від внутрішньої геометрії плоскощілинної головки для отримання ламінованого паперу.

При виробництві покриття товщиною 21 мкм, обираємо такі параметри: товщина вихідної щілини ( $B2$ ) 230 мкм, температура розплаву ( $T$ ) 255 °C, прогин губки ( $\Delta y$ ) 4.5 мкм, тиск при вході в головку ( $P_{вх}$ ) 15 МПа. Слід відзначити, що на промисловій головці неможливо змінювати кут нахилу рукавів колектора. Цей параметр, як показано в розділі 3, значно впливає на рівномірність товщини плівки. Тобто, маючи одну незмінну конструкцію промислової головки, не можна виробити абсолютно якісний продукт, тільки змінюючи технологічні параметри. З цього випливає доцільність розробки методики проектування промислових плоскощілинних головок, про що йтиметься в наступному розділі.



### 4.3. Дослідження коефіцієнта тертя між папером та полімерним покриттям

За методикою, наведеною в розділі 3, проведено дослідження залежності коефіцієнта тертя від температури. Результати дослідження наведені на рис. 4.14.

При всіх значеннях температури похибка паралельних дослідів не перевищувала 9%.

З підвищенням температури до 110°C поліетилен розм'якшується і його коефіцієнт тертя по паперу зростає. З підвищенням температури понад 110°C коефіцієнт тертя зменшується, тому що поліетилен при такій температурі стає схожим на мастило. Слід відмітити, що коефіцієнт тертя згідно з формулою (2.50) буде впливати на кінцеву ширину покриття. Рекомендована температура поліетилену для кращої адгезії його з папером становить від 100 до 120°C [1-4], при якій плівка повинна торкатися паперу. При вказаних температурах коефіцієнт тертя буде перевищувати 0.55 і буде найбільшим.

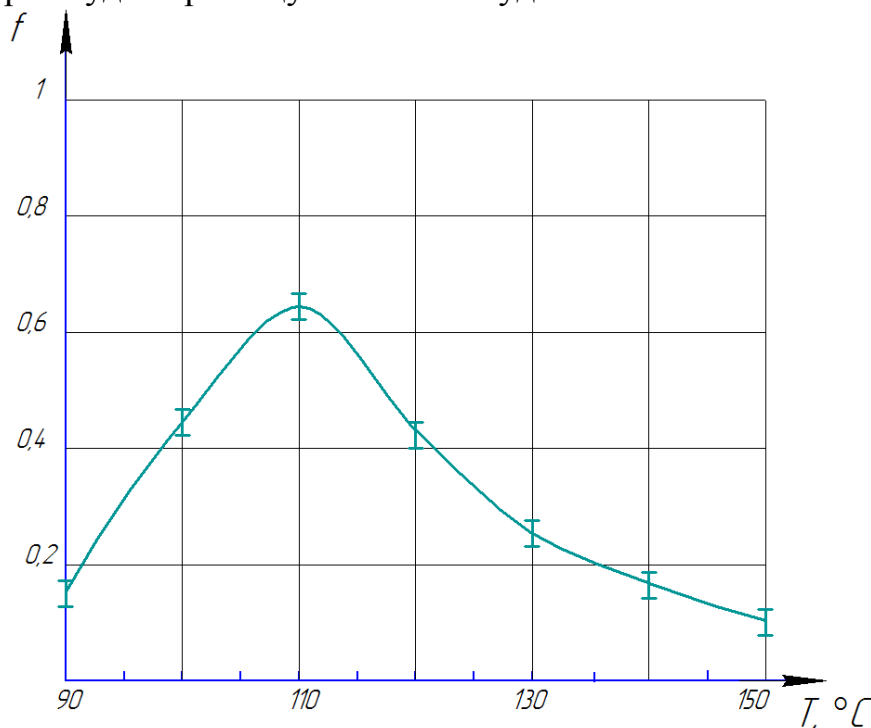


Рис. 4.14. Залежність статичного коефіцієнта тертя поліетиленової плівки марки 15802-020 по паперу від температури поліетилену

### 4.4. Дослідження залежності ширини витягнутої плівки від довжини зони витягування

При проведенні експериментальних досліджень на промисловій установці вимірювалась довжина зони витягування та ширина кромки, які відрізаються. Слід відзначити, що довжина зони витягування на промисловій установці регулюється переміщенням прижимного валка та охолоджуючого барабану за допомогою гідравлічної системи. Ця система піднімає та опускає їх, змінюючи

тим самим відстань між плоскощільною головкою та лінію контакту між полімерною плівкою та папером.

Експериментальні дані залежності ширини витягнутої плівки від довжини зони витягування, а також теоретичні розрахунки представлені у вигляді графіка, рис. 4.15.

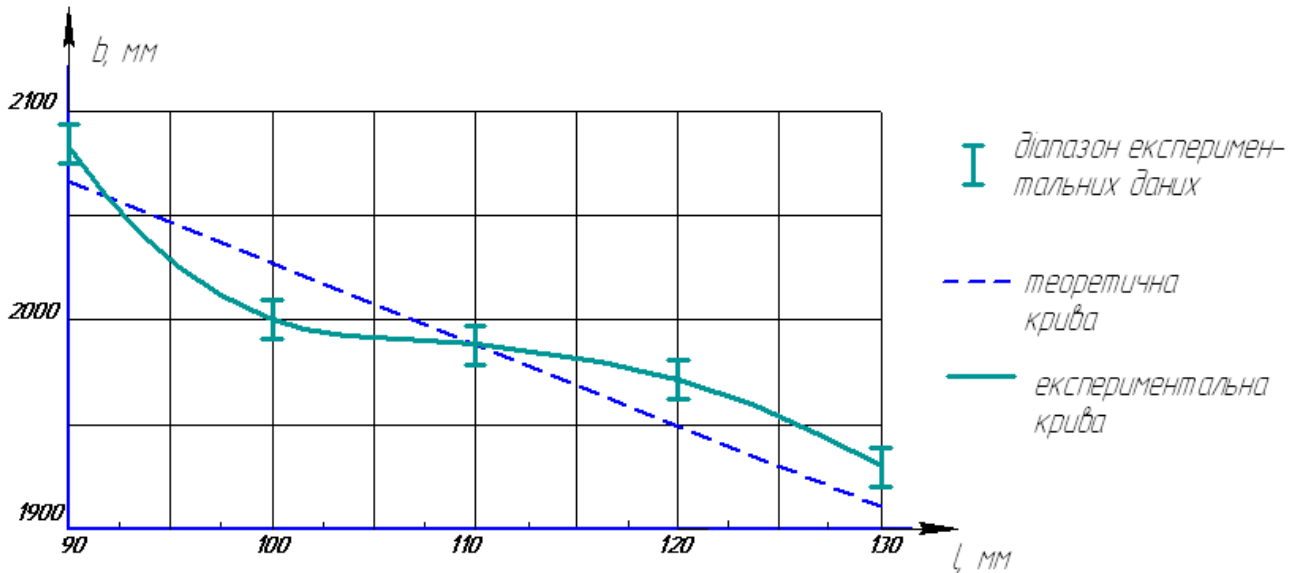


Рис. 4.15. Залежність ширини витягнутої плівки ( $b$ ) від довжини зони витягування ( $l$ )

Для порівняння експериментальних результатів ширини витягнутої плівки з розрахунковими за рівнянням (2.50) потрібно знати коефіцієнт тертя. Нами раніше було встановлено, що коефіцієнт тертя залежить від температури. Температура поліетилену на охолоджуючому барабані вимірювалась за допомогою інфрачервоного термометра, похибка якого не перевищує  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Результати вимірювань показали, що на охолоджуючому барабані температура поліетилену становить  $100^\circ\text{C}$ . Відповідно до цієї температури коефіцієнт тертя за графіком, рис. 4.14, дорівнює 0.55. З його врахуванням теоретична залежність зміни ширини витягнутої плівки ( $b$ ) від довжини зони витягування ( $l$ ) буде мати вигляд рис. 4.15.

Як видно з графіка, похибка між теоретичними та експериментальними значеннями ширини витягнутої плівки не перевищує 5%. Таким чином, теоретичне рівняння (2.50) добре описує експериментальні дані.

## РОЗДІЛ 5

### РОЗРАХУНОК КОНСТРУКЦІЇ ПРОМИСЛОВОЇ ПЛОСКОЩІЛИННОЇ ГОЛОВКИ ДЛЯ ЛАМІНУВАННЯ ПАПЕРУ

#### 5.1. Інженерний метод проектування плоскощільних головок

Як зазначалося раніше, полімерне покриття, нанесене на папір, має бути максимально рівномірним за товщиною, оскільки цей показник впливає на такі властивості, як зовнішній вигляд, максимальні розривні навантаження ламінованого паперу, а також на утворення місць з напливами полімеру. При вирішенні проблеми різнотовщинності плівкового полімерного покриття на виробництві застосовується притискна планка, що розташована в кінці плоскощільної головки. Але аналіз, проведений в попередніх розділах, показав, що застосування тільки притискної планки не вирішує проблеми різнотовщинності плівкового полімерного покриття. В першу чергу потрібно правильно розрахувати розміри внутрішніх формуючих каналів плоскощільної головки, а потім корегувати притискною планкою рівнотовщинність до потрібних показників. При проектуванні внутрішніх формуючих каналів слід враховувати вимоги до плоскощільних головок:

- рівномірний розподіл розплаву полімеру по всій ширині плоскощільній головки;

- герметичність;
- нескладне проведення технічної чистки головки;
- забезпечення широкого діапазону регулювання товщини покриття;
- забезпечення рівномірного температурного поля;
- відсутність застійних зон;
- якісна обробка внутрішніх поверхонь;
- універсальність;
- низька матеріаломісткість;
- простота конструкції.

Пропонується інженерний метод проектування плоскощільних головок для виготовлення плівкового полімерного покриття, в основі якого лежить математична модель течії полімеру в формуючих каналах головки. Використовуючи цей метод, можна розрахувати оптимальні розміри і розташування формуючих каналів та визначити технологічні параметри процесу ламінування, які забезпечать максимальну рівнотовщинність плівкового полімерного покриття.

Таким чином, запропонований метод проектування плоскощільних головок дозволяє вдосконалити існуючі технологічні процеси та розробляти нові конструкції плоскощільних головок, які забезпечують виробництво виробів вищої якості, ніж існуючі.

### 5.1.1. Розрахунок розмірів формуючих каналів плоскощілинної головки

Наведені в розділі 2 дані вказують на те, що існує оптимальний кут нахилу рукавів для різних типів полімерів, при якому отримане плівкове покриття буде більш рівнотовщинним. Однак, зважаючи на те, що ці дані отримані при визначених геометричних та технологічних параметрах, слід відзначити, що при інших параметрах (або незначних змінах хоча б одного з них) матимемо інші дані. Тому визначити оптимальні геометричні розміри внутрішніх каналів плоскощілинної головки можна при відомих початкових параметрах (табл. 5.1):

- товщині та ширині покриття;
- оптимальній температурі полімеру, при якій досягається найкраща його адгезія до покриття;
- тиску на вході в головку.

Таблиця 5.1

Початкові геометричні параметри внутрішніх каналів плоскощілинної головки та технологічні параметри виробництва

Постійні параметри	Позначення	Величина
Тип поліетилену	марка	17702-010
Діаметр вхідного патрубку, м	$d_{вх}$	0.12
Довжина вхідного патрубку, м	$l_{вх}$	0.5
Ширина головки, м	$B$	3.1
Прогин губки, м	$\Delta y$	0
Швидкість ламінованого матеріалу, м/с	$v_1$	1.5
Потрібна товщина плівки, мкм	$S_{nom}$	17
Довжина зони витягування, м	$l$	0.1
Вхідна температура, °C	$T$	250
Тиск початковий, МПа	$P_{вх}$	15

Розрахунки, які проведені за програмою, дозволили визначити раціональні геометричні розміри головки, табл. 5.2, при вказаних початкових параметрах.

Таблиця 5.2

Раціональні геометричні параметри внутрішніх каналів плоскощілинної головки

Раціональні геометричні параметри	Позначення	Величина
Діаметр рукава колектора на вході, м	$d_{rn}$	0.10
Діаметр рукава колектора на виході, м	$d_{rk}$	0.0505
Кут нахилу рукава колектора, град	$al$	7.8056
Товщина розподільчої щілини, м	$B1$	0.00179
Товщина вузької щілини, м	$B2$	0.0002885
Висота вузької щілини, м	$L2$	0.0549
Кінцева висота розташування рукава, м	$l1k$	0.0032

При вказаних параметрах розрахункове значення коефіцієнта рівнотовщинності дорівнює  $k=0.997$  при  $\Delta y=0$ .

Для оцінки оптимальності визначених параметрів проводились розрахунки з вивчення впливу на товщину та рівнотовщинність плівки змінних значень одного параметра в межах  $\pm 10\%$  і постійних значень інших параметрів. Розрахунки показують, що найбільше впливає на товщину полімерного покриття товщина вузької щілини ( $B_2$ ), висота вузької щілини ( $L_2$ ), тиск початковий ( $P_{BX}$ ), вхідна температура ( $T$ ). Вплив інших параметрів менше 5%. Представимо отримані результати розрахунку у вигляді графіків, рис. 5.1.

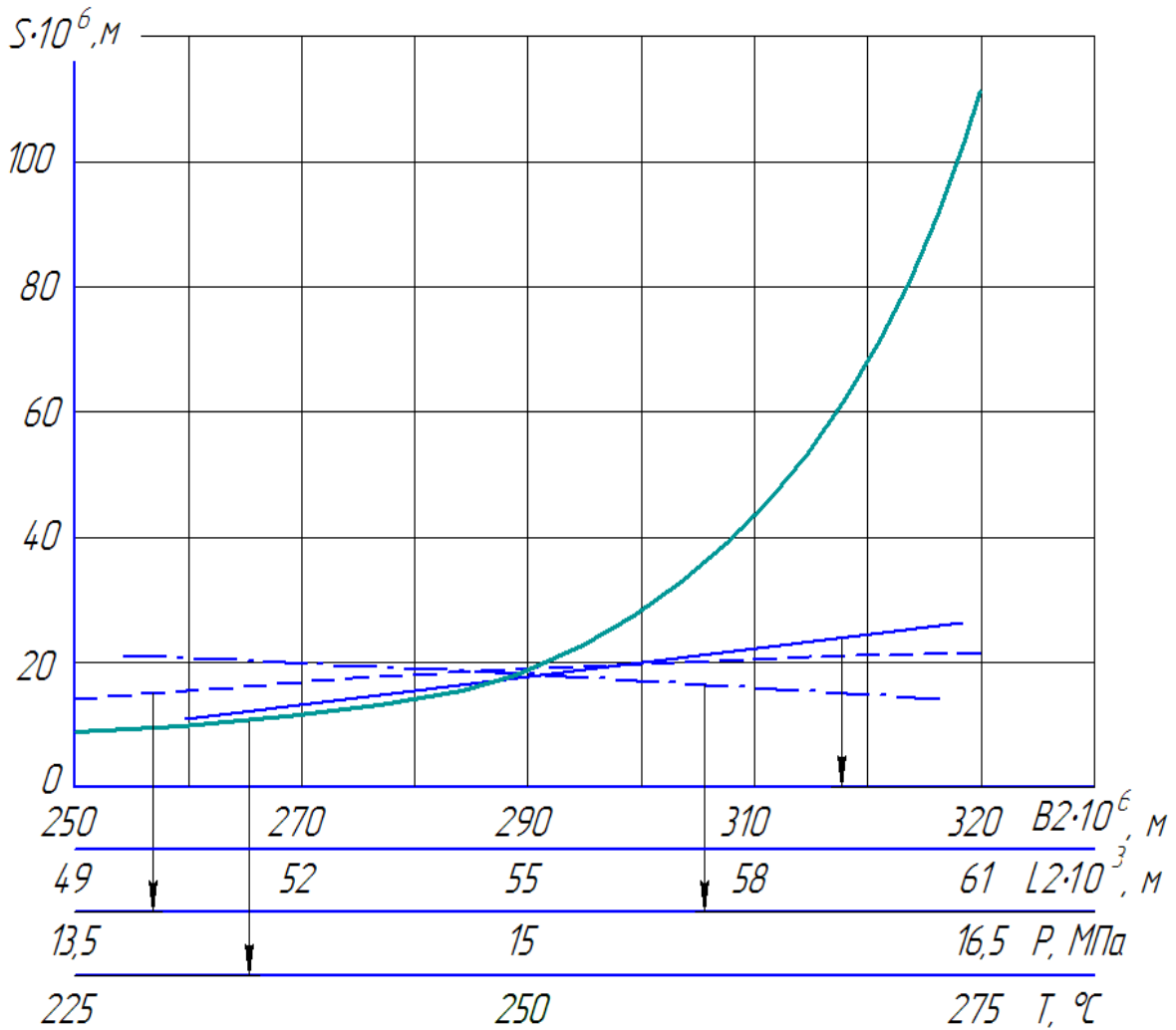


Рис. 5.1. Залежність середньої товщини полімерного покриття ( $S$ ) від товщини вузької щілини ( $B_2$ ), висоти вузької щілини ( $L_2$ ), тиску початкового ( $P_{BX}$ ), вхідної температури ( $T$ )

Із рис. 5.1 видно, що зі збільшенням товщини вузької щілини ( $B_2$ ) та тиску початкового ( $P_{BX}$ ) товщина полімерного покриття ( $S$ ) зростає. Причому, при зростанні товщини вузької щілини товщина полімерного покриття зростає швидше, ніж при зростанні тиску початкового. При зростанні висоти вузької щілини товщина полімерного покриття лінійно зменшується приблизно на 10%. Найбільший вплив на товщину полімерного покриття здійснює вхідна температура розплаву. Так, при зміні температури на 10% товщина покриття зростає на 550%. Таким чином, для грубого регулювання товщини покриття технологю потрібно спочатку відрегулювати вхідну температуру полімеру, а для

отримування більш точної товщини полімерного покриття використовувати параметри з плавними характеристиками. Такими параметрами, як видно із рис. 5.1, є товщина вузької щілини ( $B2$ ), висота вузької щілини ( $L2$ ), тиск початковий ( $P_{ВХ}$ ). Діапазон змін вказаних параметрів наведений на рис. 5.1.

Розрахунки показують, що на коефіцієнт рівнотовщинності найбільше впливає діаметр рукава колектора на виході ( $d_{rk}$ ), кут нахилу рукава колектора ( $al$ ), товщина розподільчої щілини ( $B1$ ), прогин губки ( $\Delta y$ ), а вплив інших параметрів незначний. Для визначення впливу вказаних параметрів на коефіцієнт рівнотовщинності побудуємо графіки, (рис. 5.2).

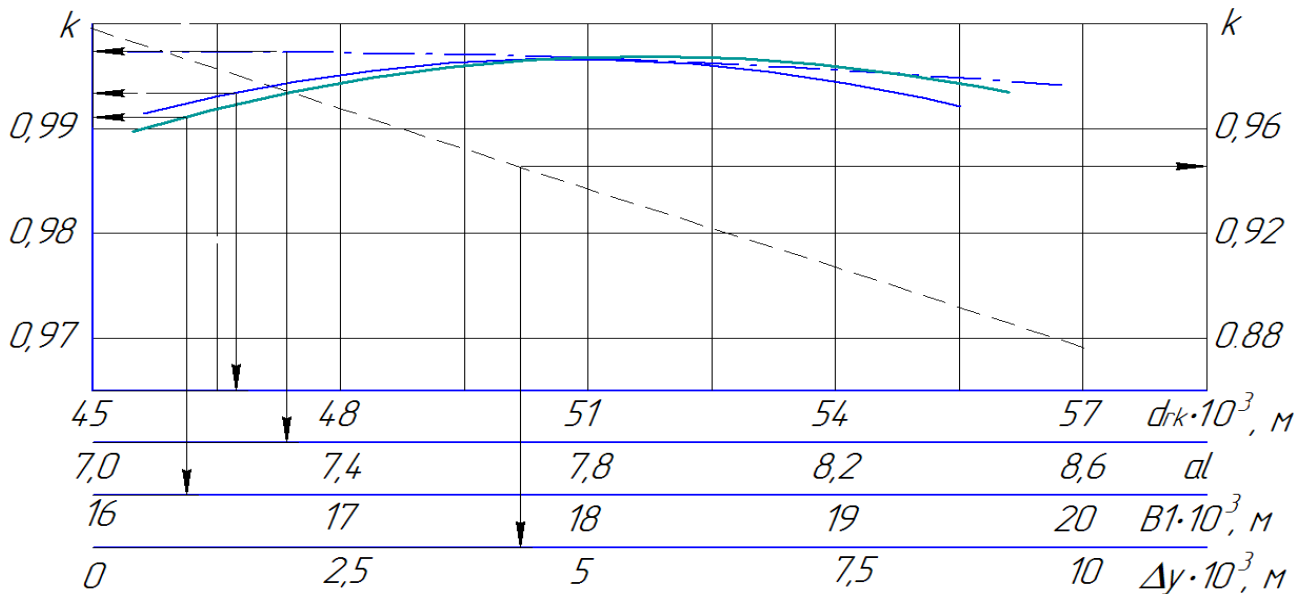


Рис. 5.2. Залежність коефіцієнта рівнотовщинності ( $k$ ) від діаметра рукава колектора на виході ( $d_{rk}$ ), кута нахилу рукава колектора ( $al$ ), товщини розподільчої щілини ( $B1$ ), прогину губки ( $\Delta y$ )

Із рисунка видно, що найбільший вплив на коефіцієнт рівнотовщинності має прогин губки. При зміні цього параметра товщина плівки змінюється суттєво.

Слід відзначити, що при переробці полімеру з іншими в'язкісними характеристиками розрахункові раціональні геометричні розміри будуть значно відрізнятися. Наприклад, для різних марок поліетилену, як видно з рис. 2.23, існують різні раціональні кути нахилу колекторів. В табл. 5.3 наведені раціональні значення геометричних розмірів внутрішніх формуючих каналів головки при відомих початкових даних, згідно з табл. 5.1, для окремих типів полімерів.

Як видно із таблиці, зі зміною марки полімеру значно змінюються раціональні параметри:

- кут нахилу рукавів колектора ( $al$ );
- товщина розподільчої щілини ( $B1$ );
- товщина вузької щілини ( $B2$ );
- висота вузької щілини ( $L2$ );
- кінцева висота розташування рукава ( $l_{1k}$ ).

Таблиця 5.3

Раціональні геометричні параметри внутрішніх каналів плоскощілинної головки для різних полімерів

Марка поліетилену	15802-020	10213-003	20606-012
Діаметр рукава колектора на вході ( $d_{гн}$ ), м	0.10	0.10	0.10
Діаметр рукава колектора на виході ( $d_{гк}$ ), м	0.05050	0.05069	0.05065
Кут нахилу рукава колектора ( $\alpha$ ), град	9.3637	8.9387	5.27324
Товщина розподільчої щілини ( $B1$ ), м	0.00130	0.00193	0.00138
Товщина вузької щілини ( $B2$ ), м	0.000202	0.0002868	0.000368
Висота вузької щілини ( $L2$ ), м	0.05400	0.02868	0.05421
Кінцева висота розташування рукава ( $l1k$ ), м	0.00340	0.00276	0.00194
Прогин губки ( $\Delta \cdot 10^6$ ), м	3	2	4
Коефіцієнт рівнотовщинності	0.995	0.996	0.992

### 5.1.2. Вибір матеріалу плоскощілинної головки

Вибір марки сталі для виготовлення головки зроблено на основі аналізу рекомендацій, приведених в літературі [1,3,12,14]. Рекомендовано застосовувати в якості конструктивного матеріалу леговану нержавіючу сталь, частіше марки 12Х21Н5Т.

### 5.1.3. Обґрунтування вибору шорсткості

Шорсткість поверхонь, по яких рухається розплав полімеру, вибирається на основі досвіду експлуатації плоскощілинних головок, які призначені для виготовлення плівки та полімерних волокон із різних полімерів.

Як зазначали автори [1,3,14,50], найбільш прийнятною шорсткістю для внутрішніх робочих поверхонь головки та робочої площини, так званого дзеркала головки, є шорсткість 0,32 мкм, яка досягається обробкою поверхонь поліруванням. Інші поверхні по яких відбувається прилягання пружно-деформованої та нерухомих губок, виготовляється з шорсткістю 0,63 мкм [1,3,14,50], яка забезпечує їх щільне прилягання та не дозволяє полімеру протікати в проміжок між губками.

Точність виготовлення деталей, які формують розмір щілини формуючого каналу, повинна бути 2 мкм.

Кромки щілини з боку дзеркала головки не повинні мати пошкоджень та задирок, радіус закруглення кромки на виході із головки не повинен перевищувати 4 мкм [1,14,50].

### 5.1.4. Розрахунок на міцність плоскощілинної головки

Розкриття плоскощілинної головки відбувається в їх центральній частині через наявність там максимального тиску полімеру, що призводить до утворення максимального згинального моменту, діючого на губки головки зсередини. Тому

розрахунок будемо проводити для найгіршого випадку.

Виділимо з губки плоскощільної головки смужку шириною  $b$  та розрахуємо з умови міцності товщину губки  $h$ . На рис. 5.3 зображена схема розподілу навантаження, приведеної до головної площини [52].

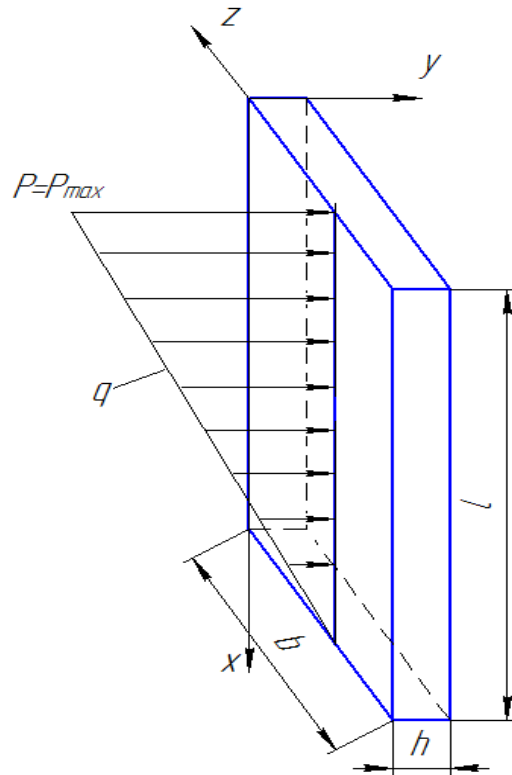


Рис. 5.3. Схема для розрахунку на міцність плоскощільної головки

Вважаємо, що розподіл тиску на ділянці  $l$  (відстань від осі розміщення стягуючих головку болтів до виходу матеріалу з головки) підкоряється лінійному закону.

Можна знайти товщину губки із рівняння:

$$h \geq \sqrt{\frac{P \cdot l^2}{[\sigma_{32}]}}. \quad (5.1)$$

Якщо товщина буде меншою, буде відбуватися неконтрольований прогин, що призведе до нерівномірності товщини.

### 5.1.5. Розрахунок плоскощільної головки на жорсткість

Для розрахунку плоскощільної головки на жорсткість розглядалась балка, закріплена консольно зі змінною жорсткістю (рис. 5.4) [52].

Для визначення рівнодіючої сили від розподіленого навантаження  $q$  та моменту у будь-якому перерізі використано метод перерізу (рис. 5.5).

Використовуючи формули опору матеріалів, отримано вираз для визначення прогину балки:



$$\omega = \frac{Pb}{24IE} \cdot \left( \frac{12l_1^2}{bh_1^3} (-l_1^3 + 4l \cdot l_1^2 - 6l^2 \cdot l_1 + 4l^3) + \frac{12(l-l_1)^5}{bh_2^3} \right) =$$

$$= \frac{P}{2IE} \left( \frac{l_1^2}{h_1^3} (-l_1^3 + 4l \cdot l_1^2 - 6l^2 \cdot l_1 + 4l^3) + \frac{(l-l_1)^5}{h_2^3} \right) \quad (5.2)$$

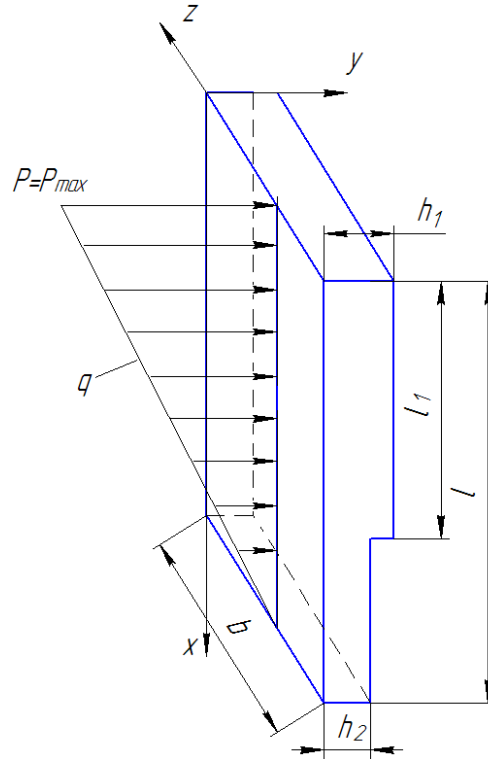


Рис. 5.4. Схема для розрахунку плоскощільної головки на жорсткість

Слід відзначити, що, підставляючи в це рівняння геометричні значення товщини  $h_1$ ,  $h_2$ , довжин  $l_1, l_2$  та  $l$ , модуля жорсткості металу  $E$ , можна розрахувати прогин балки.

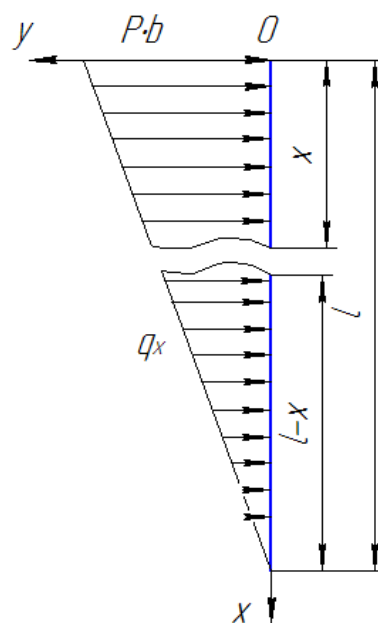


Рис. 5.5. Схема навантаження балки, яка вирізана з губки плоскощільної ГОЛОВКИ

Порівнюючи величину прогину та ширину щілини, визначено межі прогину, які складають:

$$\frac{\omega}{B2} = 0.5\% - 1.2\% .$$

Як показують розрахунки, саме такі межі прогину несуттєво впливають на розподіл полімеру по ширині головки.

### 5.1.6. Розрахунок потужності електронагрівників

Для проведення технологічного процесу ламінування плоскощільна головка має вийти на стаціонарний режим роботи за температурою протягом часу [1]. З цього випливає, що кількість теплоти  $Q$ , яка потрібна для цього, розраховується за формулою [1,3,14,50,52]:

$$Q = C_m \cdot M_\phi \cdot (T_k - T_n), \quad (5.3)$$

де  $C_m$  – теплоємність матеріалу головки;  $M_\phi$  – маса головки;  $T_k$  – кінцева температура розігріву;  $T_n$  – початкова температура головки.

Маса головки розраховується за формулою:

$$M_\phi = h \cdot b \cdot l \cdot \rho_m, \quad (5.4)$$

де  $h$  – висота головки;  $b$  – ширина головки;  $l$  – довжина головки;  $\rho_m$  – густина матеріалу головки.

Потужність, яка використовується електронагрівниками, визначається за формулою ( $N$ ,  $Вт$ )

$$N = \frac{Q}{\tau}, \quad (5.5)$$

де  $\tau$  – час нагріву головки до виходу на стаціонарний режим.

Із конструктивних міркувань визначається кількість електронагрівників. Розділивши загальну потужність на кількість електронагрівників, розраховується потужність кожного електронагрівника, а потім обирається найближча стандартизована потужність електронагрівників.

### 5.2. Напрями подальшого вдосконалення плоскощільних головок

В промисловості використовуються плоскощільні головки, які мають найчастіше перехідну щілину трикутного виду (рис. 1.4, рис. 2.1, рис. 3.7), з горизонтальною прямою лінією переходу до вузької щілини. З нашої точки зору, більш вигідна конструкція зображена на рис. 5.6. В цій головці перехід на тоншу щілину відбувається за криволінійною траєкторією, що дозволить рівномірніше розподілити полімер по ширині головки. Але виготовлення такої головки навіть сучасними металорізальними верстатами складне.

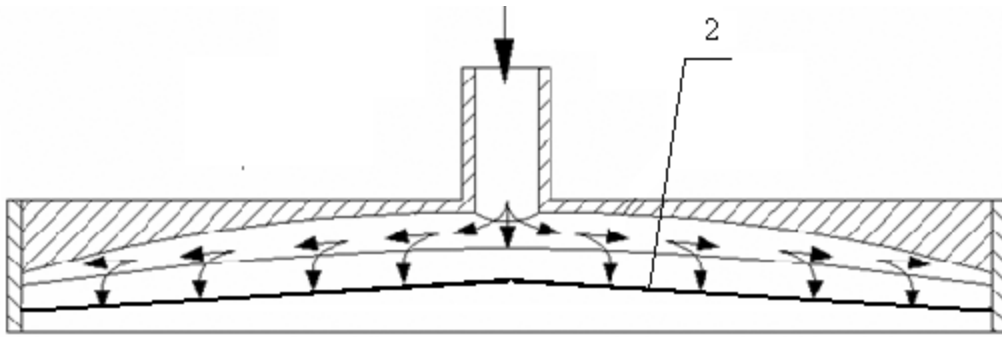


Рис. 5.6. Схематичне зображення перспективної плоскощільної головки

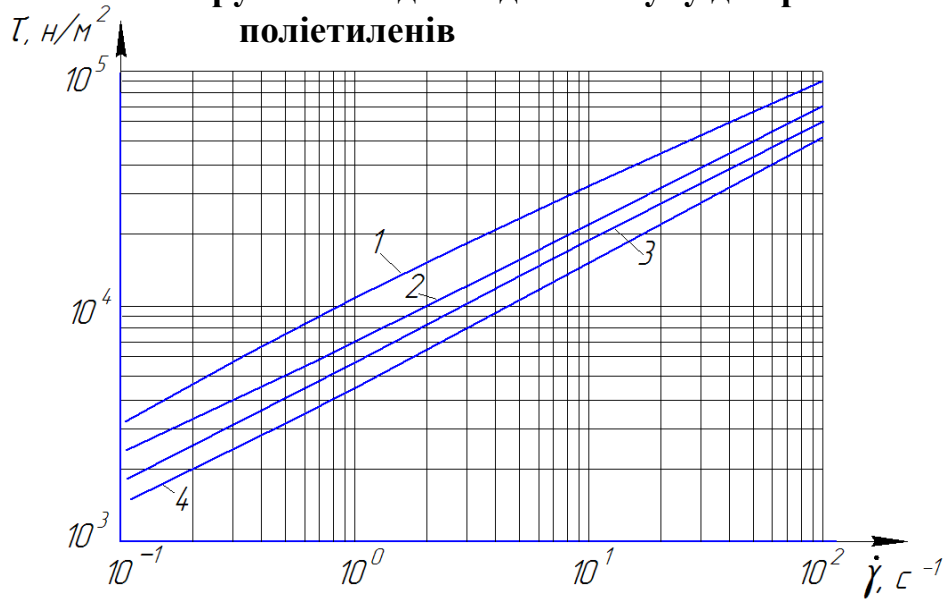
Слід зауважити, що не завжди вдається сконструювати головку з рівним опором по всіх траєкторіях руху полімеру, а регулюючі пристрої неспроможні повністю ліквідувати цю нерівномірність.

## Додаток А

Графіки залежності напруження від швидкості зсуву для різних поліетиленів

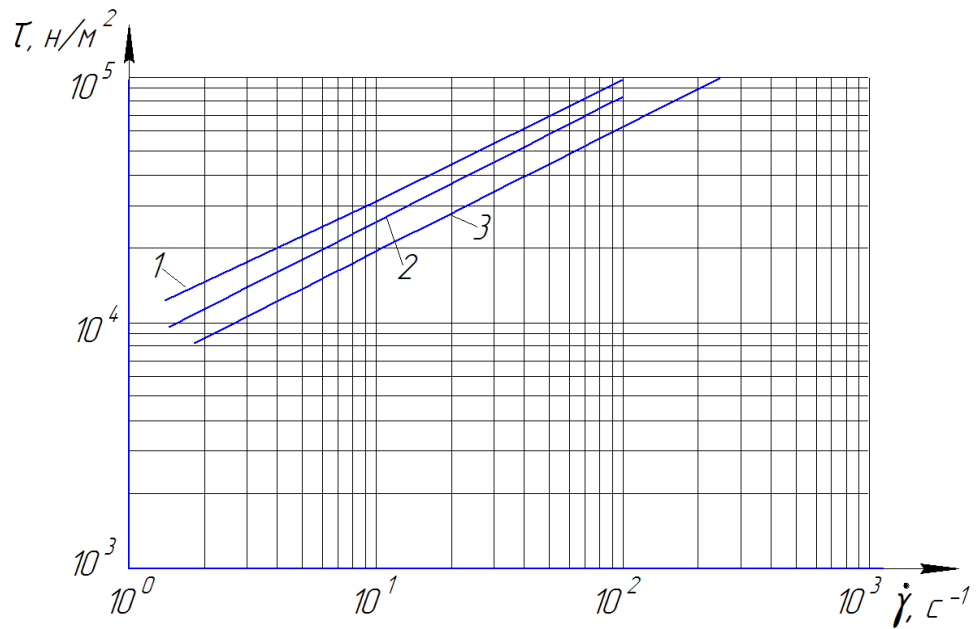
Поліетилен  
марки  
20806-024

- 1 – T=150°C
- 2 – T=170°C
- 3 – T=190°C
- 4 – T=210°C



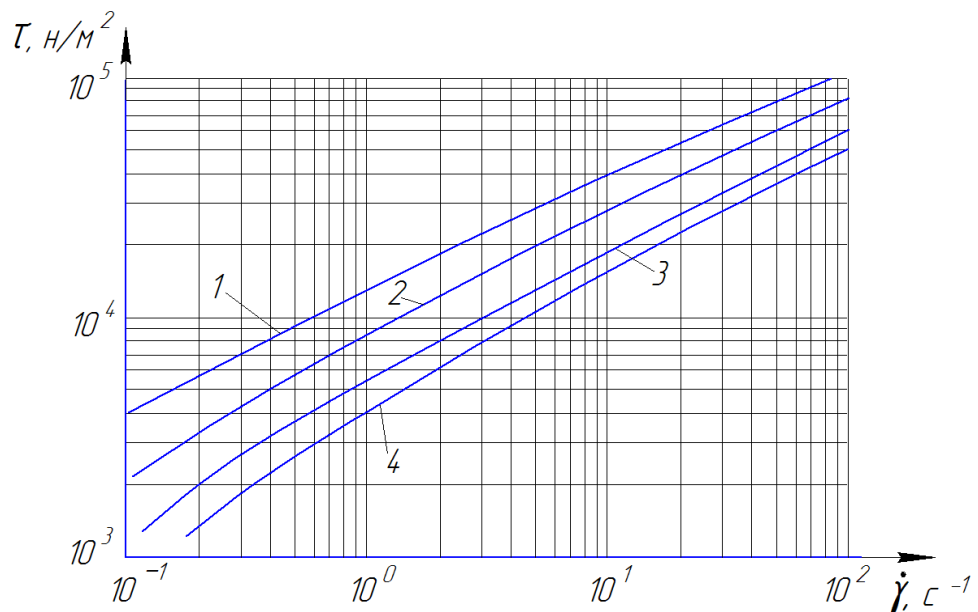
Поліетилен  
марки  
20606-012

- 1 – T=160°C
- 2 – T=180°C
- 3 – T=210°C



Поліетилен  
марки  
17702-010

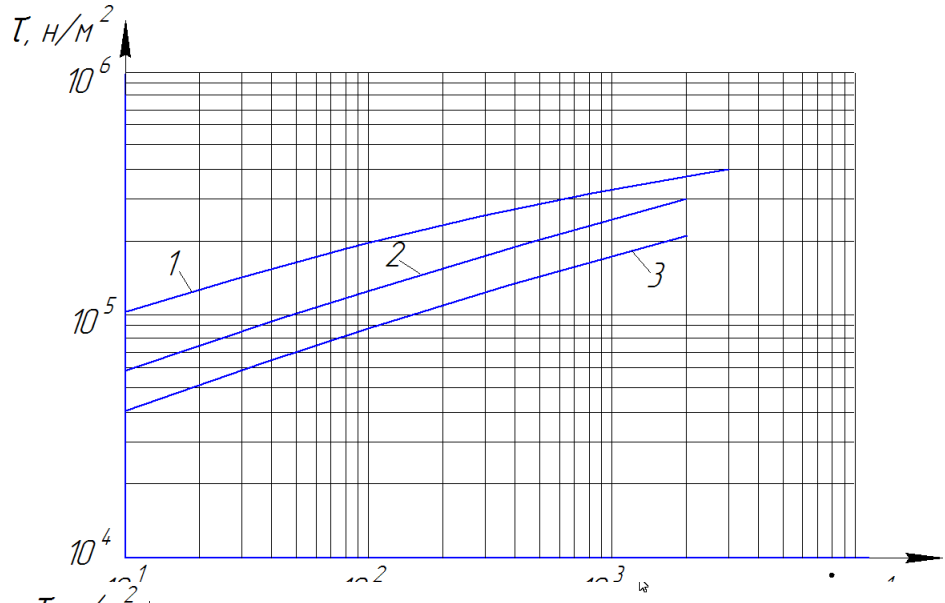
- 1 – T=150°C
- 2 – T=170°C
- 3 – T=190°C
- 4 – T=210°C



**Продовження додатку А**

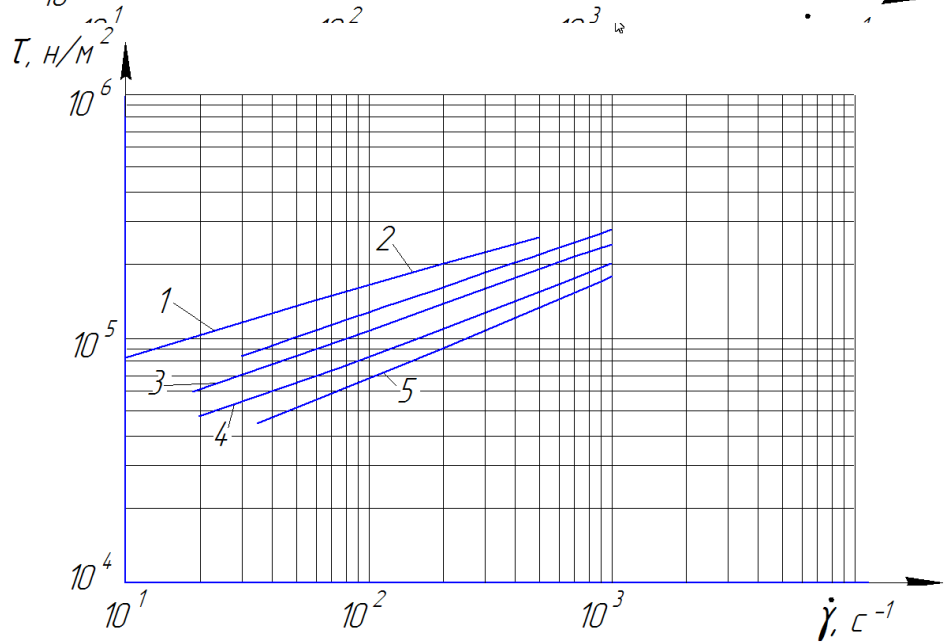
**Поліетилен  
марки  
15802-020**

- 1 – T=120°C
- 2 – T=150°C
- 3 – T=180°C



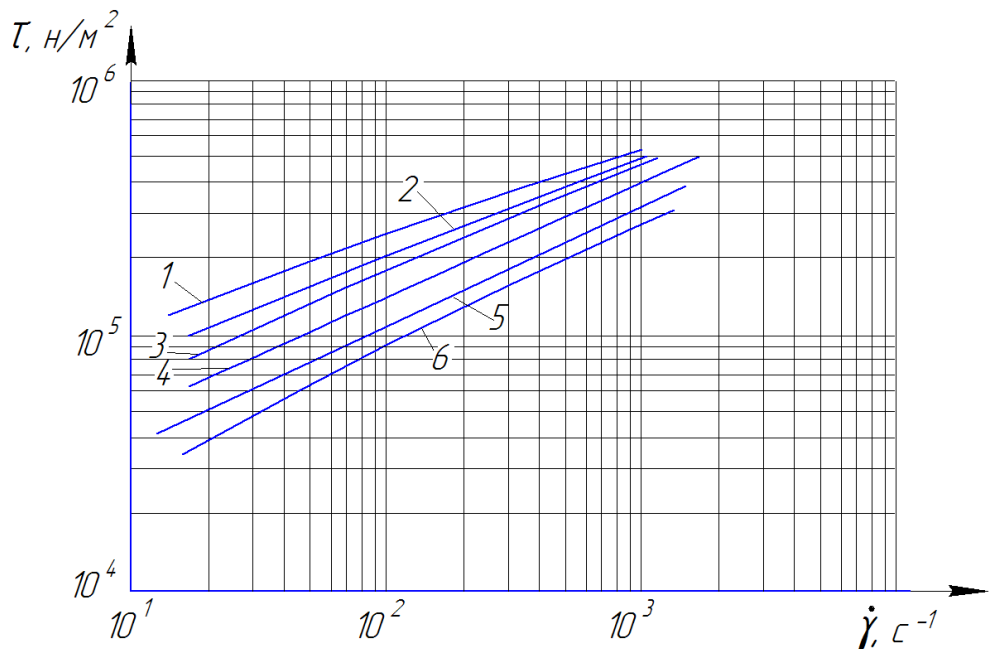
**Поліетилен  
марки  
15803-020**

- 1 – T=120°C
- 2 – T=140°C
- 3 – T=160°C
- 4 – T=180°C
- 5 – T=200°C



**Поліетилен  
марки  
10213-003**

- 1 – T=140°C
- 2 – T=160°C
- 3 – T=180°C
- 4 – T=200°C
- 5 – T=220°C
- 6 – T=240°C

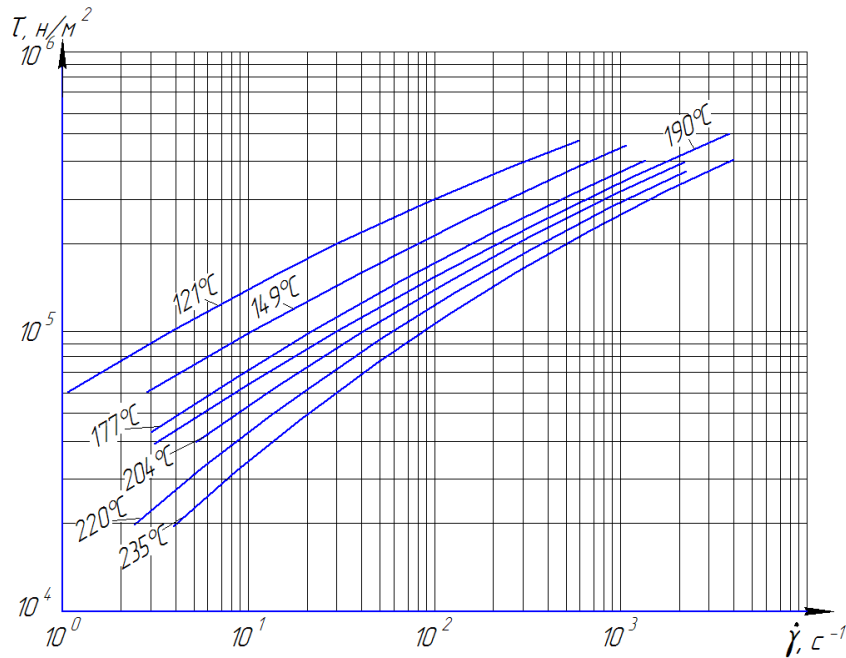


**Поліетилен  
марки  
20906-040**

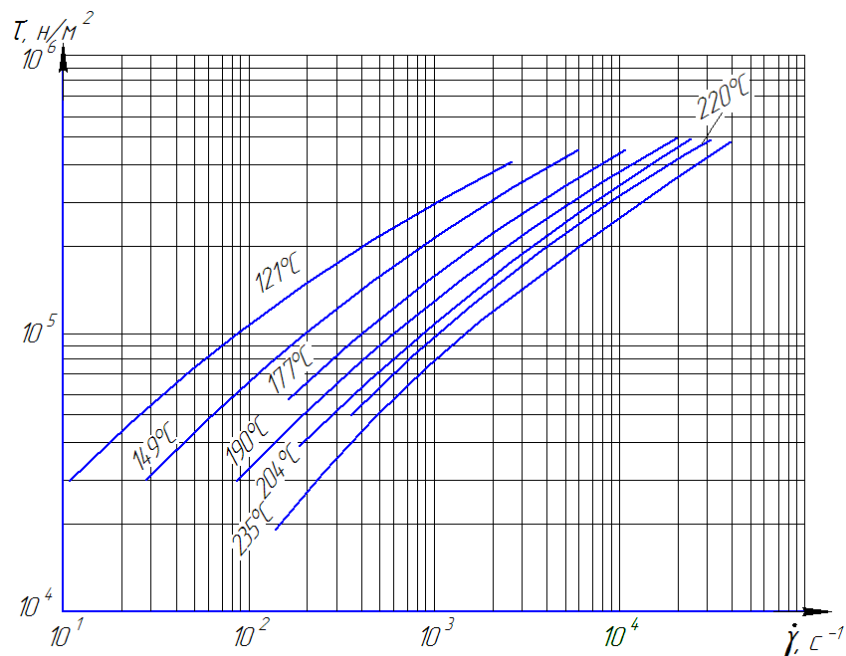
**1 – T=160°C  
2 – T=200°C  
3 – T=250°C**



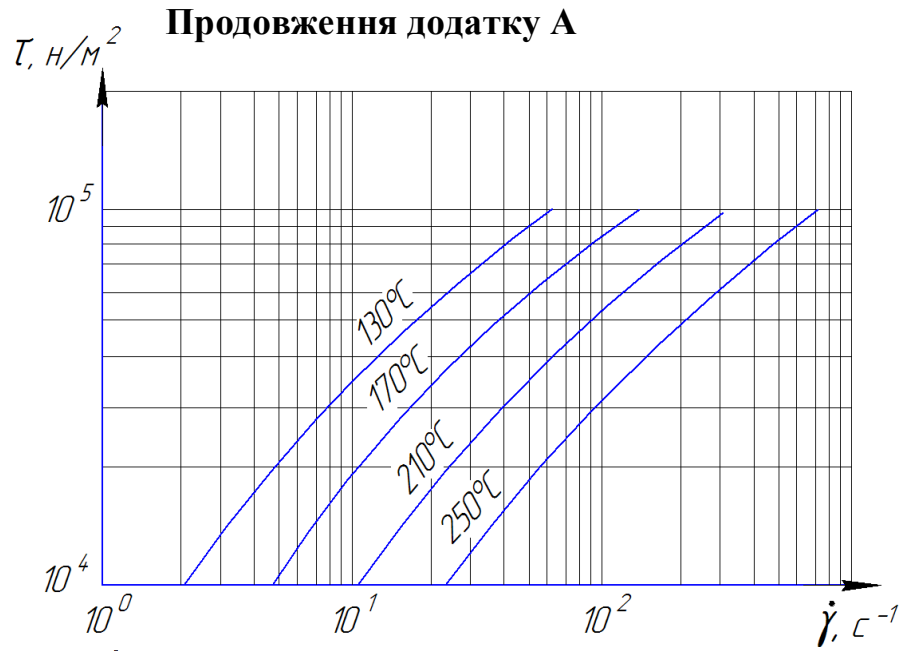
**Поліетилен  
марки  
204Е**



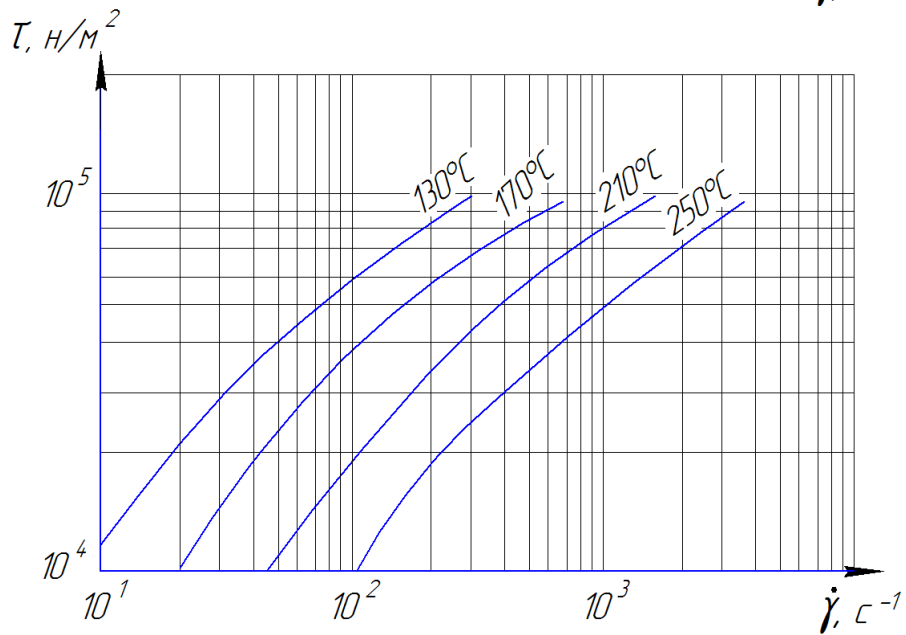
**Поліетилен  
марки  
1200Н**



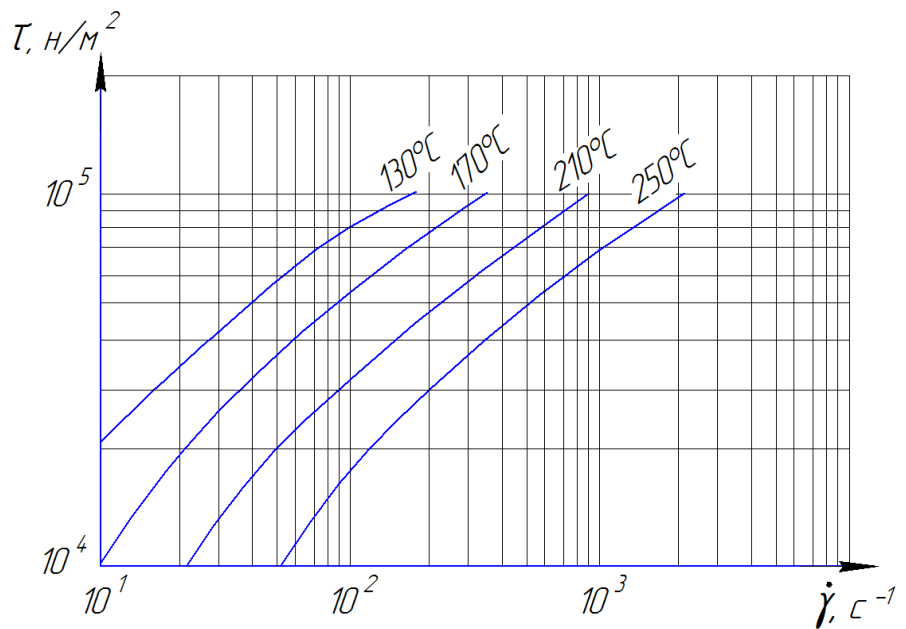
**Поліетилен  
марки  
Dow.M.1.2**



**Поліетилен  
марки  
Dow.M.1.20**



**Поліетилен  
марки  
Dow.M.1.7**



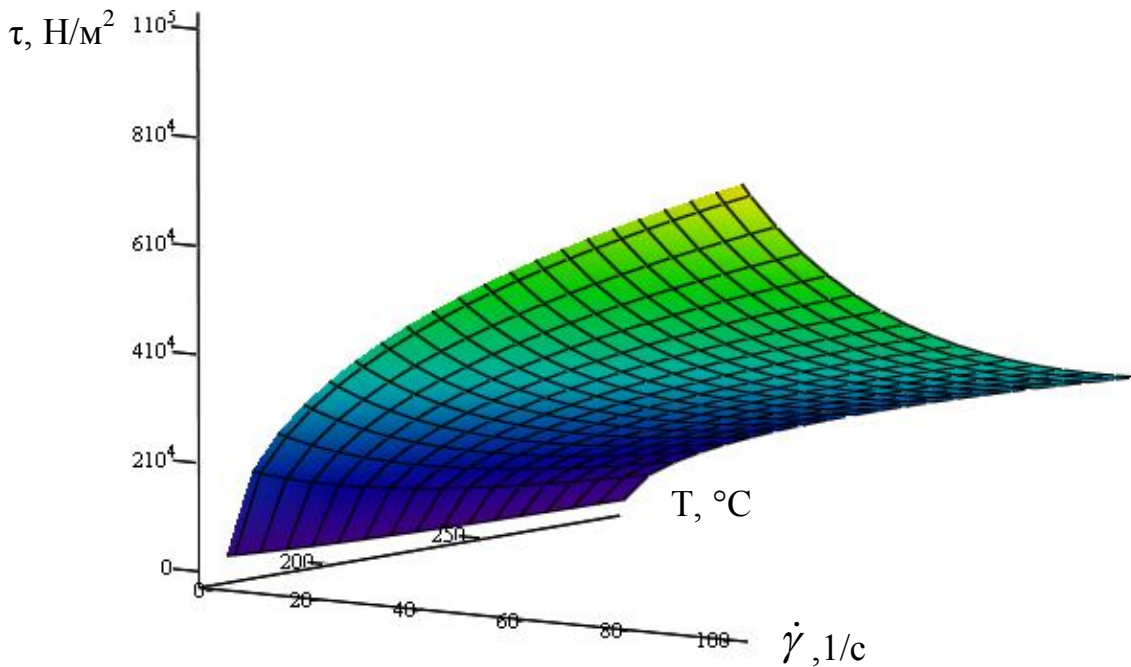
## Додаток Б

## Просторові графіки залежності напруження зсуву від швидкості зсуву та температури

## 1 Поліетилен 20806-024

$$c := 0.00000125 \quad d := 0.000175 \quad f := 0.4286 \quad E := 4992.24 \quad A := 25.092$$

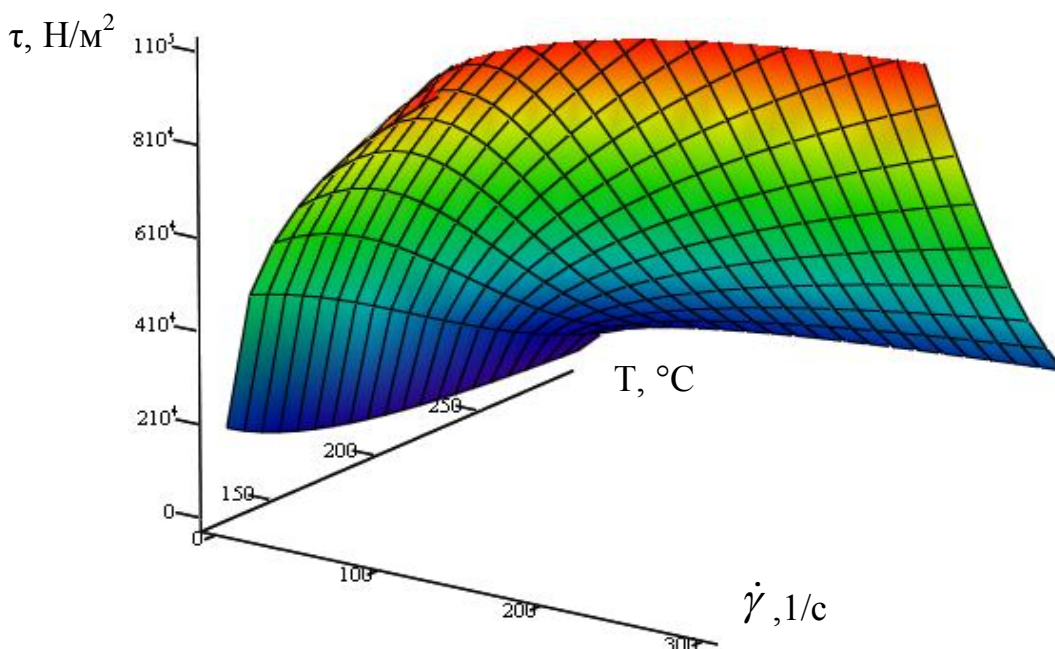
$$z(x, y) := A \cdot \exp\left[\frac{E}{1.98 \cdot (273 + y)}\right] \cdot x^{f+d \cdot y+c \cdot y \cdot y}$$



## 2 Поліетилен 20606-012

$$c := -0.000024967 \quad d := 0.010214 \quad f := -0.52684 \quad E := 4629.55 \quad A := 49.69$$

$$z(x, y) := A \cdot \exp\left[\frac{E}{1.98 \cdot (273 + y)}\right] \cdot x^{f+d \cdot y+c \cdot y \cdot y}$$



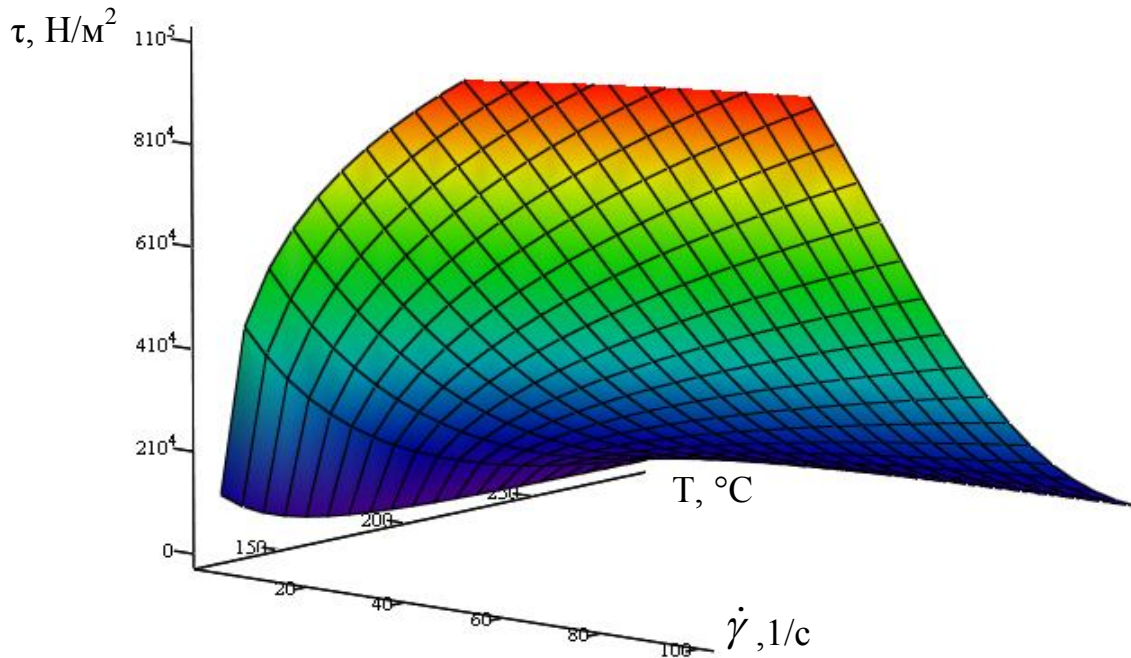


## Продовження додатку Б

## 3 Поліетилен 17702-010

$$c := -0.00002879 \quad d := 0.012053 \quad f := -0.68299 \quad E := 8208.77 \quad A := 0.6686$$

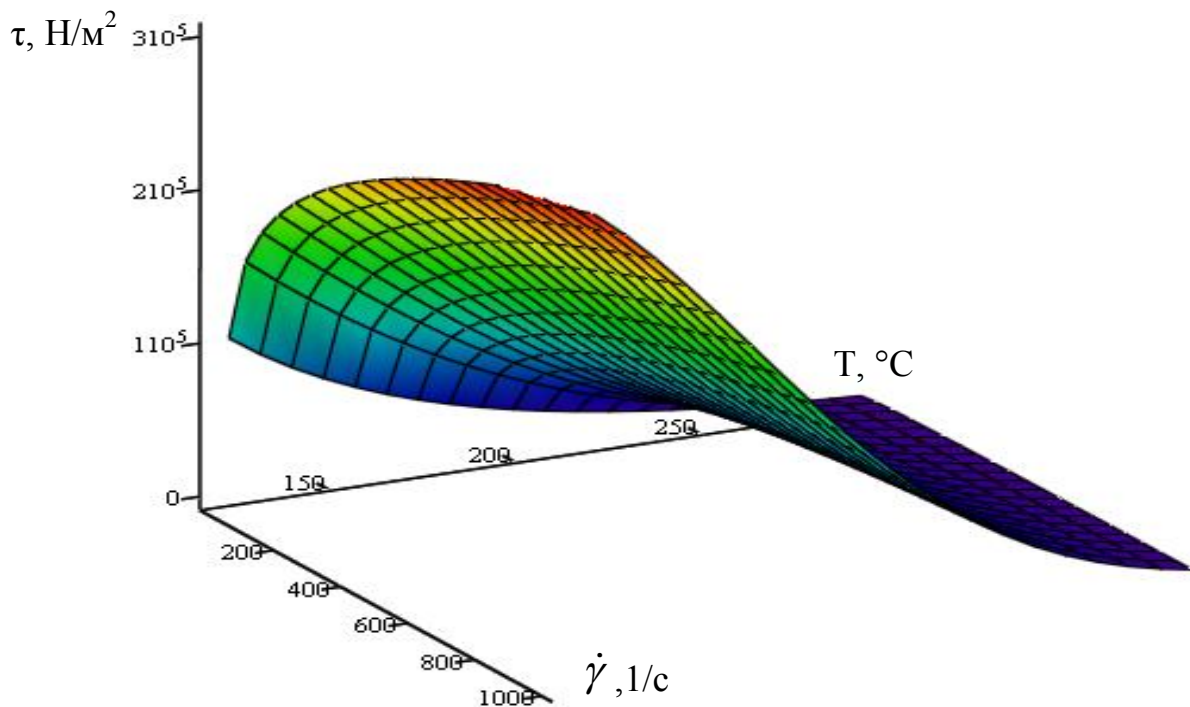
$$z(x, y) := A \cdot \exp\left[\frac{E}{1.98 \cdot (273 + y)}\right] \cdot x^{f+d \cdot y+c \cdot y \cdot y}$$



## 4 Поліетилен 15802-020

$$c := -0.000019 \quad d := 0.007083 \quad f := -0.3376 \quad E := 6791.64 \quad A := 9.813$$

$$z(x, y) := A \cdot \exp\left[\frac{E}{1.98 \cdot (273 + y)}\right] \cdot x^{f+d \cdot y+c \cdot y \cdot y}$$

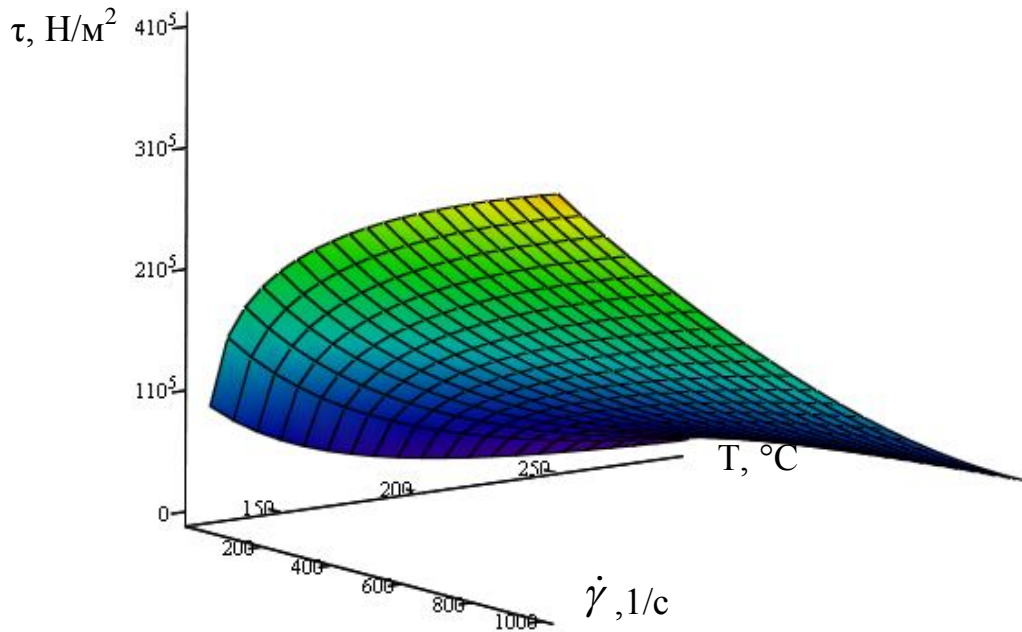


## Продовження додатку Б

## 5 Поліетилен 15802-020

$$c := -0.000011094 \quad d := 0.005824 \quad f := -0.2464 \quad E := 8936.84 \quad A := 0.46094$$

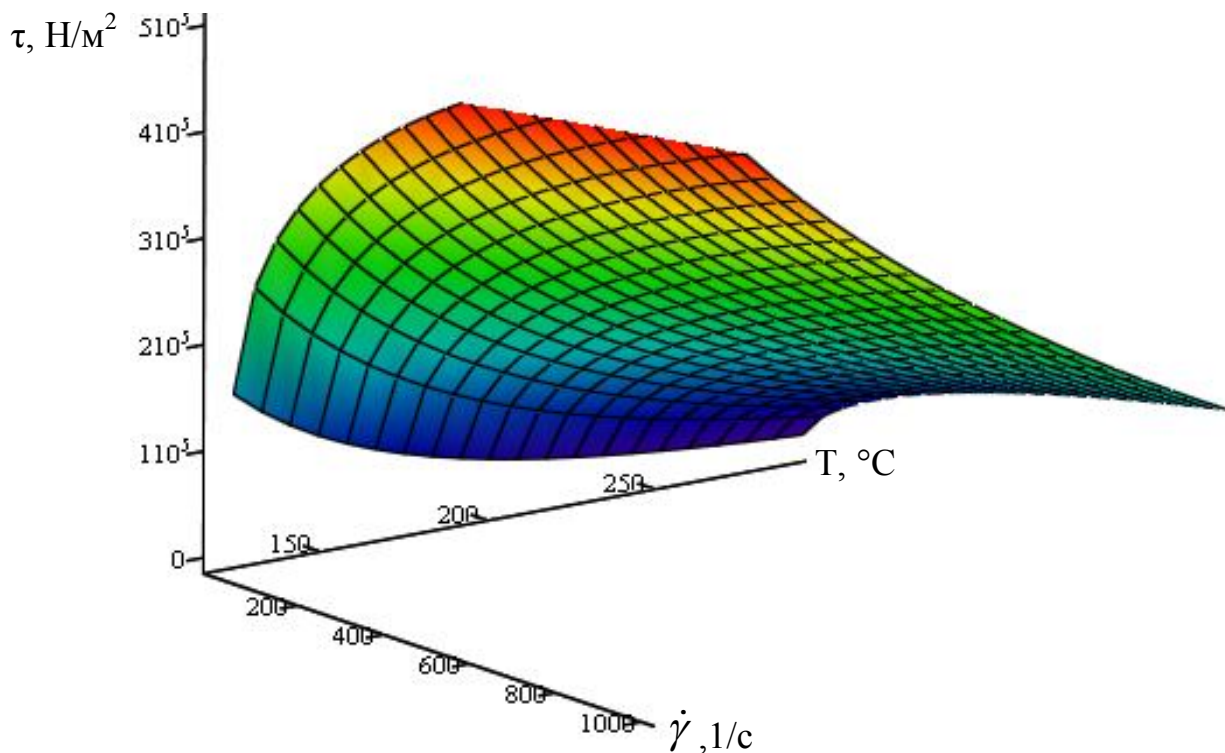
$$z(x, y) := A \cdot \exp\left[\frac{E}{1.98 \cdot (273 + y)}\right] \cdot x^{f+d \cdot y+c \cdot y \cdot y} \quad +$$



## 6 Поліетилен 10213-003

$$c := -0.0000056917 \quad d := 0.0036168 \quad f := -0.0575 \quad E := 7051.44 \quad A := 9.1018$$

$$z(x, y) := A \cdot \exp\left[\frac{E}{1.98 \cdot (273 + y)}\right] \cdot x^{f+d \cdot y+c \cdot y \cdot y} \quad +$$

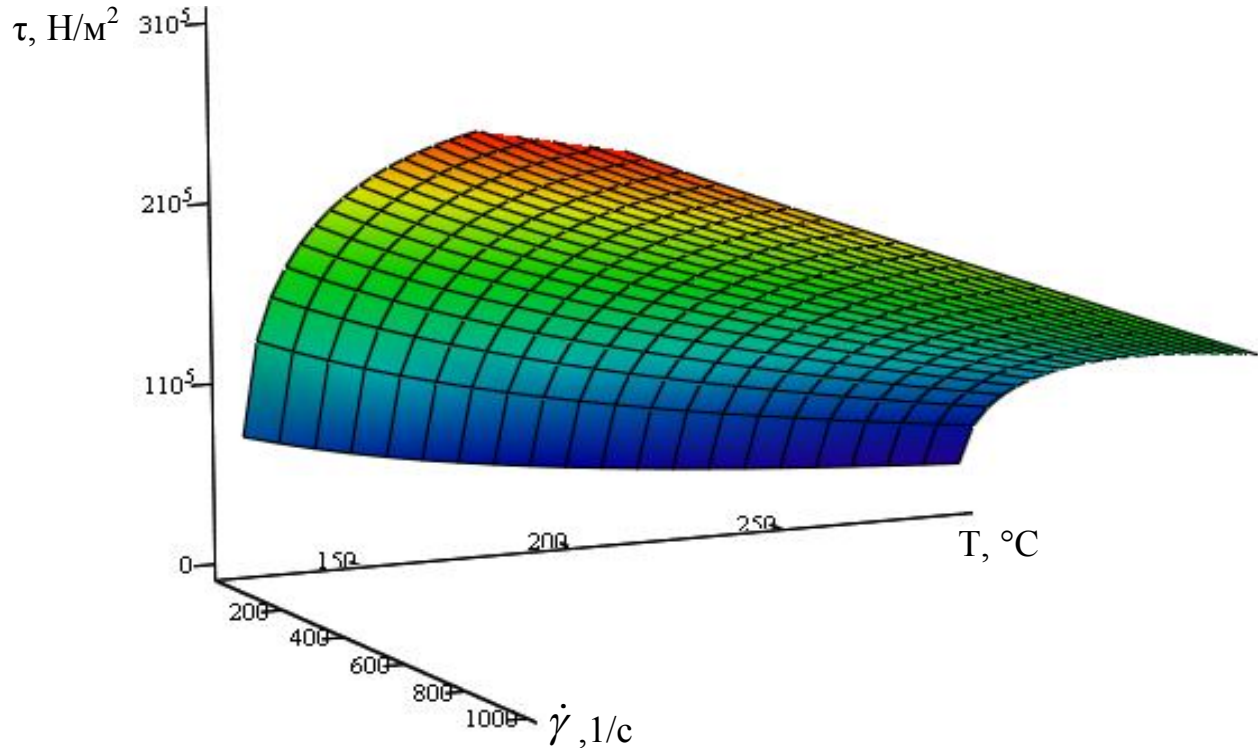


## Продовження додатку Б

## 7 Поліетилен 20906-040

$c := -0.00000355$      $d := 0.0020555$      $f := 0.1314$      $E := 3688.94$      $A := 295.30$

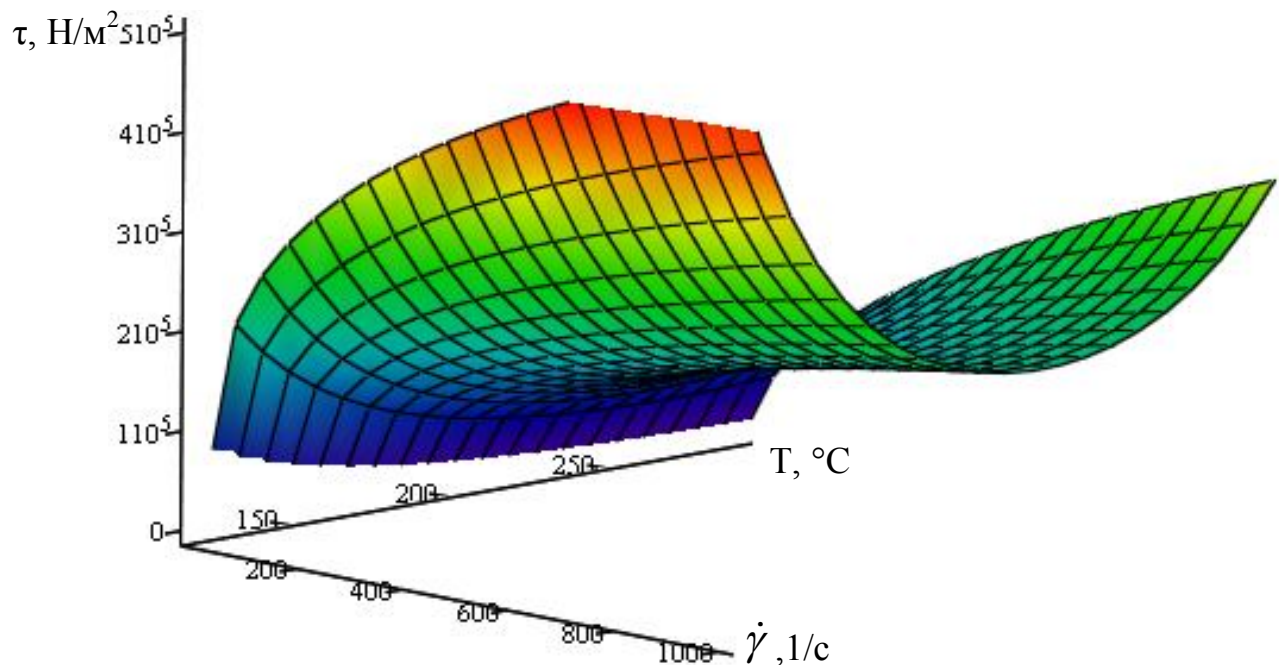
$$z(x, y) := A \cdot \exp\left[\frac{E}{1.98 \cdot (273 + y)}\right] \cdot x^{f+d \cdot y+c \cdot y \cdot y} \quad +$$



## 8 Поліетилен Dow. M.1.7.

$c := 0.000011131$      $d := -0.0030908$      $f := 0.54221$      $E := 5646.26$      $A := 40.61$

$$z(x, y) := A \cdot \exp\left[\frac{E}{1.98 \cdot (273 + y)}\right] \cdot x^{f+d \cdot y+c \cdot y \cdot y}$$

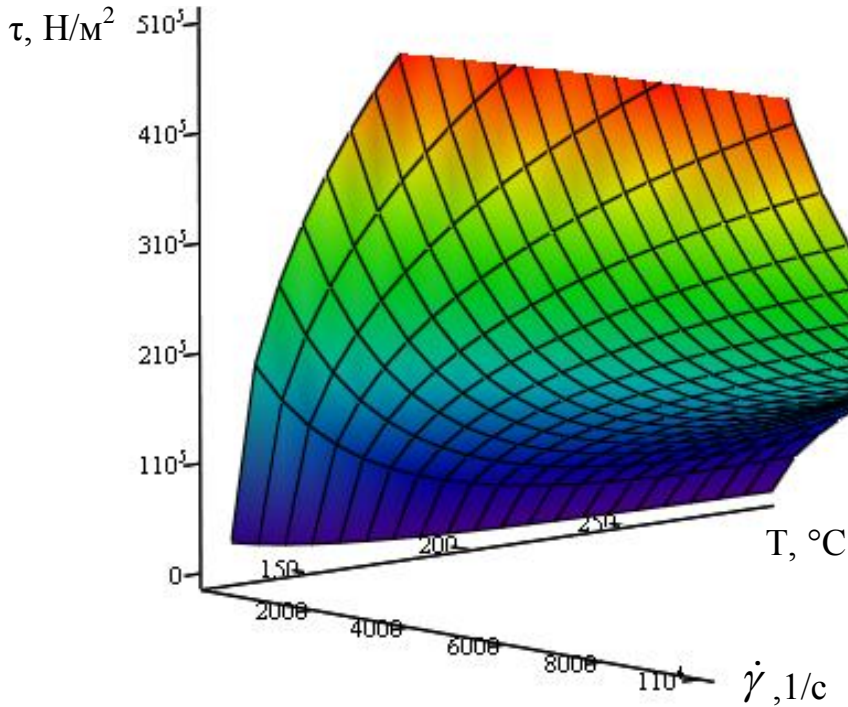


## Продовження додатку Б

## 9 Поліетилен 204Е

$$c := 0.000007701 \quad d := -0.002024 \quad f := 0.6228 \quad E := 7184.55 \quad A := 0.88702$$

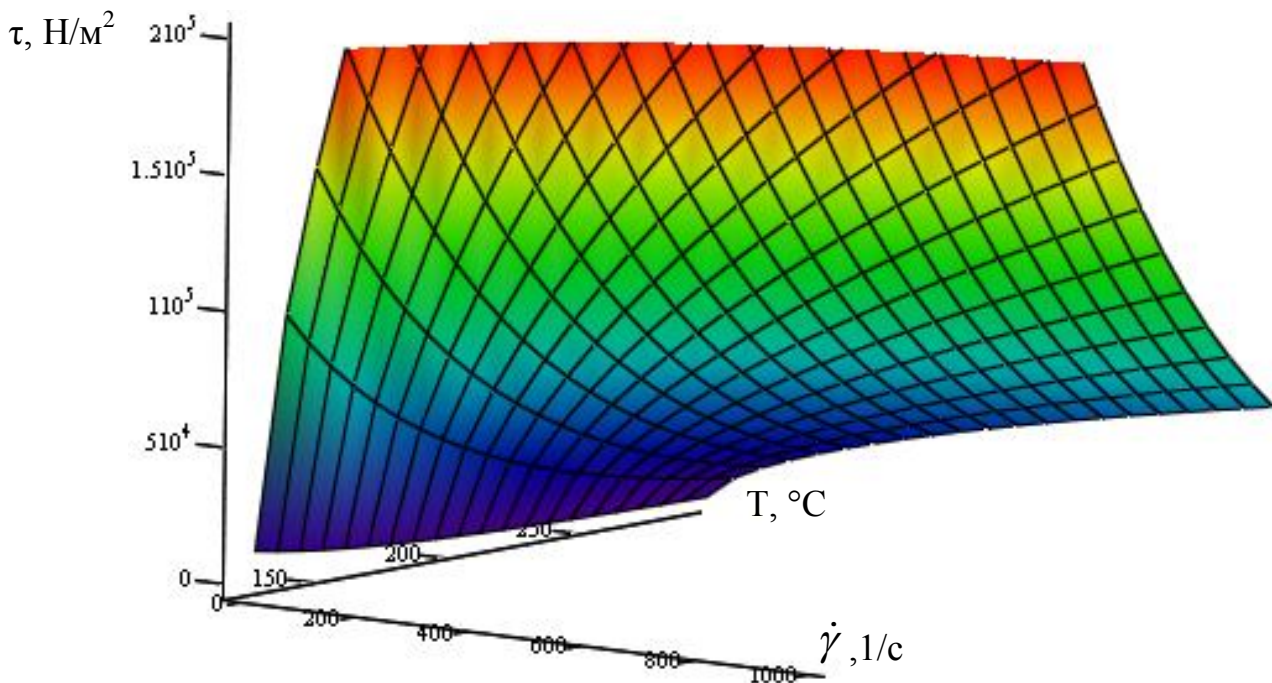
$$z(x, y) := A \cdot \exp\left[\frac{E}{1.98 \cdot (273 + y)}\right] \cdot x^{f+d \cdot y+c \cdot y \cdot y}$$



## 10 Поліетилен 1200Н

$$c := -0.0000065521 \quad d := 0.00246646 \quad f := 0.4520 \quad E := 5591.68 \quad A := 5.7196$$

$$z(x, y) := A \cdot \exp\left[\frac{E}{1.98 \cdot (273 + y)}\right] \cdot x^{f+d \cdot y+c \cdot y \cdot y}$$

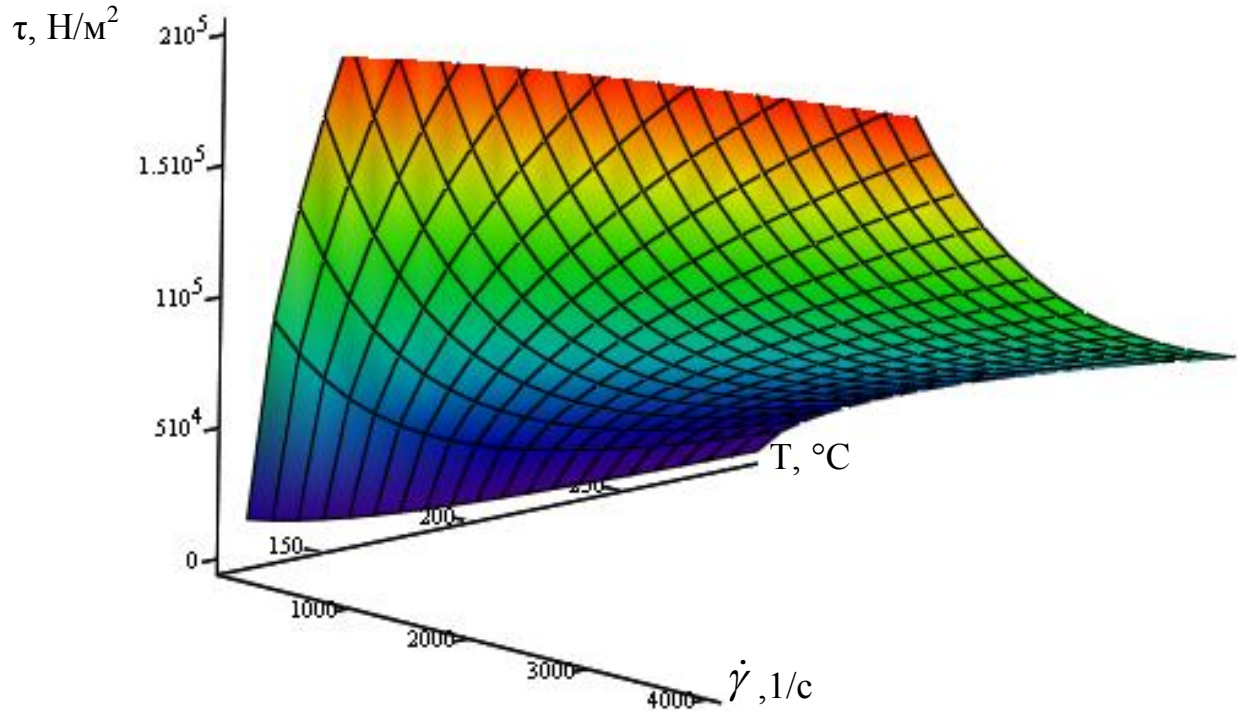


## Продовження додатку Б

## 11 Поліетилен Dow. M.1.2.

$$c := 0.0000016146 \quad d := -0.00016021 \quad f := 0.5898 \quad E := 6637.16 \quad A := 0.773$$

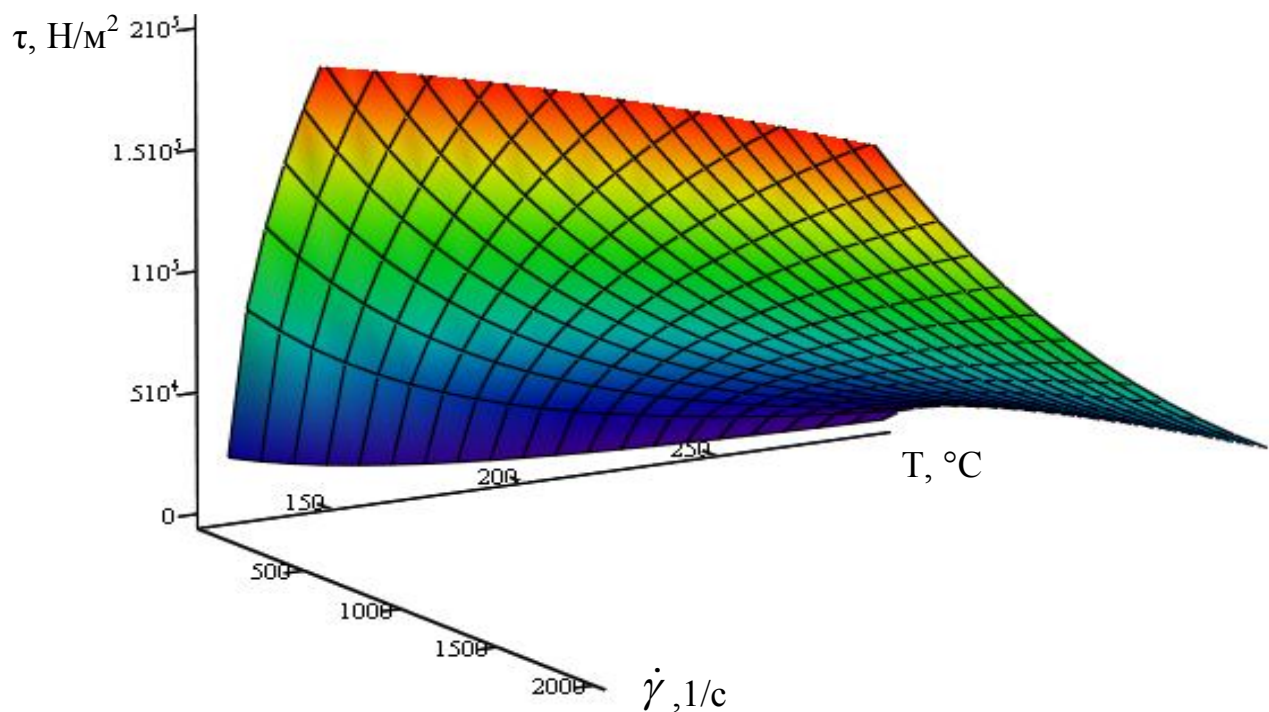
$$z(x, y) := A \cdot \exp\left[\frac{E}{1.98 \cdot (273 + y)}\right] \cdot x^{f+d \cdot y+c \cdot y \cdot y}$$



## 12 Поліетилен Dow. M.1.20.

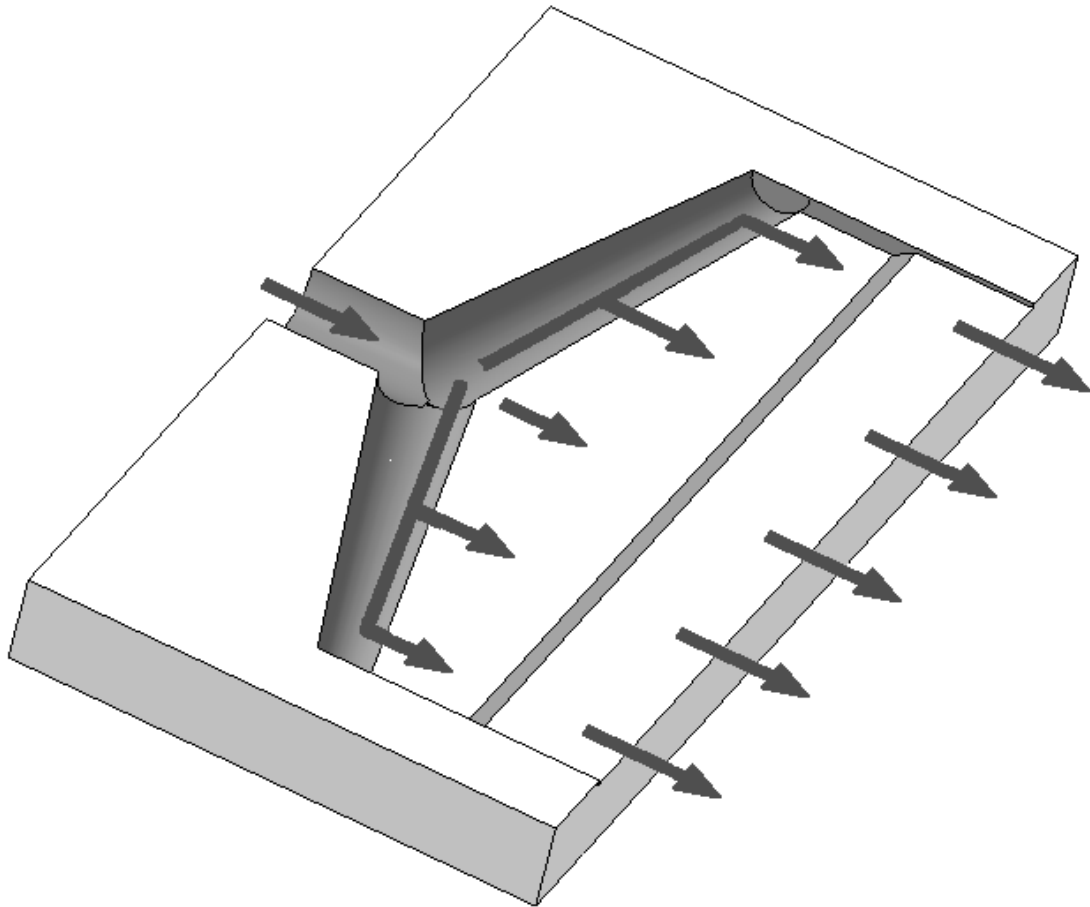
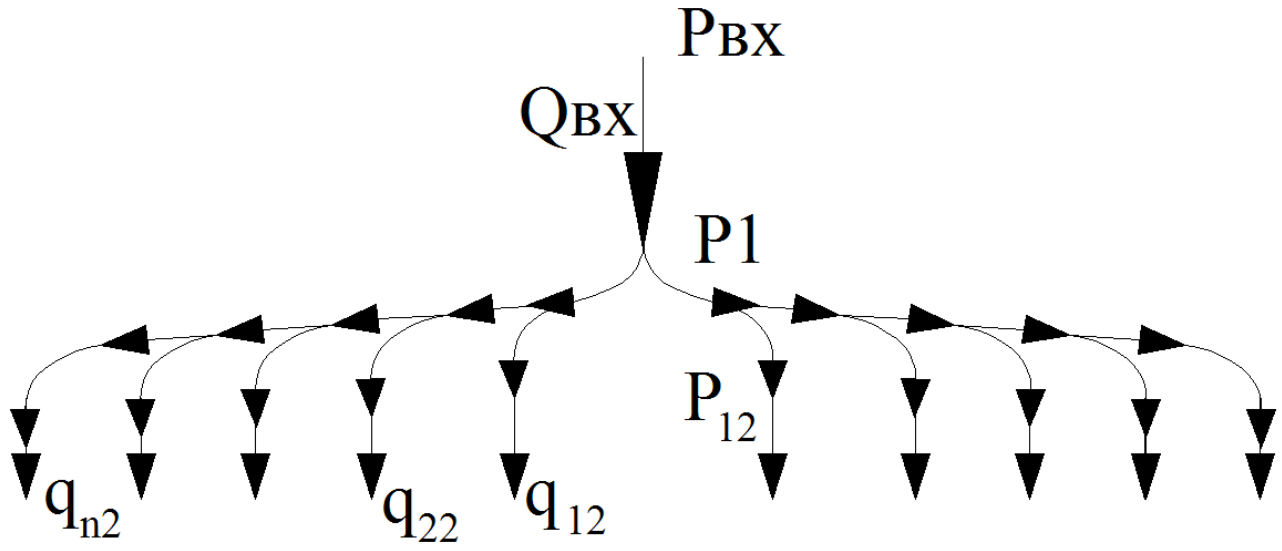
$$c := -0.000005833 \quad d := 0.0027783 \quad f := 0.2942 \quad E := 6650.63 \quad A := 1.332$$

$$z(x, y) := A \cdot \exp\left[\frac{E}{1.98 \cdot (273 + y)}\right] \cdot x^{f+d \cdot y+c \cdot y \cdot y}$$



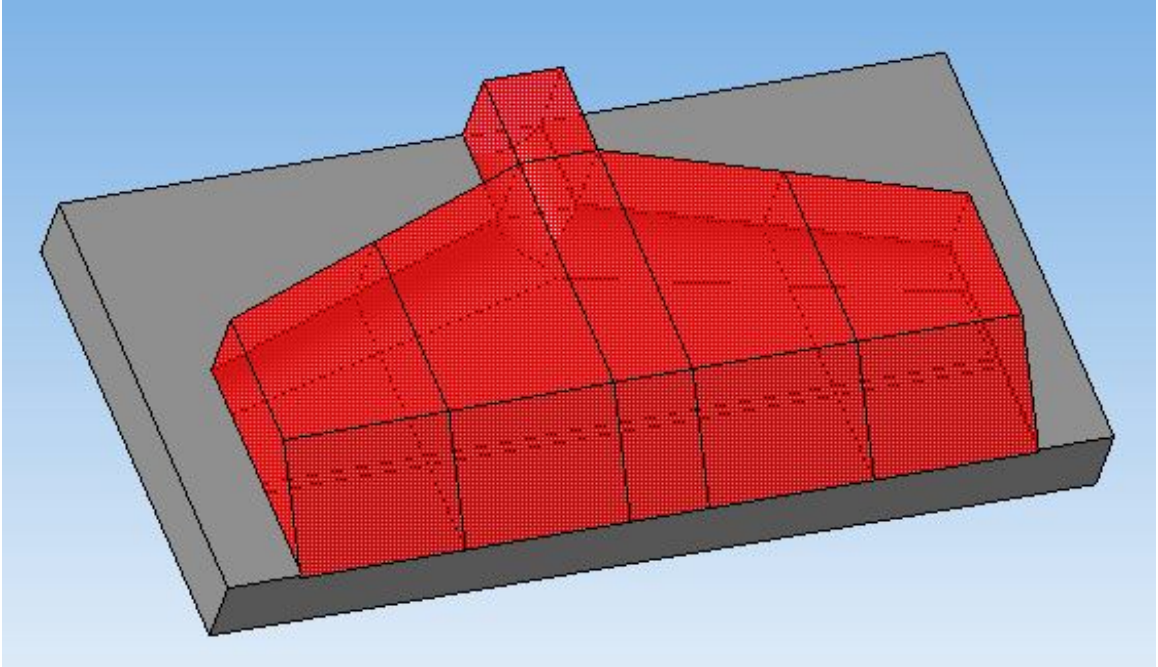
## Додаток В

Принципова схема руху полімеру в плоскощільній головці  
згідно розрахунковій схемі



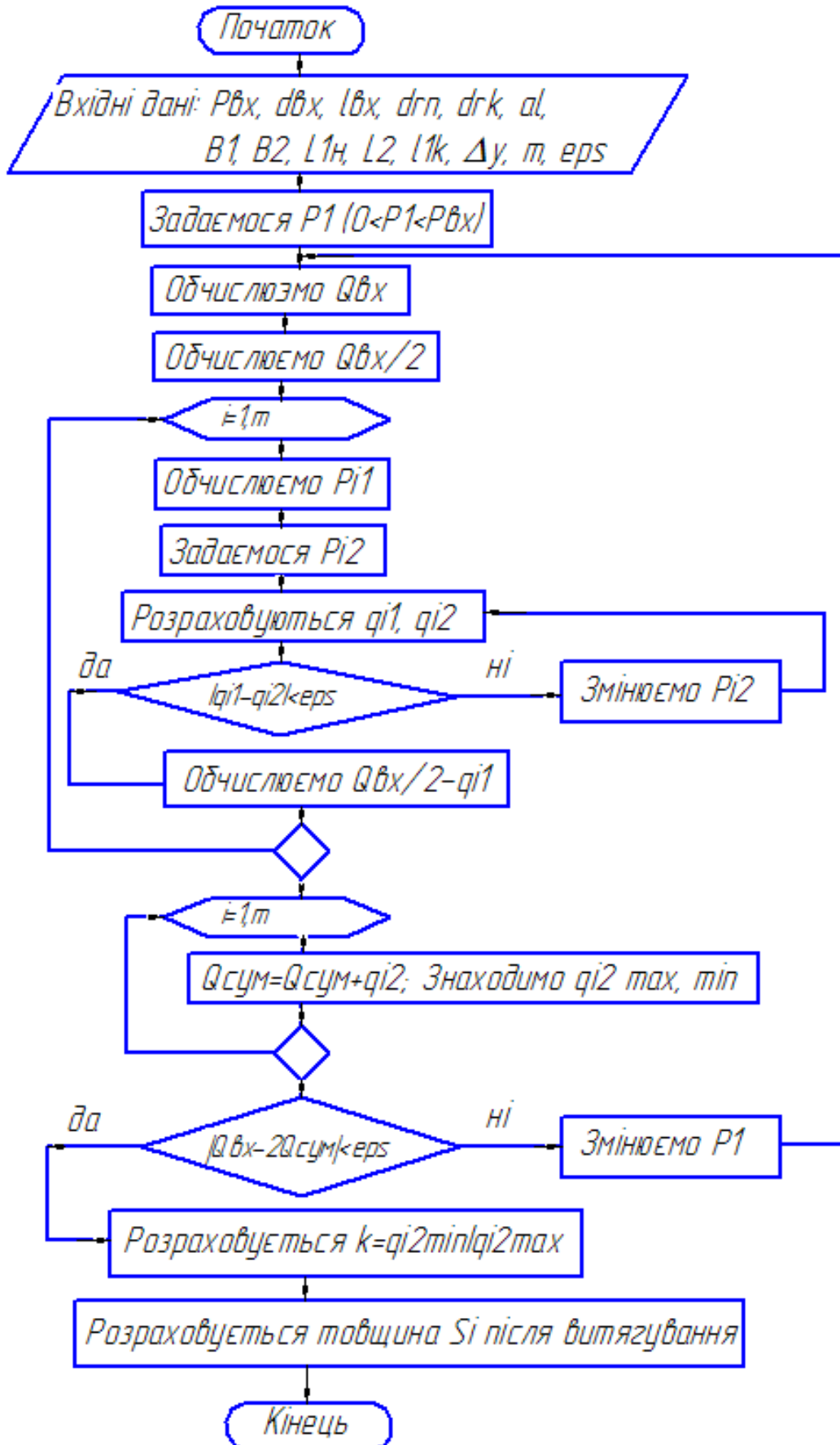
## Продовження додатку В

### Розподіл тиску в плоскощільній головці



## Додаток Д

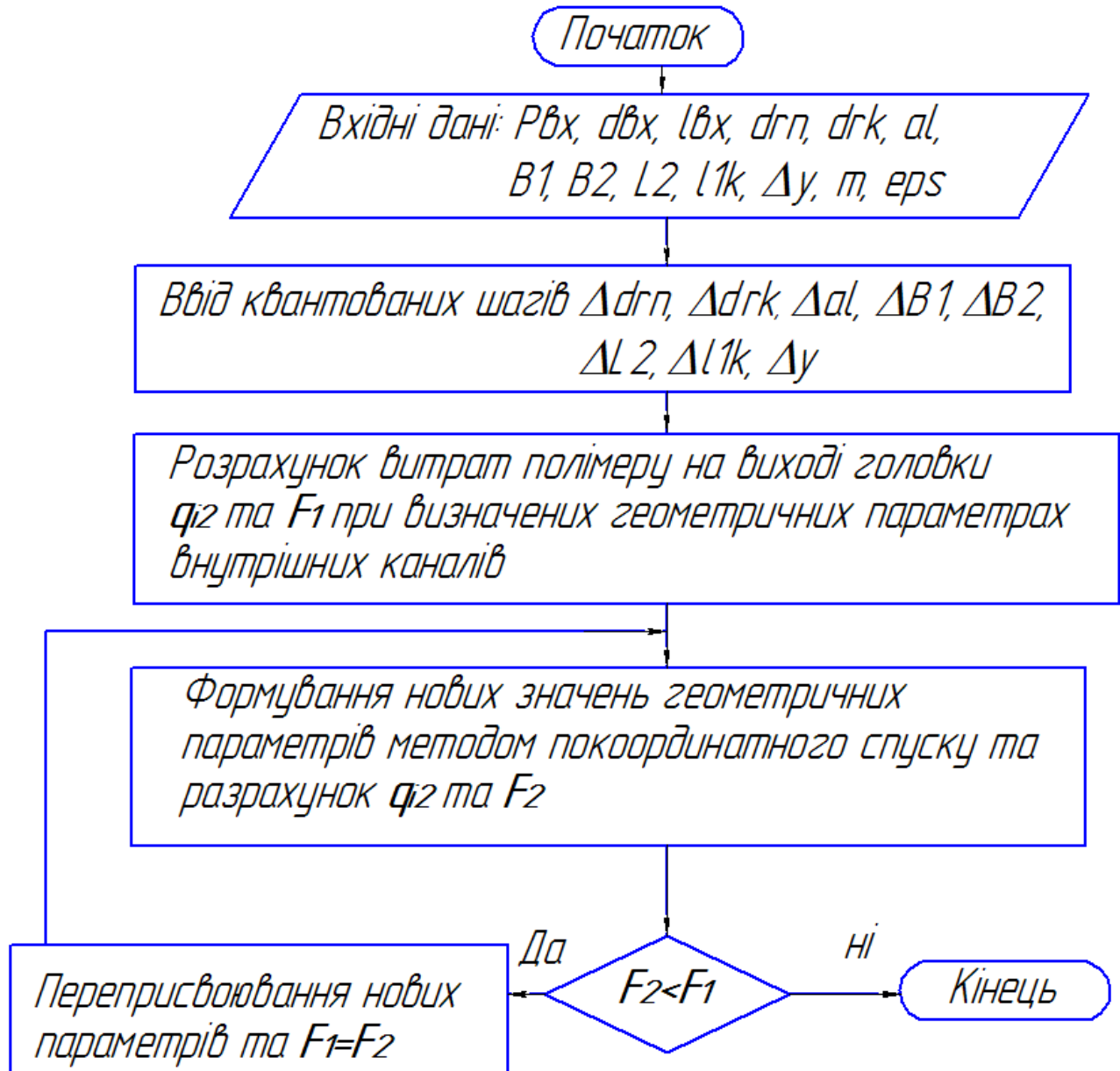
## Принципова блок-схема розрахунку товщини плівки при ламінуванні

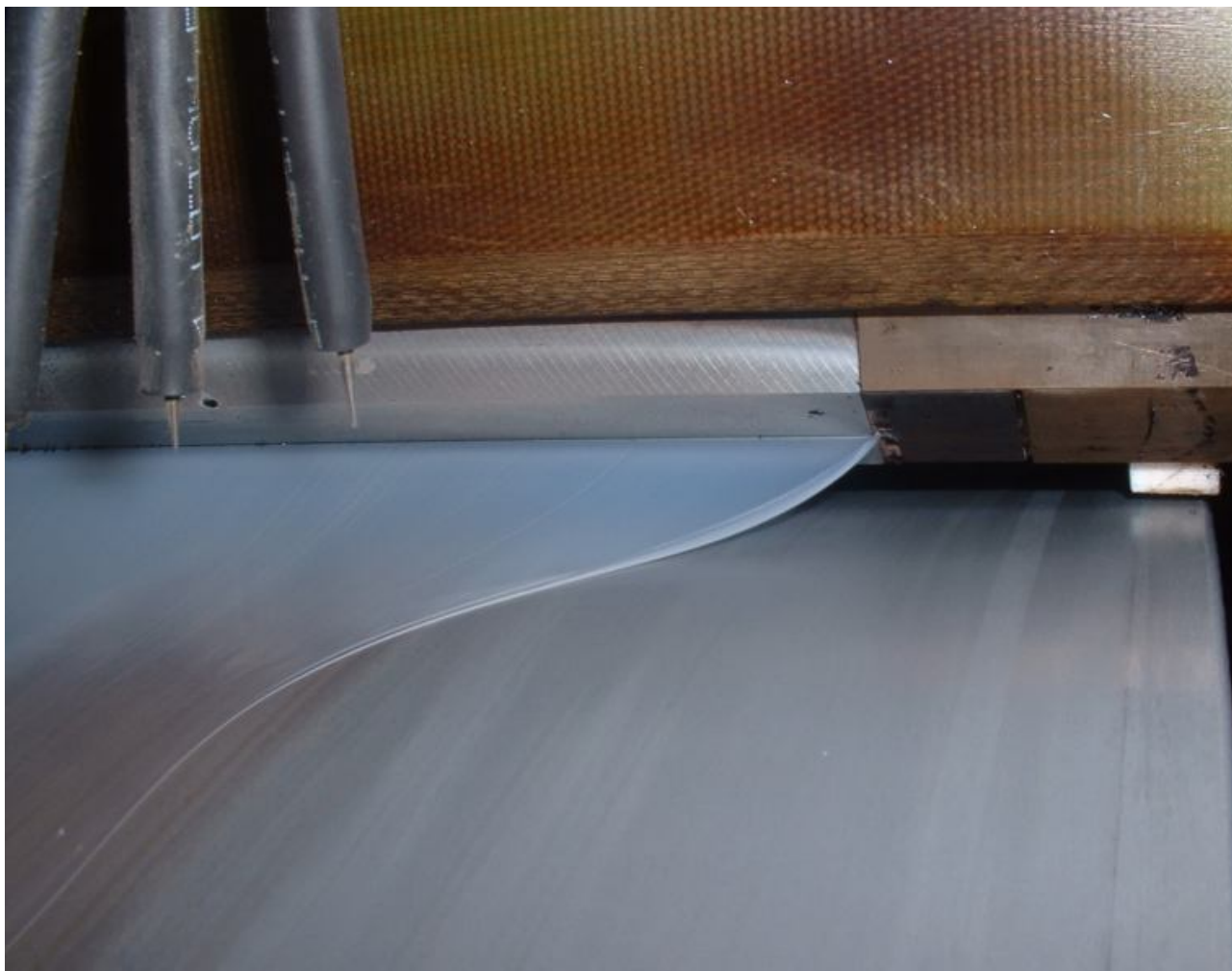




## Додаток Е

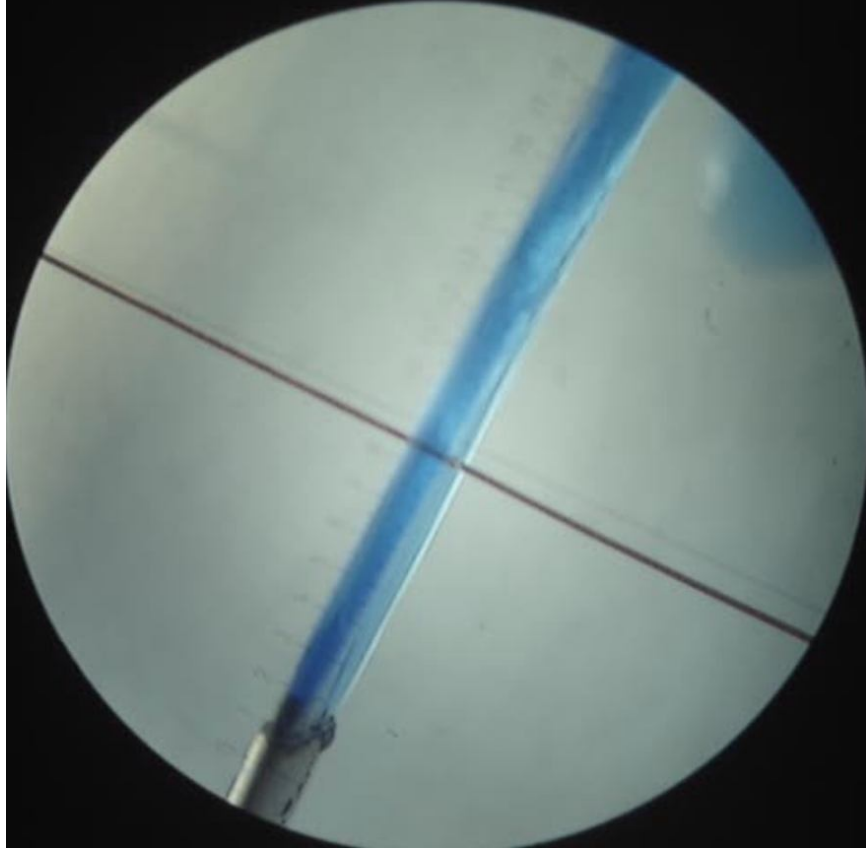
## Принципова блок-схема розрахунку оптимальних геометричних розмірів плоскощільної головки для ламінування матеріалу



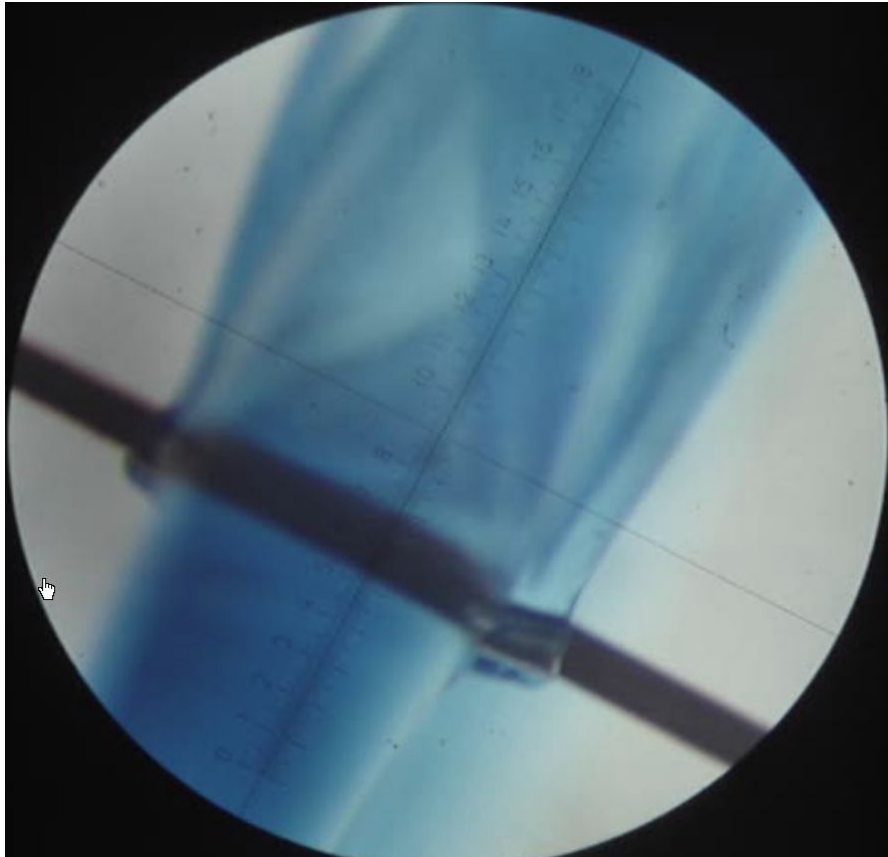
**Додаток Ж****Фотографії плівки при її поздовжньому витягуванні на виході із головки**

Додаток 3  
Фотографії течії рідини скрізь дріт

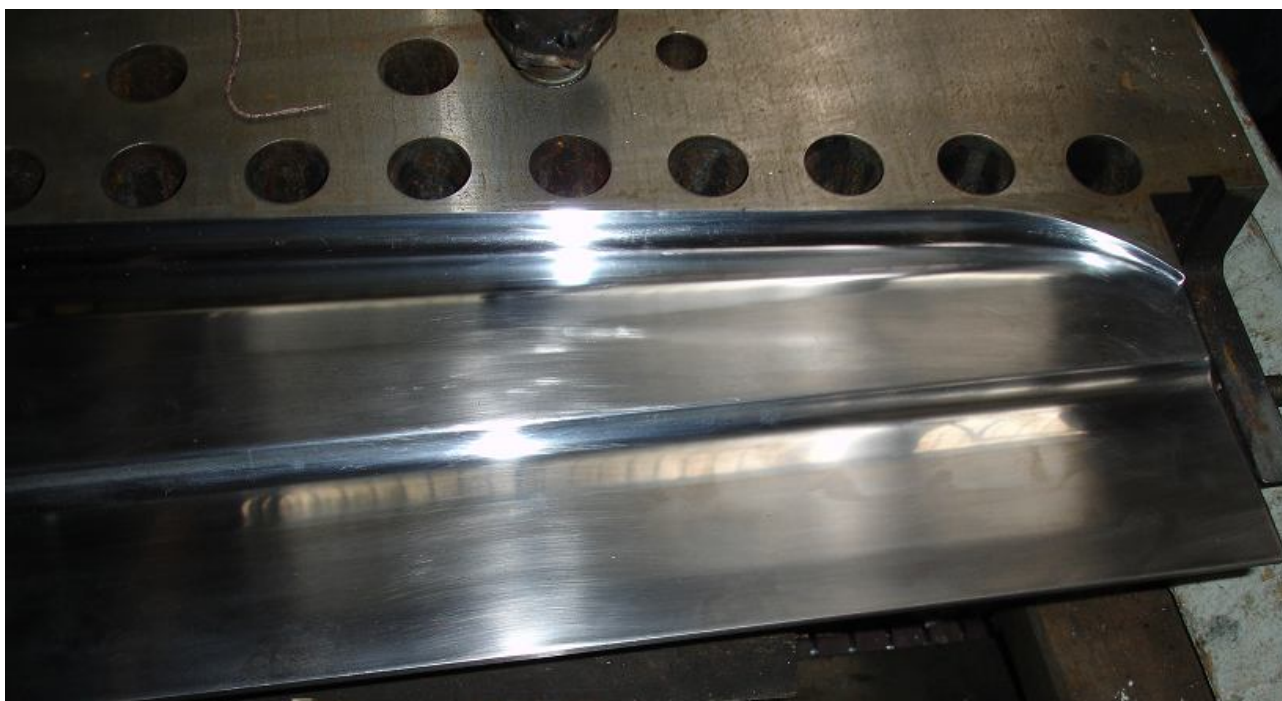
Діаметр 20 мкм



Діаметр 40 мкм



**Додаток И**  
**Фотографія формуючих каналів промислової головки**



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ким В. С. Теория и практика экструзии полимеров. -М.: Колос, 2005. - 568 с.
2. Ханлон Дж., Келси Р., Форсинио Х. Упаковка и тара: проектирование, технологии, применение. -Спб.: Профессия, 2004. - 632 с.
3. Микаэли В. Экструзионные головки для пластмасс и резины. Конструкции и технические расчеты. -Спб.: Профессия, 2007. - 472 с.
4. Абдель-Бари Е.М. Полимерные пленки. Пер. с англ. Г.Е.Зайкова. - Спб.: Профессия, 2005. - 352 с.
5. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. - Спб.: Профессия, 2007. - 560 с.
6. Мантиа Л.Ф. Вторичная переработка пластмасс. Пер. с англ. Г.Е. Зайкова. - Спб.: Профессия. - 2006. - 400 с.
7. Брукс Д., Джайлз Дж. Производство упаковки из ПЭТ. Пер. с англ. Под ред. О.Ю.Сабсая. -Спб.: Профессия, 2006. - 368 с.
8. Анасова Т.А. Разработка и совершенствование конструкций многослойных экструзионных головок: Автореф. дисс. канд. техн. наук. 05.04.09. /Уфимский гос. нац. техн. ун-т. -Уфа: 1997. - 28 с.
9. Ануфриев В. А. Исследование соэкструзии расплавов в процессах производства многослойных пленок из термопластов: Автореф. дисс. канд. техн. наук. - К.: 1978. - 16 с.
10. Власов С.В., Кандырин Л.Б., Кулезнев В.Н. Основы технологии переработки пластмасс: Учебник для вузов. - М.: Мир, 2006. - 600 с.
11. Головкин Г.С. Проектирование технологических процессов изготовления изделий из полимерных материалов: Учебное пособие для вузов. -М.: Химия, 2007. - 399 с.
12. Сокольський О. Л. Розроблення плоскощільних головок для екструзійного формування листових та плівкових виробів із полімерних композицій: Автореф. дис. канд. техн. наук. 05.05.13 /Нац. техн. ун-т України "КПІ". -К.: 2005. - 173 с.
13. Белозеров Б.П., Гузеев В.В., Перепелкин К.Е. Свойства, технология переработки и применение пластических масс и композиционных материалов. – Томск: НТЛ, 2004. -224 с.
14. Рябинин Д.Д. Исследование течения расплавов полимеров в формующих каналах плоскощелевых экструзионных головок: Автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.04.09/ Днеп-к химико-технолог. ин-т. – Днепропетровск: 1974. – 27 с.
15. Чанг Дей Хан. Реология в процессах переработки полимеров. Пер. с англ. Под ред. Г.В.Виноградова, М.Л.Фридмана - М.: Химия, 1979. -368 с.
16. Раувендааль К. Экструзия полимеров. – Спб.: Профессия, 2006. - 768 с.
17. Торнер Р.В. Переработка полимеров. -М.: Химия, 1976. - 404 с.
18. Айзинсон И.Л., Восторгов Б.Е., Кацевман М.Л. Основные направления развития композиционных термопластичных материалов. - М.: Химия, 1988. - 76 с.

19. Гуль В.Е. Полимерные пленочные материалы. -М.: Знание, 1972. - 32 с.
20. Радченко Л. Б. Переробка термопластів методом екструзії. -К.: ІЗМН, 1999. - 220 с.
21. Пахаренко В.А., Яковлева Р.А., Пахаренко А.В. Переработка полимерных композиционных материалов. –К.: Воля, 2006, - 552 с.
22. Лифшиц И.Д., Аляутдинов А.О., Либерова Р.А., Шувалова Л.С. Производство пленочных материалов в легкой промышленности. -М.: Легкая индустрия, 1970. - 186 с.
23. Гуль В.Е., Акутин М.С. Основы переработки пластмасс. - М.: Химия, 1985. - 400 с.
24. Гуль В.Е., Беляцкая О.Н. Пленочные полимерные материалы для упаковки пищевых продуктов. – М.: Химия, 1968. – 280 с.
25. Каменев Е.И., Мясников Г.Ф., Платонов М.П. Применение пластических масс. -Л.: Химия, 1985. -234 с.
26. Пупышев И.Д., Полевой А.Б., Тищенко А.И. Контроль толщины фторопластового покрытия полиамидных пленок. //Химические волокна. -2006, №6. - с.61-63
27. ТУ У 21.1 -31718340 – 003:2005. Папір з поліетиленовим покриттям. Технічні умови. Приватне підприємство «Ламінат». УКНД 85.060. ДКПП21.12.56. – Корюківка: 2005. - 16 с.
28. Мозырский В.И., Петренко С.Д., Скачков В.В., Можаровская З.М. Расчет плоскощелевых головок при экструзии нетермостабильных полимерных материалов. //Химическая технология. - 1990. -№5. -с.61-66
29. Шерышев М.А. Формование полимерных листов и пленок. -Л.: Химия, 1989. -120 с.
30. Жданов Ю. А., Рябинин Д.Д., Допира П. К. К вопросу универсальности каналов плоскощелевых головок равного сопротивления. //Химическое машиностроение, вып. 18. - К.: Техніка, 1973, с. 7- 12.
31. Захаров В.П., Калиновская Г.Д., Коростелев В.И., Любешкина Е.Г., Минскер К.С. и др. Вторичное использование полимерных материалов. Под ред. Е.Г. Любешкиной. -М.: Химия, 1985, - 192 с.
32. Заявка №0 254790 (ЕПР). Экструзионная головка для экструзии пленки. - Публикация 88.02.24. №5.
33. Кривошей В.Н., Соломенко М.Г., Шредер В.Л. Справочник по полимерной упаковке. -К.: Техніка, 1982. - 232 с.
34. Пат. № 4708629 США. В29С47/16 /Г – образна екструзионна головка. Kasamatsu, Tadashi (6-10 Shiratori 2-chome, Katsushika-ku, Tokyo, JP) - Публикация 87.11.24. Т.1084 №4.
35. Филатов В.И., Корсаков В.Д. Технологическая подготовка процессов формования изделий из пластмасс. -Л.: Политехника., 1991. - 210 с.
36. Рябинин Д. Д., Самсоненко Ю. Н., Шевчишен С. Ю. К расчету плоскощелевых головок для производства полиэтилентерефталатных пленок. //Химическое машиностроение, вып. 29. - К.: Техніка, 1979, с. 13-16.
37. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. Пер. англ. Под ред. Р.В.Торнера. - М.: Химия, 1984. - 632 с.

38. Торнер Р.В. Основные процессы переработки полимеров. Теория и методы расчета. -М.: Химия, 1972. - 453 с.
39. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров. Механика процессов. -М.: Химия, 1977. - 329 с.
40. Торнер Р.В. Теория и методы расчета. -М.: Химия, 1972. - 453 с.
41. Яхно О.М., Дубовицкий В.Ф. Основы реологии полимеров. -К.: Вища школа, 1976. - 188 с.
42. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Пер. с англ. Под ред. В.П.Шидловского. -М.: Мир, 1991. т.1 – 502 с., т.2 -552 с.
43. Дубинец В.Г., Хільчевський В.В., Савченко О.В. Основи методу скінченних елементів. - Чернігів: 2007. – 348 с.
44. Госмен А.Д., Пан В.М., Ранчел А.К., Сполдинг Д.Б., Вольштей М. Численные методы исследования течений вязкой жидкости: Пер. с англ. - М.: Мир, 1982. - 374 с.
45. Двойнос Я. Г. Процессы переработки термопластов экструзионным методом: Дисс. канд. техн. наук: 05.05.13. - К.: 1999. - 198 с.
46. Скачков В. В., Торнер Р. В., Стунгур Ю. В., Реутов С. В. Моделирование и оптимизация экструзии полимеров. -Л.: Химия, 1984. - 152 с.
47. Басов Н. И., Казанков Ю. В., Любартович В.А. Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов. - М.: Химия, 1986. - 488 с.
48. Рябинин Д. Д., Самсоненко Ю. Н., Шевчишен С. Ю. К расчету профиля подводящего канала плоскощелевых головок. //Химическое машиностроение, вып. 25. - К.: Техніка, 1977, с. 21-25.
49. Щелевая головка экструдера. А.С. №327071 СССР, /Ю.А.Жданов, Ю.Ф.Витвицкий, Д.Д.Рябинин, Ф.С.Бех. (СССР). – №1464518/23-5; Заявлено 24.7.70 Опубл. 26.1.72. Бюл. №5.
50. Каплун Я.Б., Ким В.С. Формующее оборудование экструдеров. – М.: Машиностроение, 1969. – 159с.
51. Ким В.С., Скачков В.В. Оборудование подготовительного производства заводов пластмасс. - М.: Машиностроение, 1977. - 183 с.
52. Бакалов В.Г., Чередніченко П.І., Бакалов О.В., Калінько І.В., Скидан Л.В. Розрахунок та проектування плоскощільних фільтрів. Мет. вказ. до курсового проект. з дисц. «Основи розрахунку та конструювання типових машин». Чернігів: ЧДТУ, 2002. -65 с.
53. Бакалов В.Г., Чередніченко П.І., Бакалов О.В. Синтез і моделювання технічних об'єктів за допомогою комп'ютера». Мет. вказ. до лаб. робіт з курсу «Основи САПР обладнання легкої, текстильної та хімічної промисловості». Чернігів: ЧДТУ, 2001. -69 с.
54. Бакалов В.Г., Бакалов В.Г., Шевелило Т.М., Чередниченко П.І. Плоскощільна екструзійна головка. Патент № u 2005 04728 від 20.05.2005, 7 В29С47/14
55. Бакалов В.Г., Бакалов О.В., Чередниченко П.І. Сучасні тенденції розвитку тонких полімерних плівок і обладнання для їх виробництва. IV Межд. научно-практ. конф. «Техника для химволокон» 23-27 мая 2005, Сб. докл. ч.1, Чернигов, с.220-223

56. Заявка №63-7133 (Япония). Головка для изготовления пленки. Торэ К.К. Заявлено 83.12.26. №58 - 244261. Публикация 88.02.15. №2-179.
57. Басов Н. И., Брагинский В. А., Казанков Ю. В. Расчёт и конструирование формующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов: Учебник для вузов. - М.: Химия, 1991. - 352 с.
58. Северс Э.Т. Реология полимеров. Пер. с англ. Под ред. А.Я. Малкина. -М.: Химия, 1966. - 197 с.
59. Фишер Э. Экструзия пластических масс. Пер. с англ. Под ред. С.И.Гдалина. -М.: Химия, 1970. - 284 с.
60. Басов Н.И., Казанков Ю.В. Литьевое формование полимеров. - М.: Химия, 1984. - 232 с.
61. Басова Н.И. Техника переработки пластмасс. - М.: Химия, 1985. - 528 с.
62. Бернхардт Э. Переработка термопластичных материалов. Пер. с англ. Под ред. Г.В.Виноградова. - М.: Госхимиздат, 1965. - 747 с.
63. Вопросы экструзии термопластов. Сб. перев. Под ред. А.Н.Левина. -М.: Изд. иностр. лит., 1963. - 334 с.
64. Крих Г.Б. Особливості застосування реологічних моделей неньютонівських рідин. //Сб. трудів Нац. ун-т «Львівська політехніка». - 2007. - с. 71- 82
65. Кривошеев В.С., Решетник И.Г., Зотов Ю.С., Яхно О.М., Сkochеляс Б.А. Течение вязкой жидкости между дорном и матрицей кабельной головки. //Химическое машиностроение, вып. 20. - К.: Техніка, 1974, с. 128-133.
66. Яхно О.М., Желяк В.І. Гідравліка неньютонівських рідин. -К.: Вища школа, 1995. - 199 с.
67. Виноградов Г.В., Малкин А.Я. Реология полимеров. - М.: Химия, 1977. - 438 с.
68. Калинин Э.Л., Саковцева М.Б. Свойства и переработка термопластов. - Л.: Химия, 1983. -140 с.
69. Уайт Дж., Чой Д. Полиэтилен, полипропилен и другие полиолефины. Пер. с англ. Е.С.Цобкалло. -Спб.: Профессия, 2006. - 240 с.
70. Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров. - М.: Химия, 1974. - 392 с.
71. Бокшицкий М.Н., Клинов И.Я., Бокшицкая Н.А. Статическая усталость полиэтилена. - М.: Машиностроение, 1967. - 222 с.
72. Кацнельсон М.Ю., Балаев Г.А. Полимерные материалы: Справочник. -Л.: Химия, 1982. - 317 с.
73. Огибалов П.М., Ломакин В.А., Кишкин Б.П. Механика полимеров. -М.: Моск. ун-с, 1975.- 528 с.
74. Перепечко И.И. Введение в физику полимеров. -М.: Химия, 1978. -312 с.
75. Полиэтилен и другие полиолефины. /Под ред. П.В.Козлова, Н.А.Платэ. - М.: Мир, 1964. - 594 с.
76. Самосатский Н.Н. Полиэтилен. Способы переработки. -К.: Техніка, 1968. -233 с.
77. Шифрина В.С., Самосатский Н.Н. Полиэтилен. (Получение и свойства). - Л.: Госхимиздат, 1961. - 175 с.



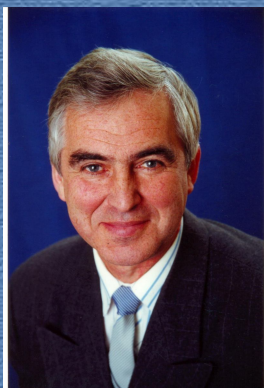
78. Шпаковская и др. Полиэтилен низкого давления. -М.: НИИТЭХим. 1989. - 134 с.
79. ГОСТ 25951-83 (СТ СЕВ 3699-82). Пленка полиэтиленовая термоусадочная. -М.: Гос. Комитет СССР по стандартам, 1983. - 20 с.
80. Эльдаров Э.Г. Закономерности процесса экструзии полиэтилена высокой плотности: Автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.17.06/ Моск. химико-техн. ин-т им. Д.И.Менделеева. – М.: 1972. – 21 с.
81. ТУ 5434-001-14404190-2003. Бумага упаковочная с полиэтиленовым покрытием. -М.: Россия, 2002. - 23 с.
82. Кузнецов В.В. и др. «Спай» при литье под давлением изделий из термопластов. -М.: НИИТЭХим, 1991. -19 с.
83. Карпачев П. С., Майзель М. М. Машины и аппараты производств пленочных материалов. -М.: Легкая индустрия, 1964. - 610 с.
84. ТУ У 6-00209651.202-99. Пленка упаковочная «Стреч». Технические условия. ТОВ Науково-виробнича фірма «Пластмодерн». - К.: 1999. - 14с.
85. Левин А.Н. Вопросы экструзии термопластов. -М.: Изд. иност. литер., 1963. - 334 с.
86. Мак-Келви Д.М. Переработка полимеров. Пер. с англ. Ю.В.Зеленева, Б.П.Пашинина, Э.И.Родина. -М.: Химия, 1965. - 267 с.
87. Переработка полимеров. Сб. переводов. Под ред. Р.В.Торнера. -М.-Л.: Химия, 1964. -404 с.
88. Завгородний В.К., Калинин Э.Л., Махаринский Е.Г. Оборудование предприятий по переработке пластмасс. -Л.: Химия, 1972. - 354 с.
89. Лапшин В.В. Основы переработки термопластов литьем под давлением. - М.: Химия, 1974. -271 с.
90. Николаев А.Ф. Технология пластических масс. -Л.: Химия, 1977. - 368 с.
91. Пат. №35890 Україна, И29С47/14, И29L7/00. Плоскощілинна екструзійна головка. /Рябінін Д.Д., Мотін А.М., Біліцька О.В., Рябініна О.Д. Нац. Техн. ун-т України, «КП»; Заявлено 02.02.1999. – Публікація 16.04.2001. Бюл. №3, 2001 р.
92. Экструзионная головка для формования изделий из полимерных материалов: А.С. №513867 СССР, /С.И.Гдалин, П.Г.Войханский (СССР). – №1849757/05; Заявлено 22.11.72 Оpubл. 15.05.76. Бюл. №18.
93. Заявка №62-54650 (Япония). Головка для формования экструдируемыми. Мицубиси Д. - Заявлено 82.12.20, №57-223346; Публи. 87.11.16. №2-1367.
94. Пат. №1729777 СССР, В 29 С 47/16. Фильера для изготовления плоских пленок и листов из расплавов полимеров. /Кондратенко В.Ф., Антипов А.И., Моисеенко В.К. Специальное конструкторское бюро Химико-фотографической промышленности; Заявлено 26.12.88. - Публикация 30.04.92. Бюл. №16.
95. Заявка №2586611 (Франция). Устройство для быстрой регулировки отверстия плоской головки. - Публикация 87.03.06 №10.
96. Заявка №62-43849 (Япония). Т-образная головка для экструзии. Тосиба К.К. – Заявлено 83.03.31, №58-571319; Публикация 82.09.17. №2-1027.

97. Пат. №2023591 РФ, В 29 С 47/14. Устройство для формования полотна экструзионным методом. /Сорочкин В.В., Краснов Л.С. Завод кровельных и полимерных материалов производственного объединения «Мосстройпластмасс»; Заявлено 19.10.92. – Публи. 30.11.94. Бюл. № 22.
98. Пат. №277238 ГДР. Устройство для калибровки экструзионной головки для термопластов. - Публикация 90.03.28. Бюл. №13.
99. Пат. №35890 Україна, В29С47/14. Плоскощілинна екструзій на головка. /Рябінін Д. Д., Мотін А.М., та ін. Національний технічний університет України; Заяв/ 02.02.1999. - Пуб. 16.04.2001. Бюл. №3.
100. Pat. 5234330 США, МКИ В29С 47/08; В29С 47/14. Dies. /Steven A. Billow, Rochester; Stephen T.Faulkenberry, Conesus; Thomas M.Laney, Spencerport, all of N.Y. Eastman Kodak Company, Rochester, N.Y. Appl.No.: 715208. Filed: Jun. 14, 1991. Date of Patent: Aug.10, 1993.
101. Pat. US 6419747 B1 США, МКИ В05С 3/02. Extrusion Die. /Kenneth D. Vinson, Cincinnati, OH (US). The Procter & Gamble Comp., Cincinnati, OH (US). Appl. No.: 09/258497. Filed: Feb. 26, 1999. Date of Patent: Jul.16, 2002.
102. Pat. US 2002/0175434 A1 США, МКИ В29С 47/16; В29С 47/92. Method of manufacturing sheet. /Masatsugu Uehara, Otsu-shi; Yasuhiro Nakai, Kouka-gun; Hajime Hirata, Moriyama-shi. Kubovcik & Kubovcik. Appl. No.: 10/130255. Filed: Sep. 17, 2001. Date of Patent: Nov.28, 2002.
103. Pat. 4285655 США, МКИ В29F 3/04; В29D 7/04. Coat hanger die. /Yutaka Matsubara, Tokyo. Toa Nenryo Kogyo Kabushiki Kaisha, Tokyo, Japan. Appl. No.: 91893. Filed: Nov. 7, 1979. Date of Patent: Fug. 25, 1981.
104. Pat. 5608637 США, МКИ G06F 19/00; G06G 7/64; G06G 7/66. Method for designing a profile extrusion die plate. /Hsin-Pang Wang, Rexford, N.Y.; Srinivasu Kakulavar, Gotemba, both of Japan. General Electric Company, Schenectady, N.Y. Appl. No.: 489908. Filed: Jun. 13, 1995. Date of Patent: Mar. 4, 1997.
105. Pat. 5926393 США, МКИ G06F 17/00. Method for designing a profile extrusion die plate for shaping a polymer resin into a profile. /Hsin-Pang Wang, Rexford, N.Y.; Erich Otto Teutsch, Richmond, Mass.; Martin Kin-Fei Lee, Schenectady, N.Y.; Erin Marie Perry, Niskayuna, N.Y.; Rick Francis Fiumara, Waterford, N.Y.; Srikanth Nanguneri, Clifton Park, N.Y. General Electric Company, Schenectady, N.Y. Appl. No.: 08/729997. Filed: Oct. 11, 1996. Date of Patent: Jul. 20, 1999.
106. Установка для изготовления пленок из полимерных материалов: А.С. №1570928 СССР. /В.П. Семенец, В.П.Баско, В.А. Сенатос, А.В. Семенец (СССР). –№4414601/23-05; Заявлено 88.04.25, Опубл. 90.06.15. Бюл. №22.
107. Фильера для изготовления плоских пленок и листов из расплавов полимеров: А.С. №1650459 СССР, /В.Ф. Кондратенко, А.И. Антипов, В.К. Моисеенко (СССР). – №4612511/05; Заявлено 88.12.05; Опубл. 91.05.23. Бюл. №19.
108. Фильера для изготовления плоских пленок: А.С. №1729777 СССР, /В.Ф. Кондратенко, А.И. Антипов, В.К. Моисеенко (СССР). – №4625386/00-05; Заявлено 88.12.26, Опубл. 92.04.30. Бюл. №16.

109. Грифф А. Технология экструзии пластмасс. /Под ред. В.В.Лапшина. -М.: Мир, 1965. - 307 с.
110. Чередніченко П.І., Бакалов О.В. Аналіз конструкцій та методик розрахунку плоскощільних головок. Вісн. Чернігів. держ. техн. ун-у №34, 2008, Серія „Технічні науки” с. 144-151.
111. Гурвич С.Г., Ильяшенко Г.А., Мочман Ш.Е. Расчет и конструирование машин для переработки пластических материалов. -М.: Машиностроение, 1970. - 232 с.
112. Жданов Ю. А., Допира П. К., Иванова Л. А. Расчет и профилирование каналов формующих головок с круглым цилиндрическим коллектором. //Химическое машиностроение, вып. 22. - К.: Техніка, 1975, с. 23-31.
113. Грузнов Г.Ф. Машины для переработки пластических масс. - М.-Л.: Машиностроение, 1966. - 226 с.
114. Коваленко І.В., Малиновський В.В. Основні процеси, машини та апарати хімічних виробництв. -К.: Інрес. Воля. 2006. - 264 с.
115. Чередніченко П.І., Бакалов В.Г., Бакалов О.В. Дослідження впливу зазорів плоскощільної головки на рівномірність товщини формуючої плівки по ширині. Вісн. Чернігів. держ. техн. ун-у №22, 2005, Серія „Технічні науки” с. 236-238
116. Чередніченко П.І., Бакалов В.Г., Бакалов О.В. Розрахунок геометричних розмірів плоскощільної філь'єри. В кн. III Межд. научно-практ. конф. “Техника для химволокон”. 24-28 мая 2004 года. Сб. докладов, Чернигов, 2004, с.331-332
117. Бакалов В.Г., Бакалов О.В., Чередніченко П.І. Вивчення впливу нерівномірності нагріву плоскощільної головки на рівномірність товщини плівки. Зб. матер. III українсько-польської наук. конф. молодих вчених „Механіка та інформатика” 28-30 квітня 2005, Хмельницький, с. 97-98
118. Бакалов О.В., Бакалов В.Г., Чередніченко П.І. Експериментальне дослідження руху полімеру в плоскощільній головці. 6 Межд. научно-практ. конф. «Техника и технология химволокон» 2007. Сб. докл., Чернигов, с. 102-104
119. Hoffmann K. FlieBkanalbercchnung an Profilwerkzeugen mit Finite-Elemente-Methoden, In: VDI-Kunststofftechnik Tagung «Extrusionswerkzeuge», 1993. S. 30-49.
120. Huneault M.A., Lafleur P.G., Carreau P.J. Evaluation of the FAN technique for profile die design. Intern. Polymer Processing 11 (1996) 1.
121. Keunings, R.; Crochet, M.J.: Numerical Simulation of the Flow of a fluid through an abrupt contraction. J. Non.-Newt. Fluid Mech. 14 (1984) pp. 279-299.
122. Leonov A.I., Prokunin, A.N. On the stretching and swelling of an elastic liquid extruded from a capillary die. Rheol. Acta 23 (1984) pp. 62-69.
123. Luo X.L., Taimer R.L. Finite Element Simulation of Long and Short Circular Die Extrusion Experiments Using Integral Models, Int. J. Num. Meth, Eng. 25 (1988) pp,9-22.

124. Marchal J.M., Goublomme A. Parametric Optimization of extrusion dies through numerical Simulation. In: 3rd ESAFORM Conference on Material Forming, 2000.
125. Crochet M.J., Davies A.R., Wakers, K. Numerical Simulation of Non-Newtonian Flow. Elsevier, Amsterdam 1984.
126. Haberstroh E., Hoffmann K., Kropp D. Rechenmöglichkeiten bei der Extrusion von Elastomeren, Kautschuk Gummi Kunststoffe 50 (1997) 4, S. 304-311.
127. Силин В.А. Динамика процессов переработки пластмасс в червячных машинах. -М.: Машиностроение, 1972. -120 с.
128. Воскресенский А. М., Войцеховский В. Б., Коугия Ф. А. Моделирование переработки в одночервячных машинах полимеров с произвольной аномалией вязкости. // Химическое и нефтяное машиностроение. - 1995. - №1. - с. 13-17.
129. Воскресенский А.М. и др. Основы проектирования процессов литья под давлением полимерных материалов. -М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1992. - 70 с.
130. Жданов Ю. А. Исследование течения расплавов полимеров в каналах головок червячных машин: Автореф. дисс. канд. техн. наук. /Киевский политехнический институт. - К.: 1969, - 24 с.
131. Глухов Е.Е. Конструирование пластмассовых изделий и формующего инструмента. - М.: 1977. - 95 с.
132. Переработка пластмасс. Справ. пособие. Под ред. В.А.Брагинского. -Л.: Химия, 1985. -296 с.
133. Mitsoulis E. Numerical Simulation of Entry and Exit Flows in Slit Dies. Polym. Eng. Sei. 24 (1984) 9, pp. 707-715.
134. Nobrega J.M., Cameiro O.S., Pinho F.T., Oliveira P.J. Flow Balancing of Profile Extrusion Dies. In: ANTEC, SPE Annual Technical Conference. Paper presented May 6-10, 2001, Dallas, USA.
135. Orbey N., Dealy J.M. Isothermal Swell of Extrudate from Annular Dies; Effects of Die Geometry Flow Rate and Resin Characteristics. Polym. Eng. Sei. 24 (1984) 7. pp. 511-518.
136. Booy M.L. A network flow analysis of extrusion dies and other flow Systems. Polymer Engineering and Science 22 (1982) 7, S. 432-437.
137. Michaeli W., Kaul S. Computer-aided optimization of extrusion dies. In: ANTEC, SPE Annual Technical Conference, May 6-10, 2002, San Francisco, USA.
138. Michaeli W., Kaul S., Wolff T. Computer-aided optimization of extrusion dies. Journal of Polymer Processing (2001) 21 S.: 225-237.
139. Sebastian D.H., Rakos R. Interactive Software Package for the Design and Analysis of Extrusion Profile Dies. Adv. Polym.Tech.5 (1985), pp. 333-339.
140. Филатов В.И. Технологическая подготовка производства пластмассовых деталей. -Л.: Машиностроение. 1976. - 112 с.
141. Бортников В.Г. Основы технологии переработки пластических масс. -Л.: Химия, 1983. - 325 с.

142. Бортников В.Г. Метод расчета режимов течения расплавов полимеров с использованием ПТР. //Полимерные материалы. -2007. - №10. –с.20 – 23
143. Шаповал В.М. Механика элэнгационного течения полимеров. – М.: Физматлит, 2007. – 176 с.
144. Дерягин Б.В., Леви С.М. Физико - химия нанесения тонких слоев на движущуюся полужку. –М.: Изд. Академия наук СССР, 1959. – 208 с.
145. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. -М.: Высшая школа, 1985, - 327 с.
146. Метфессель С. Тонкие пленки, их изготовление и измерение. Пер. с нем. Под ред. Н.С.Хлебникова. - М.-Л.: Гос. энергет. издат. 1963. -272 с.
147. Каверин В.А., Феклин К.П. Выбор, изготовление, испытания тары и упаковки. МГУП. - М.. 2002. -260 с.
148. ГОСТ 10354-82. Пленка полиэтиленовая. Технические условия. -М.: Гос. Комитет СССР по стандартам, 1982. - 34 с.
149. Боровков А.А. Математическая статистика. –М.: Наука, 1984. – 472 с.



Чередніченко Петро Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри “Машини та апарати виробництв хімічних волокон і текстильної промисловості” Чернігівського державного технологічного університету, академік Інженерної і Технологічної Академії України.

Автор і співавтор більш ніж 180 наукових робіт, серед них 1 навчальний посібник з грифом Міністерства освіти і науки України, 3 монографії, 14 авторських свідотств.

Напрямок наукової діяльності – розробка машин і апаратів хімічних волокон і текстильної промисловості.



Бакалов Валерій Григорович – кандидат технічних наук, доцент кафедри “Машини та апарати виробництв хімічних волокон і текстильної промисловості” Чернігівського державного технологічного університету.

Автор і співавтор більш ніж 80 наукових робіт, серед них 1 навчальний посібник з грифом Міністерства освіти і науки України.

Напрямок наукової діяльності – моделювання технологічних процесів хімічних виробництв.



Бакалов Олег Валерійович – асистент кафедри “Машини та апарати виробництв хімічних волокон і текстильної промисловості” Чернігівського державного технологічного університету.

Автор і співавтор більш ніж 15 наукових робіт.

Напрямок наукової діяльності – розробка машин і апаратів хімічних волокон і текстильної промисловості.