

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ  
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРОЕКТУВАННЯ

ЩЕРБАНЬ В.Ю.

# **МЕХАНІКА НИТКИ**

Монографія

Київ – 2018

УДК 531.1-4  
ББК 22.232:234:236  
Щ 61

*Рекомендовано Вченою радою Київського національного  
університету технологій та дизайну для широкого кола викладачів, науковців, аспірантів,  
магістрів та студентів профільних вищих навчальних закладів, інженерно-технічних  
працівників швейної та текстильної промисловості  
(Протокол №8 від 25 квітня 2018 року)*

*Автор:*

*ЩЕРБАНЬ В. Ю.* – лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, академік Міжнародної академії комп’ютерних наук і систем, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій проектування Київського національного університету технологій та дизайну.

*Рецензенти:*

*ЧЕПЕЛЮК О.В.* – д.т.н., професор, завідувач кафедри, Херсонський національний технічний університет;

*ОПОНАСЕНКО В.М.* – д.т.н., професор, провідний науковий співробітник, Інститут кібернетики НАН України;

*ЗДОРЕНКО В.Г.* – д.т.н., професор, завідувач кафедри, Київський національний університет технологій та дизайну.

Щ 61 Щербань В.Ю. Механіка нитки / В.Ю.Щербань. – К.:Видавництво «Укрбланковидав», 2018. – 533 с.

ISBN 978-966-97741-2-5

Монографія об’єднує результати досліджень автора по розробці основ статичної, кінематики і динаміки ниток. На основі узагальненої механіки нитки вирішені завдання за визначенням умов взаємодії ниток з направляючими поверхнями великої і малої кривизни. Вирішений ряд прикладних завдань механіки нитки, приведені результати експериментальних досліджень умов взаємодії ниток з направляючими і робочими органами сучасних текстильних машин. Отримані нові алгоритми та програмне забезпечення для удосконалення технологічних процесів та обладнання текстильної, трикотажної галузі. Призначена для широкого кола викладачів, науковців, аспірантів, магістрів та студентів профільних вищих навчальних закладів, інженерно-технічних працівників швейної та текстильної промисловості

ISBN 978-966-97741-2-5

**УДК 531.1-4**  
**ББК 22.232:234:236**  
©В.Ю.Щербань  
©Укрбланковидав, 2018

**ЗМІСТ**

Вступ .....	6
1. Узагальнена теорія механіки ниток здатних до деформації в перетині	8
1.1. Основні допущення, прийняті при побудові ниток-моделей і їх класифікація .....	9
1.2. Визначення геометричних характеристик осі м'яких ниток .....	24
1.3. Визначення швидкостей і прискорень точок осі м'якої нитки .....	37
1.4. Основні рівняння динаміки нитки, яка рухається по направляючій великої кривизни.....	45
1.5. Умови взаємодії ниток з направляючою, що деформується .....	55
1.6. Аналіз причин обривності ниток при їх переробці на технологічному устаткуванні .....	63
2. Взаємодія ниток з направляючими поверхнями .....	79
2.1. Теоретичне дослідження процесу взаємодії нитки з направляючими поверхнями малої кривизни при її подовжньому і поперечному ковзанні	79
2.1.1. Визначення натягнення ведучої гілки нитки у разі кривизни змінного радіусу .....	81
2.1.2. Визначення натягу ведучої гілки нитки у разі постійного радіусу кривизни .....	89
2.1.3. Поперечне ковзання нитки по напрямній постійного радіусу кривизни .....	95
2.2. Рівновага жорсткої на вигин нитки в полі сили тяжіння .....	100
2.3. Рівновага і рівномірний рух нитки у разі направляючої поверхні великої кривизни .....	103
2.4. Вплив форми поперечного перетину направляючої на величину натягнення ведучої гілки .....	113
2.5. Критерії вибору розмірів спрямовувачів нитки .....	122
3. Експериментальне дослідження умов взаємодії ниток з направляючими .....	129
3.1. Чинники, що впливають на зміну натягу нитки при її взаємодії з напрямною. Обґрунтування вибору ниток і пряжі. План проведення експерименту .....	130
3.2. Розробка установок для проведення експерименту. Обґрунтування вибору реєструючої та вимірювальної апаратури .....	139
3.3. Сумісний вплив радіусу кривизни напрямної, натягу веденої гілки, кута обхвату і швидкості руху нитки на натяг ведучої гілки .....	149
3.4. Залежність зміни натягу від радіусу кривизни направляючої поверхні .....	153
3.5. Вплив натягу веденої гілки, швидкості руху нитки на зміну її натягу після напрямної .....	159
3.6. Залежність питомого розривного навантаження і відносного	166

розривного подовження ниток від умов взаємодії з напрямною	
3.7. Анізотропія тертя ниток .....	174
3.8. Вплив форми направляючої поверхні на величину натягу нитки .....	177
4. Удосконалення технологічних процесів текстильної промисловості з урахуванням нелінійних характеристик деформації та тертя в зоні контакту нитки з напрямною .....	183
4.1. Взаємодія нитки з направляючими поверхнями малої кривизни.....	184
4.2. Дослідження взаємодії комплексних ниток і пряджі з циліндричною напрямною поверхнею .....	202
4.3. Експериментальне дослідження умов взаємодії ниток з напрямними поверхнями .....	233
4.4. Удосконалення технологічних процесів текстильного виробництва на основі мінімізації натягу пружної системи заправки .....	268
5. Удосконалення технологічних процесів в 'язань та ткацтва з урахуванням анізотропії фрикційних властивостей нитки .....	300
5.1. Теоретичне дослідження поперечного руху ниток з урахуванням анізотропії тертя .....	300
5.2. Теоретичне дослідження впливу матеріалу нитки і анізотропії тертя на її натяг і форму осі .....	332
5.3. Експериментальне дослідження процесу взаємодії ниток з направляючими з урахуванням анізотропії тертя .....	373
5.4. Дослідження технологічних процесів трикотажного та ткацького виробництв з урахуванням анізотропії тертя ниток .....	408
6. Математичні, алгоритмічні та програмні компоненти системи проектування форми лінії заправки ниток на круглов'язальних машинах удосконалення конструктивних елементів системи ниткоподачі круглов'язальних машин .....	430
6.1. Теоретичне обґрунтування обчислювальної схеми алгоритму послідовної оптимізації, що мінімізує пошуки в дереві варіантів .....	433
6.2. Обчислювальна реалізація алгоритму послідовної оптимізації, що мінімізує пошуки в дереві варіантів .....	437
6.3. Задача синтезу системи подачі нитки на круглов'язальних машинах для випадку перешкод у вигляді вертикальних ліній .....	444
6.4. Оптимізація плоскої траєкторії нитки в круглов'язальних машинах у випадку перешкод у вигляді кіл .....	453
6.5. Програмна реалізація алгоритму пошуку оптимальної траєкторії заправки нитки в круглов'язальних машинах .....	460
6.6. Математичне та програмне забезпечення системи проектування лінії заправки в круглов'язальних машинах у просторі .....	466
Загальні висновки, рекомендації і перспективні питання .....	472
Список літератури .....	475

Додатки.....	481
--------------	-----

## ВСТУП

Вирішення завдань, що стоять перед текстильною і легкою промисловістю по збільшенню випуску тканин і трикотажних полотен на основі зростання продуктивності існуючого устаткування, використання сучасних технологій, що базуються на останніх досягненнях науки, має важливе економічне і технічне значення.

Низька якість сировини, недосконалість лінії заправки нитки технологічного устаткування при збільшенні натягнення по глибині заправки приводить до обривів. Простої устаткування, пов'язані з ліквідацією обриву, складають в даний час 75-80% від загального часу простоїв.

Значно скоротити число обривів можна шляхом використання якісної сировини і оптимізацією умов переробки ниток на технологічному устаткуванні, де має місце взаємодія з направляючими і робочими органами великої і малої кривизни.

Відсутність фундаментальних досліджень в області вивчення взаємодії ниток з направляючими великої кривизни з урахуванням деформації в перетині, жорсткості на вигин утрудняє рішення такої важливої задачі як вдосконалення технологічних процесів ткацтва і трикотажного виробництва.

Отже, розробка теоретичних основ взаємодії ниток з направляючими при формуванні тканини і трикотажу є актуальною темою, що вимагає фундаментального дослідження і швидкого впровадження. Вивчення цієї проблеми дозволить внести помітний внесок до вирішення науково-технічних питань, пов'язаних із збільшенням продуктивності і довговічності роботи текстильного устаткування, а також якості продукції, що випускається.

У пропонованій монографії знайшли своє віддзеркалення:

1. Теоретичні основи визначення головних компонентів кривизни і кручення осі нитки з урахуванням змінання в зоні контакту з направляючою поверхнею довільного профілю.

2. Теоретичні основи визначення швидкостей і прискорень точок осі нитки, з урахуванням змінання, при її русі по направляючій великої кривизни.

3. Теоретичні основи динаміки процесу взаємодії здатних до деформації в перетині, жорстких на вигин ниток з направляючими великої кривизни.
4. Основи теорії взаємодії ниток з направляючою поверхнею, що деформується.
5. Теоретичні дослідження за визначенням форми осі і натягнення нитки у разі подовжнього і поперечного ковзання по напрямній з урахуванням сили ваги, коефіцієнта жорсткості на згин.
6. Визначення форми рівноваги жорстких на вигин ниток з двома точками закріплення в полі сили тяжіння.
7. Теоретичні основи взаємодії здатних до деформації в перетині, жорстких на вигин ниток з напрямними малої і великої кривизни.
8. Оцінка впливу форми направляючої поверхні великої кривизни на натяг комплексних ниток і пряжі.
9. Методи експериментального дослідження процесу взаємодії ниток з напрямними великої кривизни з урахуванням анізотропії фізико - механічних властивостей.
10. Критерії оптимізації при виборі розмірів спрямовувачів нитки різних в'язальних машин.

## **1. УЗАГАЛЬНЕНА ТЕОРІЯ МЕХАНІКИ НИТОК ЗДАТНИХ ДО ДЕФОРМАЦІЇ В ПЕРЕТИНІ**

Удосконалення багатьох технологічних процесів текстильної і легкої промисловості повинне базуватися на теоретичному і експериментальному дослідженні взаємодії ниток з робочими органами технологічного устаткування. Під робочими органами тут матимемо на увазі не тільки голки, платини, спрямовувачі ниток гребінок і ін. - на в'язальних машинах і отвори ремізних рамок, зуби берда - на ткацьких верстатах, але і різного роду спрямовувачів нитки, пристрої для натягу ниток, компенсатори натягу.

Процес формування елемента тканини і трикотажу не закінчується на останній приєднаній уточині і в'язаній петлі, він продовжується і при відході від зони формування тканини або від відбійної площини для трикотажу. Це пояснюється взаємодією ниток між собою, при цьому стабілізація положення ниток в тканині і трикотажі наступить тоді, коли виконуватиметься умова рівноваги між окремими силовими елементами, складових тканини і трикотажу на даній ділянці. З цього виходить, що вивчення взаємодії ниток в робочій зоні доповнюватиме комплекс досліджень процесу переробки ниток на технологічному устаткуванні текстильної і легкої промисловості.

Проведення теоретичних досліджень повинне сприяти широкому освітленню процесів взаємодії ниток з направляючими поверхнями великої кривизни з урахуванням змінання як самих ниток, так і що направляють, що дозволить оптимізувати ці процеси з погляду зниження обривності. Для цього на попередньому етапі необхідно провести докладну класифікацію ниток, визначити необхідні допущення для побудови ниток-моделей [1, 14-31], які використовуються при теоретичному дослідженні різних технологічних процесів легкої і текстильної промисловості.



### **1.1. Основні допущення, прийняті при побудові ниток-моделей і їх класифікація**

При теоретичному дослідженні взаємодії реальних текстильних ниток з направляючими неможливо обійтися без певних допущень, ухвалення яких дозволяє отримати рішення задачі з необхідним ступенем точності. Отже, вибір моделі нитки з урахуванням прийнятих допущень ще на початковій стадії визначає величину помилки, що отримується після проведення теоретичних досліджень, що дозволить використовувати результати, залежно від їх значення, як для якісного, так і для кількісного аналізу процесу, що вивчається.

Побудова нитки-моделі повинна базуватися на докладній класифікації всього різноманіття існуючих ниток [1,14-31].

Найбільш докладна класифікація за фізико - механічними показниками, до теперішнього часу, була запропонована проф. Мігушовим І.І. [1], яка є логічним продовженням досліджень проф. Мінакова А.П. Приведена на рис. 1.1 структурна класифікація ниток складена нами з урахуванням, як форми поперечного перетину реальних ниток, так і наявність двох модифікацій ниток-моделей. Дана схема дозволяє прослідкувати взаємозв'язок між реальними нитками і моделями, встановити порядок при виборі певної моделі нитки, виходячи з конкретних характеристик реального об'єкту.

Проводити класифікацію необхідно по структурі, формі поперечного перетину ниток і по фізико - механічних властивостях.

По структурі реальні нитки можна розділити (див. рис. 1.2) на комплексні нитки, пряжу, монопітки і вироби спеціального призначення [1, 10, 12]. Комплексні нитки утворюються шляхом скручування або склеювання окремих елементарних ниток і мають більш рівномірну

структуру, ніж пряжа, яка складається з окремих елементарних волокон, з'єднаних в процесі прядіння.

Класифікуються

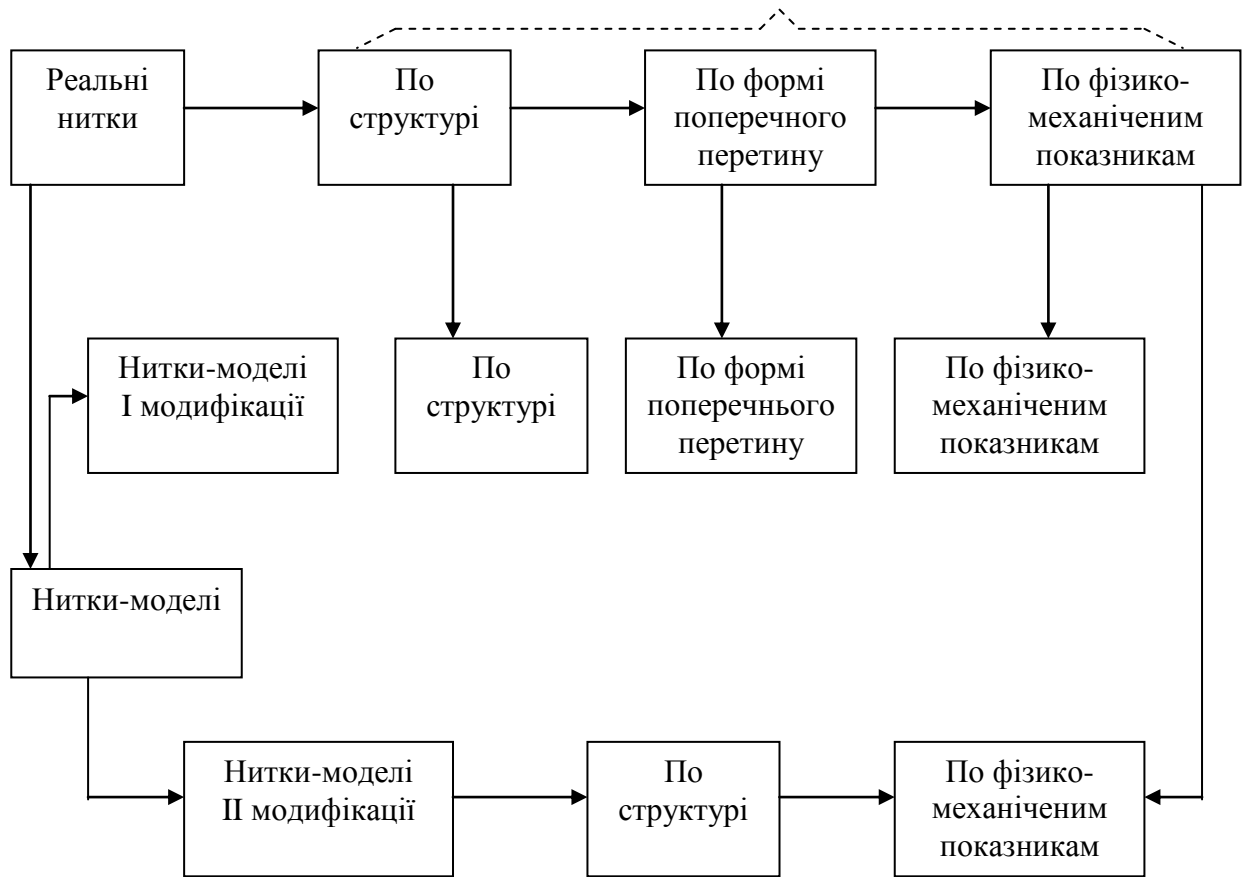


Рис. 1.1. Структурна класифікація ниток

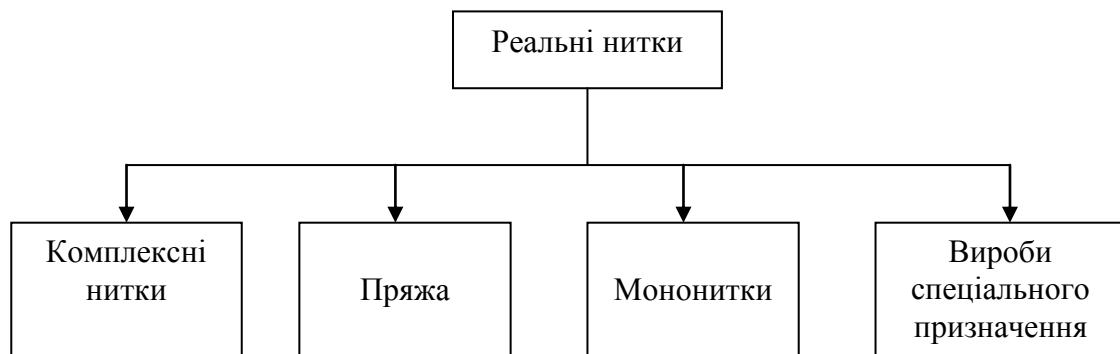


Рис. 1.2. Класифікація реальних ниток по структурі

Пряжа, отримана при кардній або гребінній системі прядіння, відрізняється більш орієнтованим розташуванням окремих волокон, чим пряжа, отримана за апаратним способом.

Мононитками є "... одиночна нитка, що не ділиться в подовжньому напрямі без руйнування..." [1]. До монониток відносяться різного роду волосіні, металеві нитки і тому подібне, які можна безпосередньо використовувати в трикотажних і ткацьких технологічних процесах.

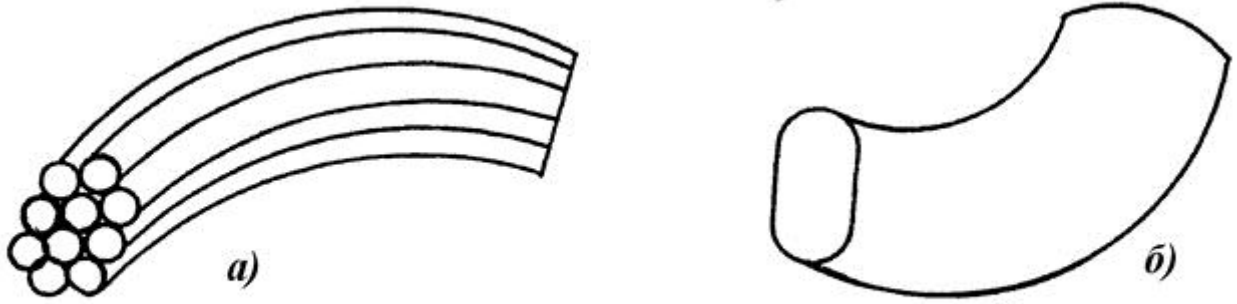
До виробів спеціального призначення можна віднести комбіновані гнучкі елементи різних машин і механізмів, дроти, антени, тобто об'єкти, що складаються з поєднання різних матеріалів, що мають складну внутрішню структуру.

Для побудови математичних моделей необхідно від складних реальних об'єктів, шляхом ухвалення необхідних допущень, переходити до моделей, які для свого опису не вимагають застосування складного математичного апарату і, в той же час, дозволяють з достатнім ступенем точності описувати поведінку реальних ниток.

На рис. 1.3 показані різні нитки-моделі, які розділені на дві модифікації. До першої модифікації відносяться моделі, які найповніше описують поведінку реальних ниток за різних умов вантаження і по своїй структурі вельми наближені до останніх. Так комплексні нитки і пряжа (див. рис.1.3, а) представляються у вигляді окремих не скручених філаментів, розташованих один над одним. Як мононитки, так комплексні нитки і пряжа можуть бути представлені у вигляді складних геометрично правильних тіл. На рис. 1.3 б представлений один з випадків, коли реальна нитка представляється циліндровим тілом.

Необхідно відзначити, що моделі I-й модифікації набули найбільш широкого поширення при дослідженні переробки ниток. У тих випадках, коли реальні нитки піддаються дії у вузькому спектрі зміни

Нитки-моделі I модифікації



Нитки-моделі II модифікації

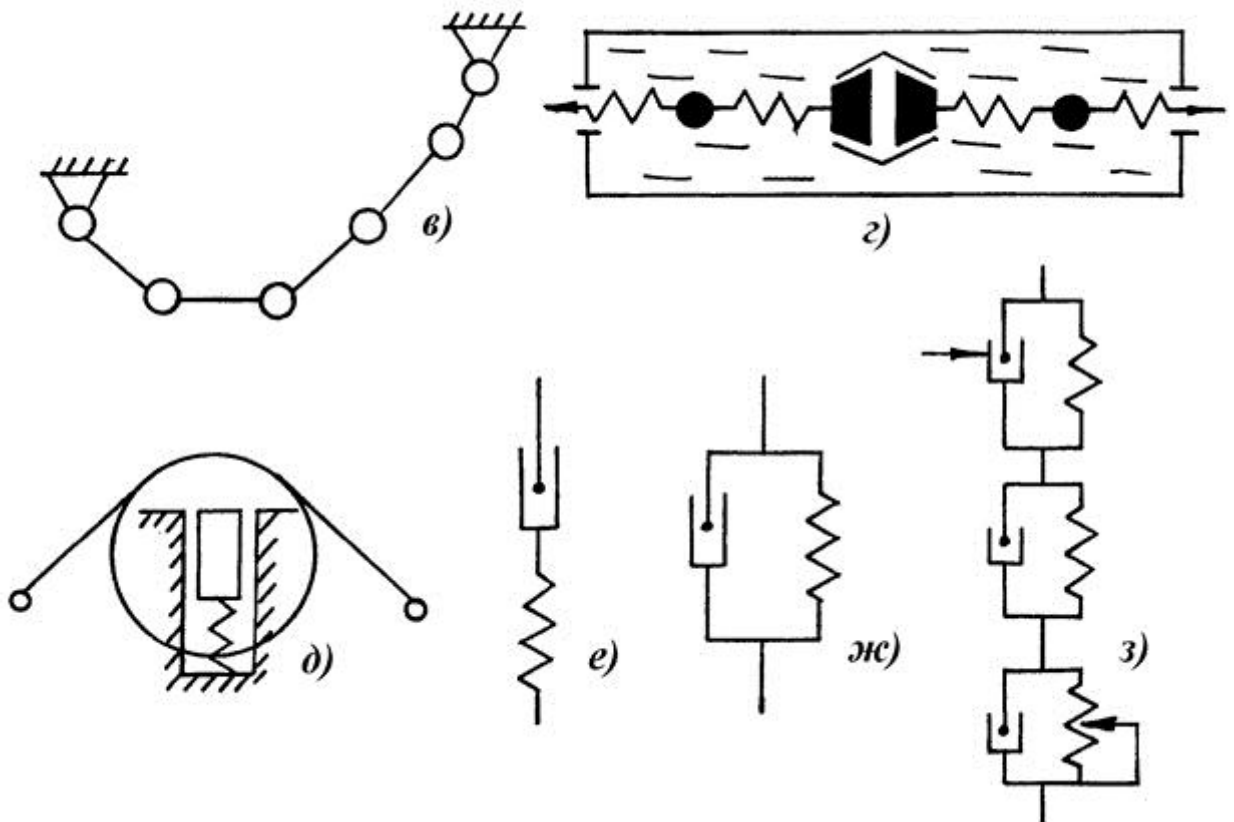


Рис.1.3. Приклади ниток-моделей різної структури

силового поля, характеру навантаження або необхідно досліджувати фізико - механічні показники реальних ниток, умови їх рівноваги тільки при розтягуванні, стисненні в подовжньому і поперечному напрямі, змінання в зоні контакту, застосовують моделі II-й модифікації.

На рис. 1.3 в, г, д, е, ж, з показані окремі з них. Дані моделі представляють сукупність окремих елементів, утворюючих механічні, гідро механічні і ін. системи різного ступеня складності залежно від того, які властивості реальних ниток вони описують.

На мал. 1.3,в показана модель нитки, що провисає в полі сили тяжіння і представляє сукупність сполучених між собою стрижнів. Для опису процесу м'ятої нитки, яка виконує функцію направляючої поверхні, використовується шків з пружиною та повзуном, розташованим в тих, що вертикальних направляють (див. рис. 1.3, д) [1].

Для опису процесу розтягування ниток запропонований ряд моделей, які необхідно вибирати залежно від умов проведення експерименту і кінцевої мети. Так, найширше застосовують моделі Максвела (рис. 1.3, е), Кельвіна-Фойгта (рис. 1.3, же), Кукіна-Солов'єва (рис. 1.3, з). Вони утворені послідовним або паралельним з'єднанням пружних і демпфуючих елементів, характеристики яких відображають фізико - механічні властивості реальних ниток. Для опису процесу розтягування ниток використовують і складніші моделі (рис. 1.3 г). У їх конструкцію входять різні елементи: заклинюючі елементи, ланцюжки зосереджених мас, сполучення пружних елементів.

Цілком очевидно, що вибір тієї або іншої моделі нитки (див. рис. 1.1) залежить від структури реальної нитки, як показано на схемі. Критерієм вибору служить, в першу чергу, найбільша відповідність моделі реальному об'єкту, а також характер руху і силового вантаження нитки. Одним з важливих показників при класифікації ниток є форма поперечного перетину останньої.

Це обумовлює вибір форми поперечного перетину моделі нитки.

Реальні текстильні нитки (рис. 1.4 а - к) мають найрізноманітнішу форму поперечного перетину, яка утворюється під впливом зовнішніх силових чинників і взаємного тиску окремих філаментів [1]. Так нитки у вільному стані (що не контактують з направляючими поверхнями) мають різну форму. При невисокому скручуванні (див. рис. 1.4 а) вона невизначена. При середньому скручуванні (див. рис. 1.4, б) має еліптичну форму. При скручуванні близькому до критичного (див. рис. 1.4 в) - коло. Це пояснюється тим, що із збільшенням скручування відбувається зростання деформації окремих філаментів (особливо розташованих на периферії перетину нитки) і, як наслідок, зростає натягнення і питомий тиск. Структура нитки стає більш орієнтованою.

При взаємодії з направляючими поверхнями відбувається змінання нитки в зоні контакту, що приводить до зміни форми поперечника. У ниток невисокого скручування (див. рис. 1.4, г) форма поперечного перетину представляє сплюснутий еліпс. При збільшенні скручування, за рахунок тиску з боку опорної поверхні, форма близька до еліптичної з плоским майданчиком (див. рис. 1.4 д) [1,10], а при скручуванні, близькому до критичного, вона представляє коло з плоским майданчиком контакту (див. рис. 1.4 е).

Мононитки мають поперечний перетин, форма якого визначається формою отворів філь'єр, через яких продавлюється полімер, і іншими специфічними особливостями технології їх виготовлення. Їх форма різноманітна: кругла, бобовидна (див. рис.1.4 ж); гантелевидна (див. рис. 1.4 з); з радіальними порами (див. рис. 1.4 і); з внутрішньою порожниною (див. рис. 1.4 к).

Таке різноманіття форм потребує розробки цілого ряду форм поперечника ниток-моделей I-й модифікації. Цілком очевидно, що вибір тієї або іншої форми залежить від умов, в яких знаходиться нитка: у

вільному стані або контактує з направляючою поверхнею; під дією прикладеної системи сил чи ні.

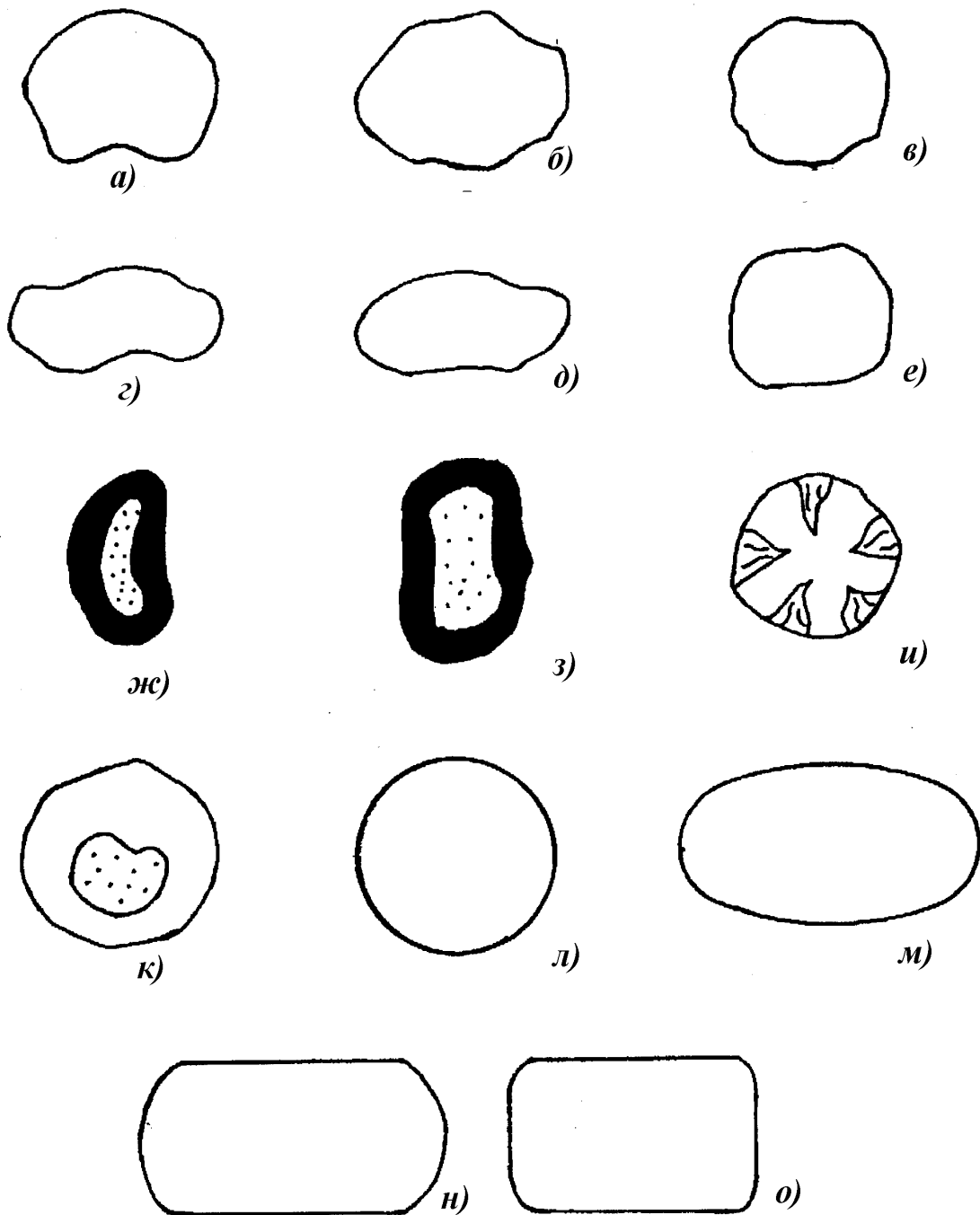


Рис.1.4. Форма поперечного перетину реальних ниток та моделей

До теперішнього часу найширше застосовуються наступні основні форми: кругла (рис. 1.4 л), еліптична (рис.1.4 м), стадіону подібна (мал. 1.4 н), прямокутна (флирет) (рис. 1.4 о).

Як впливає із структурної класифікації ниток (мал. 1.1) вибір форми поперечного перетину можна проводити тільки для моделей I-й модифікації, для моделей II-й модифікації, що представляють сукупність окремих елементів, він не підходить, що і відбите на схемі.

Зважаючи на специфіку дослідження, що проводиться, можна вважати, що найбільш прийнятними за формою поперечного перетину будуть циліндрові, еліптичні і стадіону подібна моделі.

Перейдемо до класифікації ниток і моделей по фізико - механічних властивостях (див. рис. 1.1). У загальному випадку всі текстильні нитки, що переробляються на в'язальних машинах і ткацьких верстатах, під дією прикладених зовнішніх сил випробовують складне вантаження [1,2,10,12]. Як показали проведені дослідження, в реальних нитках, при їх вантаженні, в будь-якому довільному перетині виникає напруга: нормальні [1,10] (наявність яких пояснюється розтягуванням нитки або її окремих складових філаментів); дотичні (наявність яких пояснюється вигином і крученням нитки). При контакті з направляючою поверхнею реальні нитки (включаючи мононитки і металеві нитки) більшою чи меншою мірою піддаються зминанню [2,6], що приводить до виникнення додаткової напруги в поперечному напрямі, яка збільшується від периферії до зони контакту. Декілька слів необхідно сказати про анізотропію тертя текстильних матеріалів, особливо при їх взаємодії з направляючими поверхнями великої кривизни [1,10, 18-22]. Річ у тому, що при проведенні досліджень було виявлено відмінність в значеннях коефіцієнта тертя при подовжньому і поперечному русі нитки. Це важливу обставину необхідно враховувати при дослідженні технологічних процесів, при



експериментальному визначенні фрикційних властивостей реальних ниток і при побудові ниток-моделей.

Декілька слів необхідно сказати про нерівномірний розподіл маси в реальних текстильних нитках по їх довжині і про різні геометричні розміри поперечного перетину. Ці дві важливі характеристики можуть істотним чином зробити свій вплив на величину напруги при вантаженні нитки за рахунок зміни розмірів поперечного перетину (площі).

Як наголошувалося вище, при класифікації ниток по структурі, існує відмінність в будові комплексних ниток і пряжі від монониток (однорідних тіл), для яких можна застосовувати апарат визначення напруги опору матеріалів. Як відзначав проф. Мігушов І. І. [1], найбільш раціональним шляхом буде використання моделей І-й модифікації (див. рис. 1.1), в якій комплексні нитки і пряжа будуть представлені однорідними суцільними тілами. Проте, не можна повністю скидати з рахунків і комбіновані моделі (див. рис. 1.3, а), в яких комплексні нитки і пряжа представляються як сукупність окремих філаментів, не скручених між собою. Такий підхід, запропонований проф. Щербаковим В.П., дозволяє більш глибоко досліджувати поведінку ниток при їх русі по тій, що направляє, проте виникають значні складнощі при вирішенні конкретних інженерних завдань.

Таким чином, основними фізико - механічними показниками, по яких може бути проведена класифікація реальних ниток, є: здатність до розтягування, опір вигину і крученню, зминання, анізотропія тертя, нерівномірний розподіл маси по довжині нитки і різні геометричні форми поперечника нитки.

Вельми істотним, на наш погляд, є аналіз залежностей "навантаження - деформація" для реальних ниток, який дозволяє поглибити класифікацію по фізико - механічних властивостях з погляду нелінійної і лінійної залежності між вказаними чинниками.

На рис. 1.5 представлені графічні залежності "навантаження - деформація", отримані експериментально. Так при розтягуванні ниток (рис. 1.5, а) залежність між силою розтягування  $P$  і деформацією  $\epsilon$  може мати прямолінійний характер (пряма 1), криволінійний (криві 2 і 3) і складний характер (крива 4) [1]. Текстильні нитки при переробці на технологічному устаткуванні мають відносну деформацію порядку 2-5% [1,10], тобто працюють в зоні пружних деформацій.

При вигині реальних ниток (рис. 1.5 б), при невеликих значеннях кривизни напрямної, відбувається слабкий вигин. Залежність між моментом  $M_i$ , що вигинає, і кривизною  $D_o$  носить лінійний характер (пряма 1). Збільшення кривизни осі нитки при її вигині приводить до зростання значення моменту, що вигинає, в зоні пружно пластичності (крива 2). При подальшому збільшенні кривизни частина роботи витрачається на здійснення пластичної деформації. Тут необхідно відзначити, що комплексні нитки і пряжа при вигині поведуться відмінно від монониток. Збільшення скручування підвищує значення коефіцієнта жорсткості [35-38].

Аналогічні залежності виходять при експериментальному дослідженні скручування ниток. Момент  $M_k$  (рис. 1.5, в), що крутить, може змінюватися пропорційно куту повороту перетину нитки  $\psi$  (пряма 1) або ця залежність носитиме складніший характер (криві 2, 3).

При зминанні ниток нормальний тиск в зоні контакту  $N$  (рис. 1.5 г) може залежати від відносної деформації поперечника  $\delta$  як лінійно (пряма 1), так і по складнішому закону (криві 2, 3). Цілком очевидно, що при невеликому значенні натягу нитки і малій кривизні деформація поперечного перетину буде незначною. Для комплексних ниток і пряжі процес зминання перетину може носити і незворотній характер (за рахунок зміни положення окремих філаментов в перетині) на відміну від монониток.

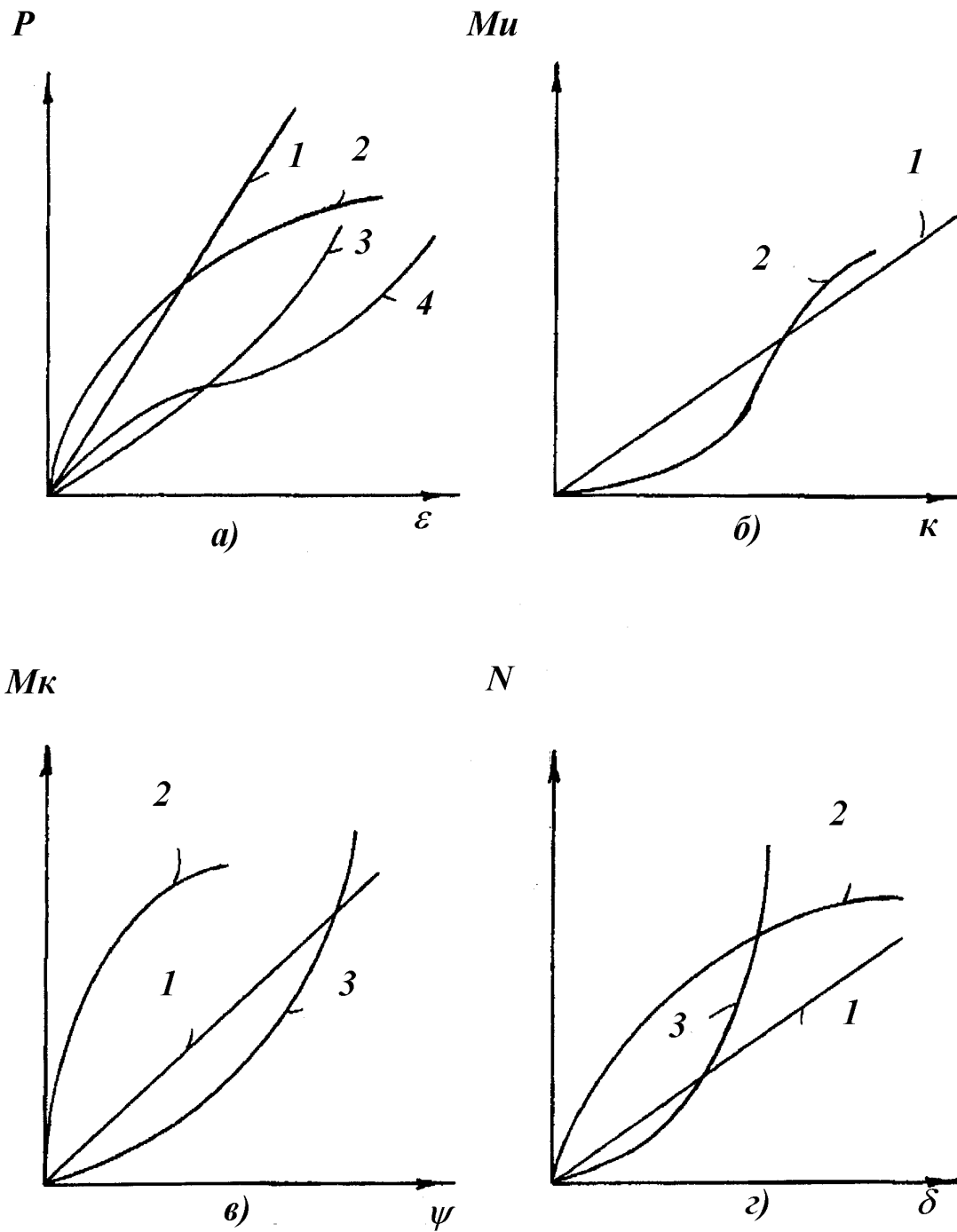


Рис.1.5. Залежності “навантаження - деформація” при розтягуванні, вигині, крутінні та зминанні

Аналізуючи представлені криві, можна зробити висновок про те, що залежність "навантаження - деформація" для різних схем вантаження реальних ниток може носити різний характер. У загальному випадку, для переважної більшості ниток, може застосовуватися модель пружно-в'язкого тіла, що лінійно-деформується

$$A = v\Sigma + \Delta\Sigma \quad (1.1)$$

або узагальнена модель пружно-в'язкого тіла, що лінійно-деформується

$$A + t_p A' = V\Sigma + V_0 t_p \Sigma', \quad (1.2)$$

де  $A$  - напруга, що виникає в нитці відповідно при розтягуванні, вигині, крученні і зминанні;  $A'$  - швидкість зміни відповідної напруги;  $V$  - коефіцієнт, що характеризує пружні властивості матеріалу (при розтягуванні  $V = E$  - поточний модуль жорсткості; при вигині  $V = B$  - поточний коефіцієнт жорсткості; при крученні  $V = C$  - поточний коефіцієнт крутильної жорсткості; при зминанні  $V = E_I$  - поточний модуль жорсткості);  $\Sigma, \Sigma'$  - відносна деформація і швидкість зміни останньої для відповідних геометричних параметрів (при розтягуванні  $\Sigma = \varepsilon, \Sigma' = \varepsilon'$  - зміна довжини осі нитки; при вигині  $\Sigma = K, \Sigma' = K'$  - зміна кривизни осі нитки; при крученні  $\Sigma = D, \Sigma' = D'$  - зміна геометричного і деформаційного скручування нитки; при зминанні  $\Sigma = \delta, \Sigma' = \delta'$  - зміна величини поперечного перетину ниток);  $t_p$  - час релаксації відповідної напруги;  $V_0$  - миттєвий модуль пружності;  $\Delta$  - поточне значення коефіцієнтів, що визначають в'язкі властивості матеріалу при кожному конкретному випадку навантаження.

Очевидно, що, помноживши рівняння (1.1) або (1.2) на відповідне значення або площі поперечного перетину нитки, або площі контакту з направляючою і тому подібне, можна отримати залежність зміни натягу нитки, моментів, що вигинають і крутять, сили деформації перетину як функції часу [1,10].

Необхідно відзначити, що нелінійну залежність "навантаження-деформація" зручно представляти у вигляді функціональних рядів, обмежуючись певним числом членів ряду.

Якщо в довільному перетині реальної нитки всі внутрішні сили і вектори моментів спроектувати на осі натурального тригранника, то на дотичну спроектується вектора натягу  $P$  і моменту  $M_k$ , що крутить, на нормаль - момент що вигинає  $M_{u2}$  і перерізуюча сила  $Q_2$ , на бінормаль - момент що вигинає  $M_{u3}$  і перерізуюча сила  $Q_3$ , ( $\vec{M}_u = \vec{M}_{u2} + \vec{M}_{u3}$  ,  $\vec{Q} = \vec{Q}_2 + \vec{Q}_3$ ).

Якщо у виразі (1.1) вважати, що коефіцієнт  $A$ , що характеризує в'язкі властивості матеріалу, рівний нулю, то отримаємо модель пружного тіла.

Залежно від значень  $V$ , який характеризує пружні властивості матеріалу у формулах (1.1) і (1.2), можна при наближенні його до нуля, отримати ідеально гнучкі на вигин і крутіння, що не чинять опір розтягуванню нитки. При збільшенні  $V$  відбувається зростання жорсткості. Очевидно, що значення даних коефіцієнтів визначається їх структурою.

Як наголошувалося вище, реальні нитки володіють фізико-механичними властивостями, про які вже згадувалося. Для конкретних розрахунків, при побудові ниток-моделей, можна не враховувати деякі властивості зважаючи на незначні значення відповідної напруги або сил. Так, для більшості текстильних ниток, з урахуванням умов їх переробки на технологічному устаткуванні, можна нехтувати розтягуванням їх осі. Помилка при цьому не перевищуватиме 5% [35-37]. Більшість комплексних ниток і пряжі невисокого скручування можна вважати абсолютно гнучкими при вигині і крутінні. Мононитки і сталевий дріт можуть вважатися немнучкими в зоні контакту з направляючою поверхнею.

При побудові моделі нитки I і II модифікації по фізико - механічним властивостях необхідно враховувати реальні умови взаємодії нитки з направляючими, конкретну схему силового вантаження. Виходячи з цього, моделі будь-якої модифікації приписуються ті або інші характеристики. Побудова конкретної моделі вимагає значення фізико-механических характеристик реальної нитки. Різні поєднання з таких основних характеристик як розтяжність (не розтяжність), опір вигину і крученню, зминання (незминання), анізотропія (ізотропія) тертя, рівномірний (нерівномірний) розподіл маси по довжині нитки, різні (постійні) геометричні розміри перетину нитки, її поточну вагу (або нитка вважається невагомою) дозволяють отримати до 125970 різних моделей нитки. Найчастіше, при описі технологічних процесів, використовують 10-20 моделей. У таблиці 1.1 приведені найосновніші з них.

Розтягуваність характеризується коефіцієнтом

$$f = \frac{\partial S}{\partial S_0} = 1 + \varepsilon,$$

(для нитки що не розтягується  $\varepsilon = 0$  і  $f = 1$ ); зминання – коефіцієнтом

$$\delta = \frac{r - r_x}{r},$$

(для нитки що не зминається  $r = r_x$  і  $\delta = 0$ ).

Через  $R_0$  позначимо головний вектор внутрішніх сил, приведений до центру тяжіння довільного перетину.

Проведена докладна класифікація реальних ниток і моделей I і II модифікацій дозволяє сформулювати основні допущення при побудові останніх:

- 1) нитками-моделями (надалі просто нитки) є однорідні тіла циліндричної, еліптичної, стадіону подібної форми, або механічні системи, що складаються з окремих циліндричних тіл, замінюючи філаменти (для моделей I модифікації);

Таблиця 1.1.Класифікація ниток по їх фізико – механічних властивостях

№ п/п	Геометричні параметри	Силові чинники	Характеристика нитки
1.	$f \neq 1, \delta = 0$	$R_0 \neq 0, M_k = 0, M_u = 0$	Розтяжна, немнучка, ідеально гнучка нитка
2.	$f \neq 1, \delta = 0$	$R_0 \neq 0, M_k \neq 0, M_u = 0$	Розтяжна, немнучка, жорстка на кручення нитка
3.	$f \neq 1, \delta = 0$	$R_0 \neq 0, M_k = 0, M_u \neq 0$	Розтяжна, немнучка, жорстка на вигин нитка
4.	$f \neq 1, \delta = 0$	$R_0 \neq 0, M_k \neq 0, M_u \neq 0$	Розтяжна, немнучка, жорстка на вигин і кручення нитка
5.	$f = 1, \delta \neq 0$	$R_0 \neq 0, M_k = 0, M_u = 0$	Нерозтяжна, мнучка, ідеально гнучка нитка
6.	$f = 1, \delta \neq 0$	$R_0 \neq 0, M_k \neq 0, M_u = 0$	Нерозтяжна, мнучка, жорстка на кручення нитка
7.	$f = 1, \delta \neq 0$	$R_0 \neq 0, M_k = 0, M_u \neq 0$	Нерозтяжна, мнучка, жорстка на вигин нитка
8.	$f = 1, \delta \neq 0$	$R_0 \neq 0, M_k \neq 0, M_u \neq 0$	Нерозтяжна, мнучка, жорстка на вигин і кручення нитка
9.	$f \neq 1, \delta \neq 0$	$R_0 \neq 0, M_k = 0, M_u = 0$	Розтяжна, мнучка, ідеально гнучка нитка
10.	$f \neq 1, \delta \neq 0$	$R_0 \neq 0, M_k \neq 0, M_u = 0$	Розтяжна, мнучка, жорстка на кручення нитка
11.	$f \neq 1, \delta \neq 0$	$R_0 \neq 0, M_k \neq 0, M_u \neq 0$	Розтяжна, мнучка, жорстка на вигин і кручення нитка
12.	$f \neq 1, \delta \neq 0$	$R_0 \neq 0, M_k = 0, M_u \neq 0$	Розтяжна, мнучка, жорстка на вигин нитка

- 2) нитка може деформуватися як в подовжньому, так і в поперечному напрямках (змінатися);
- 3) анізотропія тертя ниток може виявлятися як при подовжньому ковзанні по напрямній, так і при поперечному;
- 4) матеріал нитки заповнює весь передбачуваний об'єм без порожнеч, рівномірно (у разі нерівномірного розподілу матеріалу по довжині нитки задається закон  $m=m(S)$ );
- 5) при деформації нитки нормальний перетин залишається плоским (депланацією перетинів нехтують);
- 6) складний напружено-деформований стан нитки розглядають по спрощених залежностях для простих видів вигину, кручення, зминання, розтягування;
- 7) для моделей II модифікації нехтуємо тертям в шарнірних парах, між рідиною і стінками направляючих (рис.1.3, в, г, д).

Дані допущення не є вичерпними і у кожному конкретному випадку, при необхідності, вноситимуться додаткові, що відповідним чином аргументуватиметься.

## 1.2. Визначення геометричних характеристик осі м'ятих ниток

Напруга, що виникає в довільному перетині нитки, можна привести до головного вектора  $P_0$  і головному моменту  $M_0$ , які прикладені в центрі тяжіння перетину. Сукупність нескінченної кількості даних точок для кожного з перетинів утворюють вісь нитки [1]. В процесі переробки на технологічному устаткуванні при взаємодії з направляючими відбувається зміна форми осі нитки [1, 2, 18-31], що приводить до зміни кривизни і кручення останньої. При зминанні відбувається деформація поперечного перетину ниток, що викликає зсув центру тяжіння перетину. Отже, в зоні контакту з направляючою відбувається зміна положення осі нитки по



відношенню до лінії, що визначає форму осі абсолютно жорсткої на зминання нитки. Таке переміщення приводить до зростання або зменшення радіусу кривизни осі нитки залежно від фізико - механічних характеристик направляючої поверхні. Крім того, при складанні диференціальних рівнянь рівноваги нескінченно малого елемента нитки що зминається на направляючій поверхні, необхідно знати закон зміни кривизни осі нитки залежно від деформації перетину.

Для дослідження, як модель нитки, вибираємо нитку-модель I модифікації. Вважатимемо, що матеріал нитки заповнює весь об'єм без порожнеч, рівномірно і нитка може розтягуватися [1, 10]. У початковий момент часу нитка не деформована, тому поперечний перетин може мати круглу, еліптичну і стадіону подібну форму.

Для опису форми осі м'ятої нитки необхідно ввести три координатні системи [1, 14-31]. Дві системи рухомі: натурального тригранника  $\tau^*v^*\beta^*$  і головного тригранника  $\tau^*n^*b^*$ . Нерухома координатна система  $O_1XYZ$  утворюється перетином осей  $X, Y, Z$ , напрям яких визначається одиничними ортами  $i, j, k$  [1]. Дотична вісь  $\tau^*$  натурального тригранника отримується шляхом перетину випрямляючої і дотичної площин [1,10]. Нормальна вісь  $v^*$  прямує до центру кривизни і отримується шляхом перетину нормальної і дотичної площин. Бінормаль  $\beta^*$  отримується шляхом перетину нормальної і випрямляючої площин. Нормальна вісь  $n^*$  головного тригранника  $\tau^*n^*b^*$  прямує по нормалі до направляючої поверхні в даній точці [1-2]. У загальному випадку нормаль  $n^*$  головного тригранника і нормаль  $v^*$  натурального тригранника не співпадають. Кут між ними  $\psi$  називається кутом Сен-Венана [1]. Такий же кут буде між бінормальями головного і натурального тригранників. Положення довільної точки  $A^*$  (див. рис. 1.6) осі нитки можна визначати лагранжевою (фізичною) дуговою

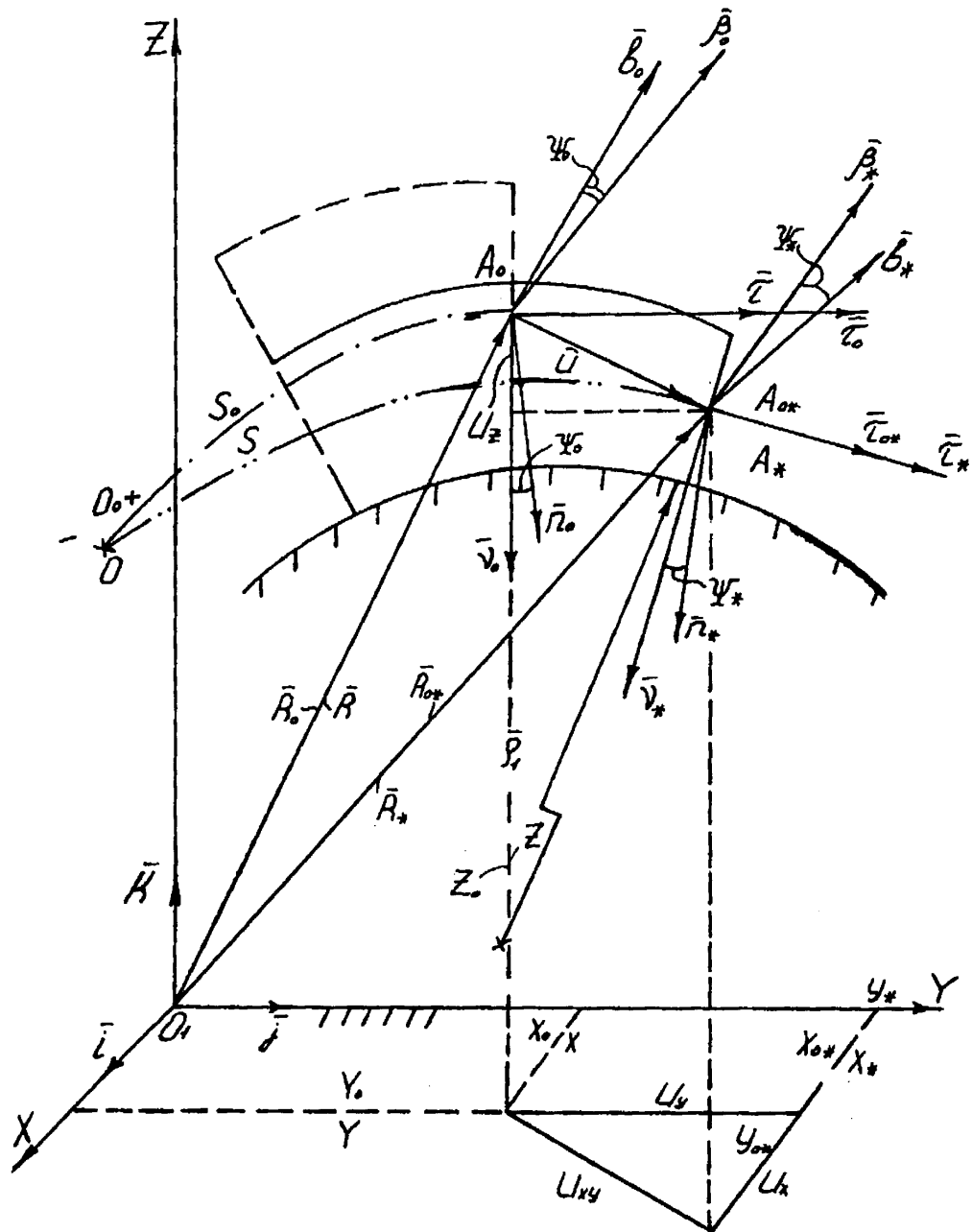


Рис.1.6. Визначення геометричних характеристик форми осі нитки

координатою  $S_0$  і ейлеровою (геометричною) дуговою координатою  $S$  [2]. Зв'язок між ними можна представити у вигляді

$$\partial S = (1 + \varepsilon) \partial S_0, \quad (1.3)$$

де  $\varepsilon$  - відносна деформація при розтягуванні.

Положення довільної точки на осі нитки визначається за допомогою відповідних радіус-векторів (див. рис. 1.6), проведених з початку нерухомої координатної системи. Вважатимемо, що точки відліку лагранжевої і ейлерової координат  $\theta$  і  $\theta_0$  суміщені. Положення точок  $A_0$  і  $A$  осі недеформованої нитки визначатиметься координатами  $S_0$  і  $S$ , причому, для даних умов  $(S=S_0)_{t=0}$ .

Радіус-вектор  $R_0$  визначає положення точки  $A_0$  на  $S_0$  - лінії щодо координатної системи  $O_1XYZ$  [1]. Радіус-вектор  $R$  (див. рис. 1.6) визначає положення точки  $A_0$  на  $S$ -лінії щодо нерухомої координатної системи. В результаті при змінанні нитки точка  $A(A_0)$  переміститься в нове положення. Новий радіус-вектор  $R_0^*$  визначить положення точки  $A_0^*$  на  $S_0$ -лінії, а радіус-вектор  $R^*$  - положення точки  $A^*$  на  $S$ -лінії. Вектор між точками  $A$  і  $A^*$  позначимо  $U$ . Цей вектор характеризує зсув точок за рахунок деформації перетину нитки.

Векторні вирази для визначення положення точок  $A_0^*$  в лагранжевих координатах  $S_0, t$  і  $A^*$  в ейлерових координатах  $S, t$  матимуть вигляд

$$\vec{R}_{0*} = \vec{R}_0 + \vec{U}, \quad \vec{R}_* = \vec{R} + \vec{U}. \quad (1.4)$$

Диференціюючи рівняння (1.4) по відповідних дугових координатах, отримаємо

$$\frac{\partial \vec{R}_{0*}}{\partial S_0} = \frac{\partial \vec{R}_0}{\partial S_0} + \frac{\partial \vec{U}}{\partial S_0}, \quad \frac{\partial \vec{R}_*}{\partial S} = \frac{\partial \vec{R}}{\partial S} + \frac{\partial \vec{U}}{\partial S},$$

де  $\frac{\partial \vec{R}_{0*}}{\partial S_0} = \vec{\tau}_{0*}$  - одиничний орт дотичної рухомого натурального тригранника в лагранжевих координатах  $S_0, t$ ;

$\frac{\partial \vec{R}_0}{\partial S_0} = \vec{\tau}_0$  - одиничний орт дотичної в точці  $A_0$  недеформованої осі нитки;

$\frac{\partial \vec{R}^*}{\partial S} = \vec{\tau}^*$  - одиничний орт дотичної рухомого натурального тригранника в ейлерових координатах  $S, t$ ;

$\frac{\partial \vec{R}}{\partial S} = \vec{\tau}$  - одиничний орт дотичної в крапці  $A$  недеформованій осі нитки.

Отримані рівняння дозволяють встановити залежність між одиничними ортами в різних системах координатних осей. З урахуванням сказаного, останні векторні рівняння приймуть вигляд

$$\vec{\tau}_{0*} = \vec{\tau}_0 + \frac{\partial \vec{U}}{\partial S_0}, \quad \vec{\tau}^* = \vec{\tau} + \frac{\partial \vec{U}}{\partial S}. \quad (1.5)$$

З урахуванням виразу (1.3) зв'язок між дотичними ортами в лагранжевих і ейлерових координатах матиме вигляд

$$\vec{\tau}^* = (1 + \varepsilon) \vec{\tau}_{0*}, \quad \vec{\tau} = (1 + \varepsilon) \vec{\tau}_0. \quad (1.6)$$

Вирішуючи спільно рівняння (1.5) і (1.6), отримаємо

$$\vec{\tau}_{0*} = \frac{\vec{\tau}}{(1 + \varepsilon)} + \frac{1}{(1 + \varepsilon)} \frac{\partial \vec{U}}{\partial S}, \quad \vec{\tau}^* = (1 + \varepsilon) \vec{\tau}_0 + (1 + \varepsilon) \frac{\partial \vec{U}}{\partial S_0}.$$

У проекції на осі нерухомої координатної системи  $O_1XYZ$  виразу для  $\tau_0$  і  $\tau$ , з урахуванням (1.4), можна представити в наступній формі (див. рис. 1.6)

$$\begin{aligned} \tau_{0x} &= \frac{\partial x_0}{\partial S_0} = \cos(\vec{\tau}_0; \vec{i}); \tau_x = \frac{\partial x_0}{\partial S} = \cos(\vec{\tau}; \vec{i}); \\ \tau_{0y} &= \frac{\partial y_0}{\partial S_0} = \cos(\vec{\tau}_0; \vec{j}); \tau_y = \frac{\partial y_0}{\partial S} = \cos(\vec{\tau}; \vec{j}); \\ \tau_{0z} &= \frac{\partial z_0}{\partial S_0} = \cos(\vec{\tau}_0; \vec{k}); \tau_z = \frac{\partial z_0}{\partial S} = \cos(\vec{\tau}; \vec{k}). \end{aligned} \quad (1.7)$$

Відповідно, проектуємо одиничні орты  $\tau_0$  і  $\tau^*$  на осі нерухомої координатної системи, з урахуванням виразу (1.4) можна представити проекції в наступній формі (див. рис. 1.6)

$$\begin{aligned}
 \tau_{0^*x} &= \frac{\partial x_{0^*}}{\partial S_0} = \frac{\partial(x_0 + U_x)}{\partial S_0} = \frac{\partial x_0}{\partial S_0} + \frac{\partial U_x}{\partial S_0} = \cos(\vec{\tau}_{0^*}; \vec{i}); \\
 \tau_{0^*y} &= \frac{\partial y_{0^*}}{\partial S_0} = \frac{\partial(y_0 + U_y)}{\partial S_0} = \frac{\partial y_0}{\partial S_0} + \frac{\partial U_y}{\partial S_0} = \cos(\vec{\tau}_{0^*}; \vec{j}); \\
 \tau_{0^*z} &= \frac{\partial z_{0^*}}{\partial S_0} = \frac{\partial(z_0 + U_z)}{\partial S_0} = \frac{\partial z_0}{\partial S_0} + \frac{\partial U_z}{\partial S_0} = \cos(\vec{\tau}_{0^*}; \vec{k}); \\
 \tau_{*x} &= \frac{\partial x^*}{\partial S} = \frac{\partial(x + U_x)}{\partial S} = \frac{\partial x}{\partial S} + \frac{\partial U_x}{\partial S} = \cos(\vec{\tau}^*; \vec{i}); \\
 \tau_{*y} &= \frac{\partial y^*}{\partial S} = \frac{\partial(y + U_y)}{\partial S} = \frac{\partial y}{\partial S} + \frac{\partial U_y}{\partial S} = \cos(\vec{\tau}^*; \vec{j}); \\
 \tau_{*z} &= \frac{\partial z^*}{\partial S} = \frac{\partial(z + U_z)}{\partial S} = \frac{\partial z}{\partial S} + \frac{\partial U_z}{\partial S} = \cos(\vec{\tau}^*; \vec{k}).
 \end{aligned} \tag{1.8}$$

Враховуючи, що вектори  $\tau\theta$ ,  $\tau$  і  $\tau\theta^*$ ,  $\tau^*$  є одиничними ортами, модуль яких рівний одиниці, з урахуванням (1.7) і (1.8), знайдемо зв'язок між відповідними проекціями

$$\begin{aligned}
 (\partial x_0)^2 + (\partial y_0)^2 + (\partial z_0)^2 &= \frac{(\partial x)^2 + (\partial y)^2 + (\partial z)^2}{(1 + \varepsilon)^2}; \\
 (\partial x_0 + \partial U_x)^2 + (\partial y_0 + \partial U_y)^2 + (\partial z_0 + \partial U_z)^2 &= \frac{(\partial x + \partial U_x)^2 + (\partial y + \partial U_y)^2 + (\partial z + \partial U_z)^2}{(1 + \varepsilon)^2}.
 \end{aligned}$$

Для визначення залежності, що визначає одиничний орт головної нормалі залежно від вибору дугових координат, диференціюючи рівняння (1.5) ще раз по відповідних лагранжевих  $S_0$  і ейлерових координатах  $S$ , отримаємо

$$\frac{\partial \vec{\tau}_{0^*}}{\partial S_0} = \frac{\partial \vec{\tau}_0}{\partial S_0} + \frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial S_0^2}; \quad \frac{\partial \vec{\tau}^*}{\partial S} = \frac{\partial \vec{\tau}}{\partial S} + \frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial S^2}. \tag{1.9}$$

У векторних рівняннях (1.9) перші похідні від відповідних одиничних ортів дотичних по дугових координатах рівні

$$\frac{\partial \vec{\tau}_{0^*}}{\partial S_0} = \frac{\vec{v}_{0^*}}{\rho^*}; \quad \frac{\partial \vec{\tau}_0}{\partial S_0} = \frac{\vec{v}_0}{\rho_{0^*}}; \quad \frac{\partial \vec{\tau}^*}{\partial S} = \frac{\vec{v}^*}{\rho_1}; \quad \frac{\partial \vec{\tau}}{\partial S} = \frac{\vec{v}}{\rho_0}, \tag{1.10}$$

де  $\rho^*$ ,  $\rho_{0^*}$  - відповідно радіуси кривизни осі нитки в точках  $A0^*$ ,  $A0$  ;

$\rho_1$ ,  $\rho_0$  - відповідно радіуси кривизни осі нитки (для ейлерової координати  $S$ ) в точках  $A$  і  $A^*$ .

Тоді, вирішуючи спільно рівняння (1.9) і (1.10), матимемо

$$\vec{v}_{0*} = \vec{v}_0 \frac{\rho_*}{\rho_{0*}} + \rho_* \frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial S_0^2}; \quad \vec{v}_* = \vec{v} \frac{\rho_1}{\rho_0} + \rho_1 \frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial S^2}. \quad (1.11)$$

Використовуючи відомі співвідношення проф. Мігушова І.І. для одиничних ортов нормалі

$$\vec{v}_* = (1 + \varepsilon) \vec{v}_{0*} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial S_0} \rho_* \vec{\tau}_{0*}; \quad \vec{v} = (1 + \varepsilon) \vec{v}_0 + \frac{\partial \varepsilon}{\partial S_0} \rho_0 \vec{\tau}_0, \quad (1.12)$$

отримаємо співвідношення між одиничними ортами нормалі для лагранжевих і ейлерових координат у відповідних точках

$$\vec{v}_* = (1 + \varepsilon) \vec{v}_0 \frac{\rho_*}{\rho_{0*}} + (1 + \varepsilon) \rho_* \frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial S_0^2} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial S_0} \rho_* \vec{\tau}_{0*}. \quad (1.13)$$

У проекції на осі нерухомої координатної системи вектори одиничних ортов  $\mathbf{v}0$  і  $\mathbf{v}$  приймуть вигляд (з урахуванням (1.7))

$$\begin{aligned} v_{0x} &= \rho_{0*} \frac{\partial^2 x_0}{\partial S_0^2} = \cos(\vec{v}_0; \vec{i}); \quad v_x = \rho_0 \frac{\partial^2 x_0}{\partial S^2} = \cos(\vec{v}; \vec{i}); \\ v_{0y} &= \rho_{0*} \frac{\partial^2 y_0}{\partial S_0^2} = \cos(\vec{v}_0; \vec{j}); \quad v_y = \rho_0 \frac{\partial^2 y_0}{\partial S^2} = \cos(\vec{v}; \vec{j}); \\ v_{0z} &= \rho_{0*} \frac{\partial^2 z_0}{\partial S_0^2} = \cos(\vec{v}_0; \vec{k}); \quad v_z = \rho_0 \frac{\partial^2 z}{\partial S^2} = \cos(\vec{v}; \vec{k}). \end{aligned} \quad (1.14)$$

Для одиничних ортов  $\mathbf{v}0^*$ ,  $\mathbf{v}^*$

$$\begin{aligned} v_{0*x} &= \rho_* \frac{\partial^2 x_{0*}}{\partial S_0^2} = \cos(\vec{v}_{0*}; \vec{i}); \quad v_{*x} = \rho_1 \frac{\partial^2 x_*}{\partial S^2} = \cos(\vec{v}_*; \vec{i}); \\ v_{0*y} &= \rho_* \frac{\partial^2 y_{0*}}{\partial S_0^2} = \cos(\vec{v}_{0*}; \vec{j}); \quad v_{*y} = \rho_1 \frac{\partial^2 y_*}{\partial S^2} = \cos(\vec{v}_*; \vec{j}); \\ v_{0*z} &= \rho_* \frac{\partial^2 z_{0*}}{\partial S_0^2} = \cos(\vec{v}_{0*}; \vec{k}); \quad v_{*z} = \rho_1 \frac{\partial^2 z_*}{\partial S^2} = \cos(\vec{v}_*; \vec{k}). \end{aligned} \quad (1.15)$$

Вирішуючи спільно системи рівнянь (1.14) і (1.15), можна отримати залежності між відповідними проекціями одиничних ортов нормалі на координатні осі нерухомої системи  $\mathbf{0}_1XYZ$ .

Для визначення виразів між одиничними ортами бінормалі, скористаємося наступною системою векторних рівнянь

$$\begin{aligned}\vec{\beta}_{0*} &= \vec{\tau}_{0*} \times \vec{v}_{0*}; & \vec{\beta}_* &= \vec{\tau}_* \times \vec{v}_*; \\ \vec{\beta}_0 &= \vec{\tau}_0 \times \vec{v}_0; & \vec{\beta} &= \vec{\tau} \times \vec{v}.\end{aligned}\quad (1.16)$$

Тоді, з урахуванням (1.5), (1.10) і (1.11) отримаємо

$$\begin{aligned}\vec{\beta}_{0*} &= \vec{\beta}_0 \frac{\rho_*}{\rho_{0*}} + \frac{\partial \bar{U}}{\partial S_0} \times \vec{v}_0 \frac{\rho_*}{\rho_{0*}} + \vec{\tau}_0 \times \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial S_0^2} \rho_* + \frac{\partial \bar{U}}{\partial S_0} \times \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial S_0^2} \rho_*; \\ \vec{\beta}_* &= \vec{\beta} \frac{\rho_1}{\rho_0} + \frac{\partial \bar{U}}{\partial S} \times \vec{v} \frac{\rho_1}{\rho_0} + \vec{\tau} \times \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial S^2} \rho_1 + \frac{\partial \bar{U}}{\partial S} \times \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial S^2} \rho_1.\end{aligned}\quad (1.17)$$

Залежність між одиничними ортами бінормалі у разі лагранжевих і ейлерових координат має вигляд

$$\vec{\beta}_* = (1 + \varepsilon)^2 \vec{\beta}_{0*},$$

або, з урахуванням (1.17)

$$\vec{\beta}_* = (1 + \varepsilon)^2 \left[ \vec{\beta}_0 \frac{\rho_*}{\rho_{0*}} + \frac{\partial \bar{U}}{\partial S_0} \times \vec{v}_0 \frac{\rho_*}{\rho_{0*}} + \vec{\tau}_0 \times \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial S_0^2} \rho_* + \frac{\partial \bar{U}}{\partial S_0} \times \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial S_0^2} \rho_* \right]. \quad (1.18)$$

Враховуючи, що деформація нитки в поперечному напрямі відбувається при значно менших навантаженнях, чим деформація в подовжньому напрямі [1,2,8,10] можна рахувати  $\varepsilon = 0$ . Тоді, при фіксованому початку відліку (точки  $\mathbf{0}_0$  і  $\mathbf{0}$  співпадають) лагранжевої  $S_0$  і ейлерової  $S$  дугових координат  $dS = dS_0$ .

Вирази для одиничних ортів натуральних тригранників приймуть вигляд

$$\begin{aligned}\vec{\tau}_* &= \vec{\tau}_{0*}; & \vec{\tau} &= \vec{\tau}_0; & \vec{v}_{0*} &= \vec{v}_*; & \vec{v}_0 &= \vec{v}; & \vec{\beta}_{0*} &= \vec{\beta}_*; & \vec{\beta}_0 &= \vec{\beta}; \\ \vec{\tau}_* &= \vec{\tau}_{0*} = \vec{\tau}_0 + \frac{\partial \bar{U}}{\partial S}; & \vec{v}_* &= \vec{v}_{0*} = \vec{v}_0 \frac{\rho_1}{\rho_0} + \rho_1 \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial S^2}; \\ \vec{\beta}_* &= \vec{\beta}_0 \frac{\rho_1}{\rho_0} + \frac{\partial \bar{U}}{\partial S} \times \vec{v}_0 \frac{\rho_1}{\rho_0} + \vec{\tau}_0 \times \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial S^2} \rho_1 + \frac{\partial \bar{U}}{\partial S} \times \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial S^2} \rho_1.\end{aligned}\quad (1.19)$$

Якщо в останній системі рівнянь покласти  $\mathbf{U} = \mathbf{0}$  (нитка не зминається в зоні контакту), то отримаємо очевидну тотожність для немнучкої, нерозтяжної нитки, що взаємодіє з направляючою поверхнею

$$\vec{\tau}_* = \vec{\tau}_0; \quad \vec{v}_* = \vec{v}_0; \quad \vec{\beta}_* = \vec{\beta}_0.$$

Перейдемо до визначення кривизни осі зминаємої нитки, для чого одиничні орти головного тригранника в точці  $A^*$  представимо у вигляді (див. рис. 1.7)

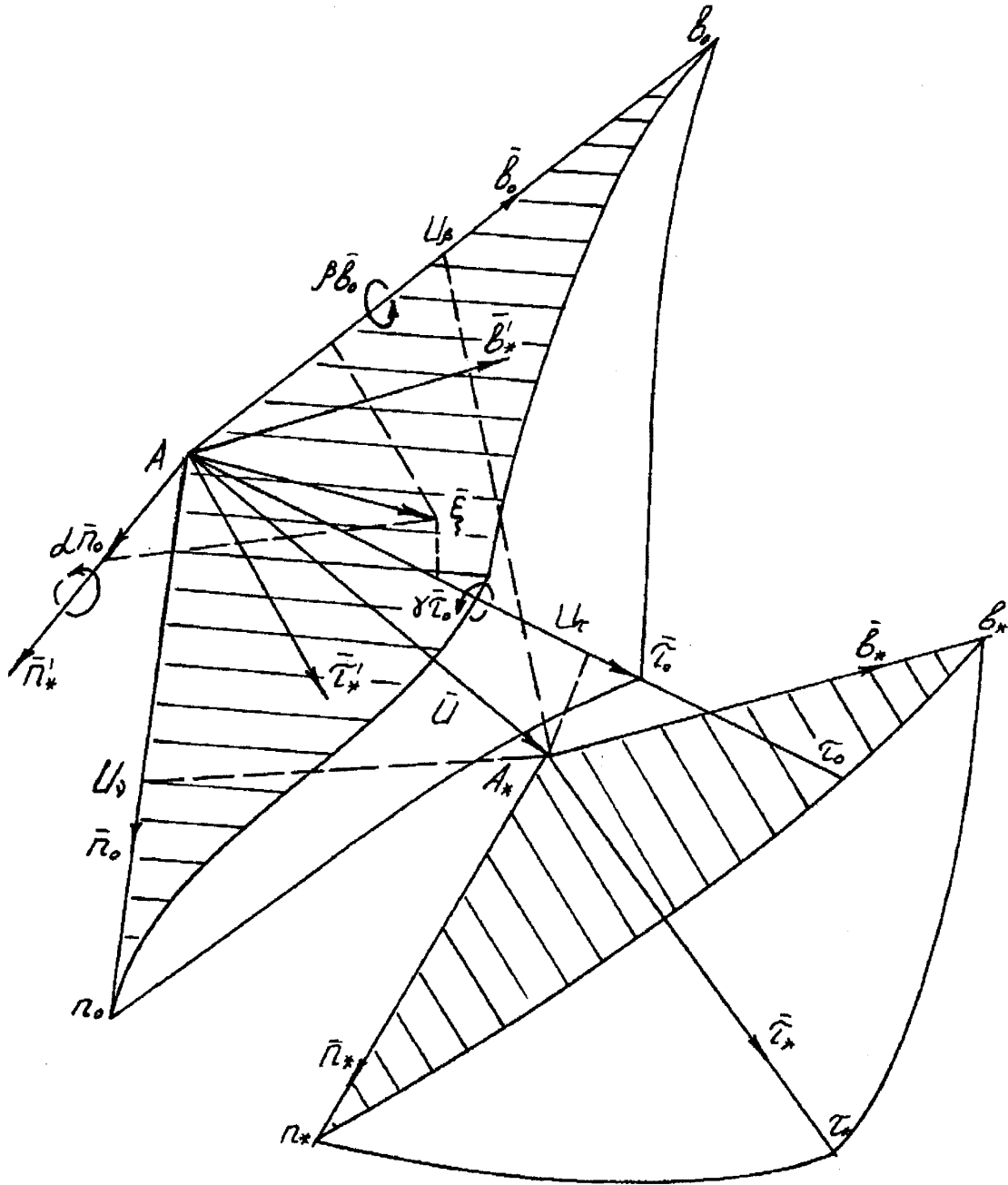


Рис.1.7. Співвідношення між вектором переміщення точок вісі нитки та вектором обертуну натурального тригранника



$$\begin{aligned}\vec{\tau}_* &= \vec{\tau}_0 - \alpha \vec{b}_0 + \beta \vec{n}_0; \\ \vec{n}_* &= \vec{n}_0 - \beta \vec{\tau}_0 + \gamma \vec{b}_0; \\ \vec{b}_* &= \vec{b}_0 + \alpha \vec{\tau}_0 - \gamma \vec{n}_0,\end{aligned}\tag{1.20}$$

де  $\alpha, \beta, \gamma$  - проекції вектора повороту  $\xi$  на осі головного тригранника  $A\tau_0 n_0 b_0$ .

Вектор  $\vec{U}$  переміщення точки осі нитки, зйлеровою координатою  $S$ , що характеризується, представимо у вигляді проекцій

$$\vec{U} = U_\tau \vec{\tau}_0 + U_\nu \vec{n}_0 + U_\beta \vec{b}_0,\tag{1.21}$$

де  $U_\tau, U_\nu, U_\beta$  - проекції вектора  $\vec{U}$  на осі головного тригранника.

Вирішуючи спільно сьоме рівняння системи (1.19) і (1.20), отримаємо

$$\vec{\tau}_* = \vec{\tau}_0 + \frac{\partial U_\tau}{\partial S} \vec{\tau}_0 + \frac{\partial U_\nu}{\partial S} \vec{n}_0 + \frac{\partial U_\beta}{\partial S} \vec{b}_0 + U_\tau \frac{\partial \vec{\tau}_0}{\partial S} + U_\nu \frac{\partial \vec{n}_0}{\partial S} + U_\beta \frac{\partial \vec{b}_0}{\partial S}.\tag{1.22}$$

Перші похідні одиничних ортов по дуговій координаті можна представити як векторні твори

$$\frac{\partial \vec{\tau}_0}{\partial S} = \vec{\Omega}_0 \times \vec{\tau}_0; \quad \frac{\partial \vec{n}_0}{\partial S} = \vec{\Omega}_0 \times \vec{n}_0; \quad \frac{\partial \vec{b}_0}{\partial S} = \vec{\Omega}_0 \times \vec{b}_0,\tag{1.23}$$

де  $\vec{\Omega}_0$  - вектор повної кривизни, величина якого може бути визначена через головні компоненти кривизни осі нитки в довільній крапці (див. рис. 1.6)

$$\vec{U} = U_\tau \vec{\tau}_0 + U_\nu \vec{n}_0 + U_\beta \vec{b}_0,\tag{1.24}$$

де

$$q_0 = \frac{\cos \Psi_0}{\rho_0}; \quad p_0 = \frac{\sin \Psi_0}{\rho_0}; \quad r_0 = \frac{1}{\rho_{01}} + \frac{\partial \Psi_0}{\partial S};\tag{1.25}$$

$\rho_{01}$  - радіус кривизни геометричного кручення осі нитки;  $\Psi_0$  - кут Сен-Венана.

Вирішуємо спільно (1.23) і (1.24)

$$\frac{\partial \vec{\tau}_0}{\partial S} = q_0 \vec{n}_0 - p_0 \vec{b}_0; \quad \frac{\partial \vec{n}_0}{\partial S} = r_0 \vec{b}_0 - q_0 \vec{\tau}_0; \quad \frac{\partial \vec{b}_0}{\partial S} = p_0 \vec{\tau}_0 - r_0 \vec{n}_0.$$

Підставляючи отриманий результат у вираз (1.22), отримаємо

$$\begin{aligned}\vec{\tau}_* &= (1 + \frac{\partial U_\tau}{\partial S} - q_0 U_\nu + p_0 U_\beta) \vec{\tau}_0 + (\frac{\partial U_\nu}{\partial S} + q_0 U_\tau - r_0 U_\beta) \vec{n}_0 + \\ &+ (\frac{\partial U_\beta}{\partial S} - p_0 U_\tau + r_0 U_\nu) \vec{b}_0\end{aligned}\tag{1.26}$$

Прирівнюючи праві частини рівності (1.26) і першого рівняння системи (1.20), спроектуємо отриманий вираз на осі головного тригранника, для чого послідовно скалярно помножимо його на одиничні орти  $\tau_0$ ,  $n_0$  і  $b_0$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_\tau}{\partial S} - q_0 U_v + p_0 U_\beta &= 0; \\ \frac{\partial U_v}{\partial S} + q_0 U_\tau - r_0 U_\beta &= \beta; \\ \frac{\partial U_\beta}{\partial S} - p_0 U_\tau + p_0 U_v &= -\alpha. \end{aligned} \quad (1.27)$$

Отримана система рівнянь (1.27) названа нами умовою на переміщеннях (по аналогії з умовами на швидкостях і прискореннях).

Продиференціюємо векторне рівняння (1.26) по дуговій координаті  $S$  (приймаємо кут Сен-Венана рівним нулю, тобто нормаль співпадає з головною нормаллю до поверхні)

$$\begin{aligned} \frac{\vec{n}_*}{\rho_1} &= \left( \frac{\partial^2 U_\tau}{\partial S^2} - q_0 \frac{\partial U_v}{\partial S} + p_0 \frac{\partial U_\beta}{\partial S} \right) \vec{\tau}_0 + \left( \frac{\partial U_\tau}{\partial S} - q_0 U_v + p_0 U_\beta \right) (q_0 \vec{n}_0 - p_0 \vec{b}_0) + \\ &+ \left( \frac{\partial^2 U_v}{\partial S^2} - q_0 \frac{\partial U_\tau}{\partial S} + r_0 \frac{\partial U_\beta}{\partial S} \right) \vec{n}_0 + \left( \frac{\partial U_v}{\partial S} + q_0 U_\tau - r_0 U_\beta \right) (r_0 \vec{b}_0 - q_0 \vec{\tau}_0) + \\ &+ \left( \frac{\partial^2 U_\beta}{\partial S^2} - p_0 \frac{\partial U_\tau}{\partial S} + r_0 \frac{\partial U_v}{\partial S} \right) \vec{b}_0 + \left( \frac{\partial U_\beta}{\partial S} - p_0 U_\tau + p_0 U_v \right) (p_0 \vec{\tau}_0 - r_0 \vec{n}_0). \end{aligned} \quad (1.28)$$

Прирівнюємо ліві частини отриманого рівняння (1.28) і другого рівняння системи (1.20). Скалярно умножаємо ліву і праву частини на одиничний орт  $n_0$

$$\frac{(\vec{n}_0 - \beta \vec{\tau}_0 + \gamma \vec{b}_0) \vec{n}_0}{\rho_1} = \frac{1}{\rho_1} = \frac{1}{\rho_0} + \frac{2\partial U_\tau}{\rho_0 \partial S} - \frac{2\partial U_\beta}{\rho_{01} \partial S} + \frac{\partial^2 U_v}{\partial S^2} - U_v \left( \frac{1}{\rho_0^2} + \frac{1}{\rho_{01}^2} \right). \quad (1.29)$$

Отриманий вираз визначає собою величину кривизни осі нитки з урахуванням деформації поперечного перетину в зоні контакту з направляючою. Аналіз отриманого виразу показує, що кривизна осі нитки складається з двох складових:  $\rho_0^{-1}$  - геометрична кривизна (без урахування змінання) і складова кривизни, обумовлена деформацією поперечного перетину нитки. На цю обставину звертав увагу проф. Мігушов І.І.[1].

Якщо нехтувати проекцією вектора  $\vec{U}$  на дотичну вісь ( $U\tau=0$ ) і вважати, що нитка розташовується в дотичній площині ( $U\beta=0$ ), то тоді

$$\frac{1}{\rho_1} = \frac{1}{\rho_0} + \frac{\partial^2 U_v}{\partial S^2} - \frac{U_v}{\rho_0^2}. \quad (1.30)$$

Для визначення радіусу кручення  $\rho^*I$  осі нитки скористаємося залежністю для головного компонента кривизни і кручення осі нитки, з урахуванням формул (1.25), отримаємо

$$\begin{aligned} q_1 &= q_0 + \frac{\partial \beta}{\partial S} - \rho_0 \gamma + r_0 \alpha; \\ p_1 &= p_0 + \frac{\partial \alpha}{\partial S} - r_0 \beta + q_0 \gamma; \\ r &= r_0 + \frac{\partial \gamma}{\partial S} - q_0 \alpha + p_0 \beta. \end{aligned} \quad (1.31)$$

Вирішуючи третє рівняння системи (1.31) сумісно з (1.25) і (1.27), матимемо

$$\frac{1}{\rho_{*1}} + \frac{\partial \Psi_*}{\partial S} = \frac{1}{\rho_{01}} + \frac{\partial \Psi_0}{\partial S} + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial U_\beta}{\partial S} - \frac{\sin \Psi_0}{\rho_0} U_\tau + \frac{U_v}{\rho_{01}} + U_v \frac{\partial \Psi_0}{\partial S} \right).$$

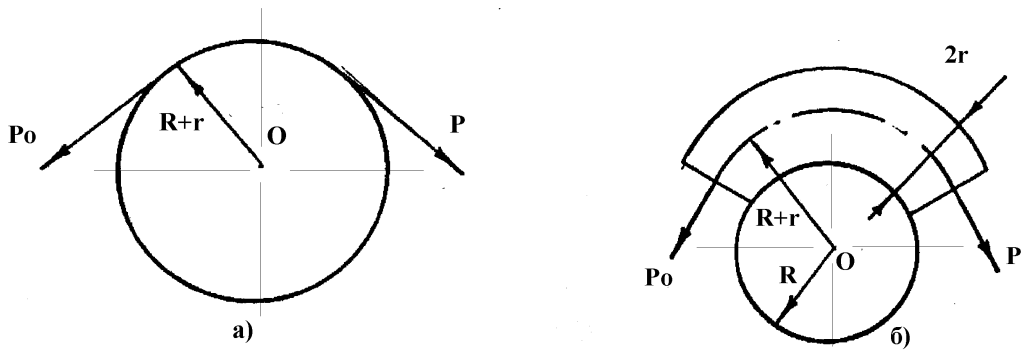
Якщо в останній рівності вважати кут Сен-Венана рівним нулю, тоді

$$\frac{1}{\rho_{*1}} = \frac{1}{\rho_{01}} + \frac{\partial U_\beta}{\rho_0 \partial S} - \frac{U_v}{\rho_0 \rho_{01}}. \quad (1.32)$$

Якщо нитка розташовується в дотичній площині, отримаємо

$$\frac{1}{\rho_{*1}} = \frac{1}{\rho_{01}} \left( 1 + \frac{U_v}{\rho_0} \right). \quad (1.33)$$

Розглянемо приклади визначення кривизни осі нитки для різних випадків взаємодії з направляючою поверхнею (див. рис. 1.8). У першому випадку (рис. 1.8 а) нитка рухається по направляючій поверхні малої кривизни, що деформується; у другому (див. рис. 1.8 б) зминаєма нитка рухається по направляючій поверхні, що не деформується; у третьому випадку і нитка і напрямна деформуються. Початкові радіуси кривизни осі нитки рівні  $R+r$ . Закон зміни положення точок осі нитки від величини  $S$  має вигляд



Ріс.1.8. Взаємодія нитки направляючими малою(а) і великою(б) кривизни

$$U_v = \left\{ \frac{P_0(R+r)r}{P_0 r} + E_I b (R+r)^2 \right\} \exp\left[ -\frac{\mu S}{(R+r)} \right],$$

де  $E_I$  - модуль пружності при поперечному стисненні;  $\mu$  - коефіцієнт тертя між ниткою і що направляє;  $b$  - середня величина сліду контакту.

Результати розрахунку по формулі (1.30) приведені в таблиці 1.2. Розрахунок виконувався при наступних початкових даних:  $E_I = 500$  сН/мм<sup>2</sup>,  $P_0 = 10$  сН (натягнення веденої гілки),  $\mu = 0,15$ ,  $R = 1$  мм,  $r = 0,2$  мм,  $b = 0,01$  мм.

Аналіз отриманих даних дозволив встановити, що найбільше зменшення кривизни відбувається при взаємодії нитки з направляючою малої кривизни, що деформується.

Таблиця 1.2. Залежність радіусу кривизни осі нитки від дугової координати  $S$

Випадки руху нитки	$S$ , мм					
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
<b>1</b>	0,2980	0,2913	0,2845	0,2776	0,2706	0,2635
<b>2</b>	0,7030	0,7023	0,7007	0,6990	0,6973	0,6956
<b>3</b>	0,5746	0,5713	0,5680	0,5647	0,5614	0,5579

### 1.3. Визначення швидкостей і прискорень точок осі м'ятої нитки

Теоретичне дослідження процесу руху зминаємої нитки, з погляду визначення швидкостей і прискорень, має велике значення для вирішення ряду конкретних прикладних завдань. Отримані результати можна буде використовувати для вивчення різних технологічних процесів швейною, трикотажною, текстильною галузей, де має місце рух нитки по направляючій поверхні великої кривизни [1,2,10].

Перейдемо до визначення швидкостей і прискорень точок осі м'ятої нитки. На рис. 1.9 представлена розрахункова схема. Для визначеності вважатимемо, що початок відліку лагранжевої і ейлерової координат співпадають. Враховуючи, що зминання нитки в зоні контакту відбувається при зусиллях, значно менших, ніж зусилля, необхідні для розтягування нитки [1], рахуватимемо нитку нерозтяжною  $dS=dS_0$ , а  $\varepsilon=0$ .

Положення точки  $A^*$  щодо нерухомої координатної системи  $O_1XYZ$  визначається радіус-вектором  $R^*$ . Положення точки  $A$  на осі незім'ятої нитки (штрихова лінія на рис. 1.9) визначається радіус-вектором  $R$ . При деформації поперечного перетину в зоні контакту крапка  $A$  переміститься в положення  $A^*$ . Вектор  $AA^*$  позначимо через  $U$ .

Скористаємося співвідношенням (1.4)

$$\vec{R}^* = \vec{R} + \vec{U}. \quad (1.34)$$

Диференціюючи векторне рівняння (1.4) за часом, отримаємо

$$\vec{V}^* = \vec{V} + \frac{\partial \vec{U}}{\partial t}, \quad (1.35)$$

де  $V^*$  - швидкість точки  $A^*$ ;  $V$  - швидкість точки  $A$ .

Для визначення проєкцій вектора швидкості  $V^*$  на осі нерухомої координатної системи  $O_1XYZ$  [1,2,18-31] необхідно векторне рівняння (1.34) скалярно помножити на відповідні одиничні орты  $i, j, k$ . З урахуванням (1.7) отримаємо

$$V_{x^*} = V_x + \frac{\partial U_x}{\partial t}; V_{y^*} = V_y + \frac{\partial U_y}{\partial t}; V_{z^*} = V_z + \frac{\partial U_z}{\partial t},$$

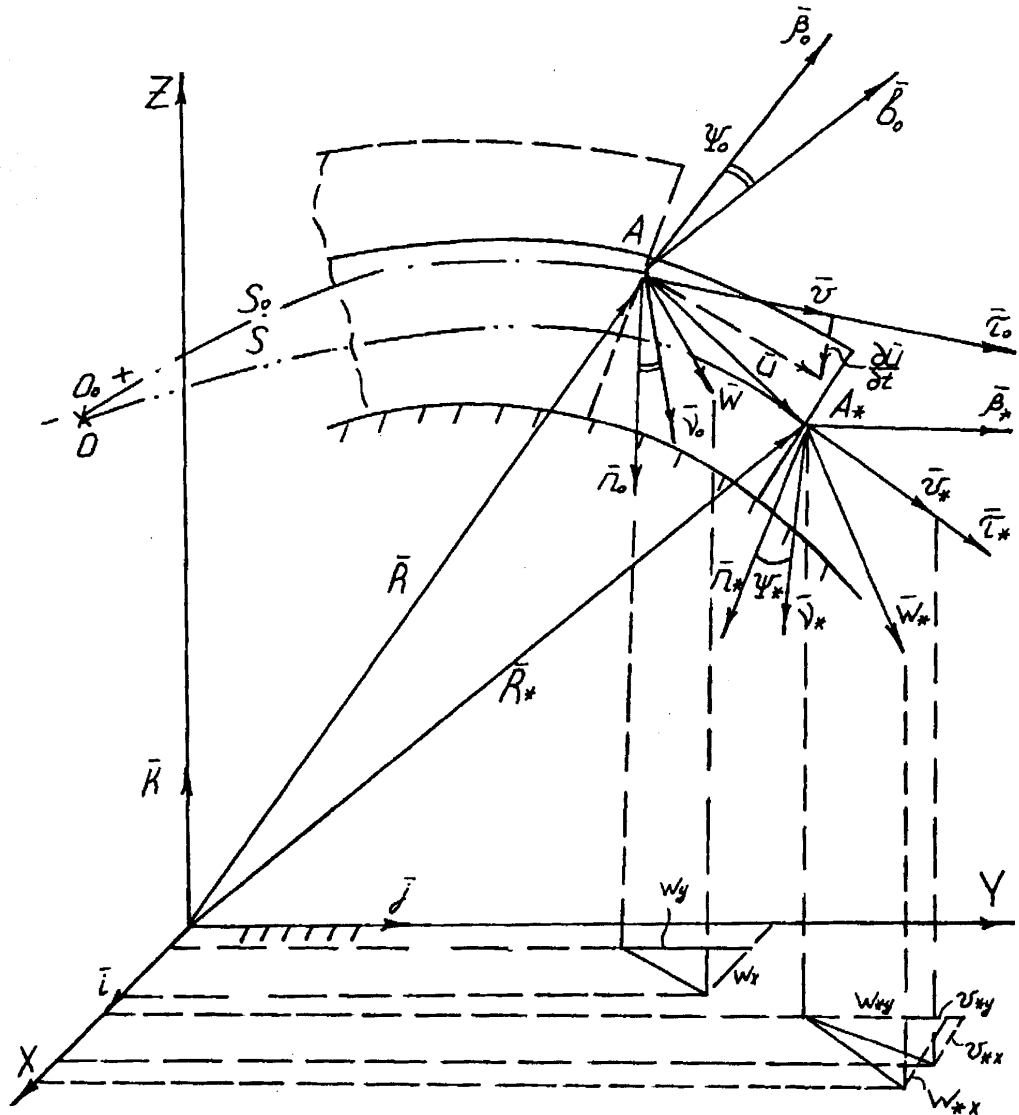


Рис.1.9. Розрахункова схема для визначення швидкостей та прискорень точок вісі змінюєної нитки

де

$$V_x = \frac{\partial x}{\partial t}; V_y = \frac{\partial y}{\partial t}; V_z = \frac{\partial z}{\partial t}.$$

Для визначення закону розподілу швидкостей і прискорень точок нитки, зазвичай вводять в розгляд незалежний вектор  $P$  [1]. Якщо даний вектор незмінно пов'язаний з осями  $\tau, n, b$  головного тригранника, то

приватні похідні за часом і дугової координаті будуть рівні (з урахуванням(1.23) -(1.25))

$$\begin{aligned}\frac{\partial \bar{P}}{\partial S} &= \bar{\Omega} \times \bar{P}; \\ \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} &= \bar{\omega}_e \times \bar{P},\end{aligned}\tag{1.36}$$

а локальні похідні при цьому рівні нулю.

Якщо вектор  $\mathbf{P}$ , який може мати довільну фізичну природу, міняє свою орієнтацію щодо осей головного тригранника (див. мал. 1.9), то тоді вирази (1.36) приймуть вигляд

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial S} = \bar{\Omega} \times \bar{P} + \frac{\partial \tilde{P}}{\partial S}; \quad \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} = \bar{\omega}_e \times \bar{P} + \frac{\partial \tilde{P}}{\partial t},\tag{1.37}$$

де  $\frac{\partial \tilde{P}}{\partial S}, \frac{\partial \tilde{P}}{\partial t}$  - відповідні локальні похідні.

Тоді, з урахуванням (1.24) -(1.25), (1.34) -(1.35), система рівнянь (1.37), для швидкостей точок осі змінюваної нитки, матиме наступні вирази

$$\begin{aligned}\left(\frac{\partial \bar{V}_x}{\partial S}\right)_\tau &= \frac{\partial V_{x\tau}}{\partial S} + V_{xb}p_1 - V_{xn}q_1; \\ \left(\frac{\partial \bar{V}_x}{\partial S}\right)_n &= \frac{\partial V_{xn}}{\partial S} - V_{xb}r_1 + V_{x\tau}q_1; \\ \left(\frac{\partial \bar{V}_x}{\partial S}\right)_b &= \frac{\partial V_{xb}}{\partial S} + V_{xn}r_1 - V_{x\tau}p_1; \\ \left(\frac{\partial \bar{V}_x}{\partial t}\right)_\tau &= \frac{\partial V_{x\tau}}{\partial t} + \omega_2 V_{*b} - \omega_3 V_{*n}; \\ \left(\frac{\partial \bar{V}_x}{\partial t}\right)_n &= \frac{\partial V_{xn}}{\partial t} - \omega_1 V_{*b} + \omega_3 V_{*\tau}; \\ \left(\frac{\partial \bar{V}_x}{\partial t}\right)_b &= \frac{\partial V_{xb}}{\partial t} + \omega_1 V_{*n} + \omega_2 V_{*\tau},\end{aligned}\tag{1.38}$$

де

$$r_1 = \frac{1}{\rho_{*1}} + \frac{\partial \Psi_*}{\partial S}, \quad p_1 = \frac{\sin \Psi_*}{\rho_1}, \quad q_1 = \frac{\cos \Psi_*}{\rho_1}$$

які визначаються з урахуванням виразів (1.29) -(1.33);  $\Psi_*$  - значення кута Сен-Венана в точці  $A^*$ ;  $V_{*\tau}, V_{*n}, V_{*b}$  - відповідно проєкції вектора

швидкості  $V^*$  на осі  $\tau^*, n^*, b^*$  головного тригранника;  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  - відповідно проекції вектора кутової швидкості  $\omega e$  елементу нитки на осі головного тригранника (з урахуванням кутової швидкості деформаційного кручення [1]).

Система диференціальних рівнянь (1.38) дозволяє визначити закон зміни швидкості  $V^*$  залежно від дугової координати  $S$ .

Зв'язок між вектором повної кривизни  $\Omega$  і вектором абсолютної кутової швидкості  $\omega e$  визначиться з диференціального рівняння

$$\frac{\partial \bar{\omega}_e}{\partial S} - \frac{\partial \bar{\Omega}}{\partial t} = \bar{\Omega} \times \bar{\omega}_e. \quad (1.40)$$

Враховуючи, що

$$\bar{\omega}_e = \omega_1 \bar{\tau}^* + \omega_2 \bar{n}^* + \omega_3 \bar{b}^*, \quad (1.41)$$

а

$$\bar{\Omega}_e = r_1 \bar{\tau}^* + p_1 \bar{n}^* + q_1 \bar{b}^*, \quad (1.42)$$

у проекціях на осі головного тригранника вираз (1.40), з урахуванням (1.41) -(1.42), прийме вигляд

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega_1}{\partial S} - \frac{\partial r_1}{\partial t} &= \omega_2 q_1 - \omega_3 p_1; \\ \frac{\partial \omega_2}{\partial S} - \frac{\partial p_1}{\partial t} &= -\omega_1 q_1 + \omega_3 r_1; \\ \frac{\partial \omega_3}{\partial S} - \frac{\partial q_1}{\partial t} &= \omega_1 p_1 - \omega_2 r_1. \end{aligned} \quad (1.43)$$

Для визначення залежності між проекціями вектора швидкості  $V^*$  і вектора абсолютної кутової швидкості  $\omega e$  скористаємося наступними співвідношеннями

$$\frac{\partial \bar{V}_e}{\partial S} = \frac{\partial}{\partial S} \frac{\partial \bar{R}^*}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \bar{R}^*}{\partial S} = \frac{\partial \bar{\tau}^*}{\partial t} = \bar{\omega}_e \times \bar{\tau}^*.$$

Вирішуючи останнє векторне рівняння, отримаємо

$$\frac{\partial \bar{V}_e}{\partial S} = -\omega_2 \bar{b}^* + \omega_3 \bar{n}^*. \quad (1.44)$$

Скалярний множачучи праву частину рівності (1.44) на одиничні орти  $\tau^*, n^*, b^*$  і прирівнюючи праві частини відповідних рівнянь (1.38),



матимемо систему диференціальних рівнянь ("умов на швидкостях"), що описує рух ниток з урахуванням м'ятої в зоні контакту.

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_{*\tau}}{\partial S} + V_{*b} \frac{\sin \Psi_*}{\rho_1} - V_{*n} \frac{\cos \Psi_*}{\rho_1} &= 0; \\ \frac{\partial V_{*n}}{\partial S} - V_{*b} \left( \frac{1}{\rho_{*1}} + \frac{\partial \Psi_*}{\partial S} \right) + V_{*r} \frac{\cos \Psi_*}{\rho_1} &= \omega_3; \\ \frac{\partial V_{*b}}{\partial S} + V_{*n} \left( \frac{1}{\rho_{*1}} + \frac{\partial \Psi_*}{\partial S} \right) - V_{*r} \frac{\sin \Psi_*}{\rho_1} &= -\omega_2. \end{aligned} \quad (1.45)$$

Вирішення системи диференціальних рівнянь (1.45) необхідно проводити з урахуванням (1.28).(1.33). Інтегрування даної системи рівнянь значно полегшується шляхом застосування чисельних методів при його рішенні на ЕОМ.

Останній результат можна отримати при диференціюванні за часом системи рівнянь (1.27) ("умов на переміщеннях"). При цьому, компоненти повної кривизни повинні відповідати її значенню в точці  $A^*$ .

Представляє інтерес визначення швидкості в довільній точці осі м'ятої нитки, як функції вектора  $\vec{U}$  який визначає ступінь зминання нитки в зоні контакту.

З урахуванням (1.35), вираз для швидкості  $V^*$  точки  $A^*$  матиме вигляд

$$\vec{V}_* = V_{\tau} \vec{\tau}_* + V_n \vec{n}_* + V_b \vec{b}_* + U'_{\tau} \vec{\tau}_* + U'_n \vec{n}_* + U'_b \vec{b}_*, \quad (1.46)$$

де  $V_{\tau}, V_n, V_b$  - відповідно проекції вектора швидкості  $V$  точки  $A$  на осі головного тригранника в припущенні, що зминання відсутнє;  $U'_{\tau}, U'_n, U'_b$  - проекції вектора швидкості і  $U'$  переміщення крапки  $A$  за рахунок зминання в зоні контакту.

Розподіл швидкостей точок осі зминаємої нитки отримаємо шляхом диференціювання виразу (1.46) по дуговій координаті  $S$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{V}_*}{\partial S} = & \left[ \frac{\partial(V_\tau + U'_\tau)}{\partial S} + (V_b + U'_b)p_1 - (V_n + U'_n)q_1 \right] \vec{\tau}_* + \\ & + \left[ \frac{\partial(V_n + U'_n)}{\partial S} + (V_\tau + U'_\tau)q_1 - (V_b + U'_b)r_1 \right] \vec{n}_* + \\ & + \left[ \frac{\partial(V_b + U'_b)}{\partial S} + (V_n + U'_n)r_1 - (V_\tau + U'_\tau)p_1 \right] \vec{b}_*. \end{aligned}$$

Диференціюючи по дуговій координаті рівність (1.35), отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{V}_*}{\partial S} = \vec{\omega}_e \times \vec{\tau}_* = (\vec{\omega}_0 + \vec{\omega}_u) \times \vec{\tau}_*; \\ \vec{\omega}_e = (\vec{\omega}_0 + \vec{\omega}_u), \end{aligned} \quad (1.47)$$

де  $\omega_0$  - кутова швидкість обертання головного тригранника  $\tau_0 n_0 b_0$  (без урахування змінання);  $\omega_u$  - кутова швидкість обертання головного тригранника, обумовлена переміщенням точок осі нитки за рахунок м'ятої.

Прирівнюючи праві частини останньої системи рівнянь, які описують розподіл швидкостей точок осі м'ятої нитки і векторної рівності (1.47), в проекції на осі головного тригранника  $\tau^* n^* b^*$ , отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{\partial(V_\tau + U'_\tau)}{\partial S} + (V_b + U'_b)p_1 - (V_n + U'_n)q_1 = 0; \\ \frac{\partial(V_n + U'_n)}{\partial S} + (V_\tau + U'_\tau)q_1 - (V_b + U'_b)r_1 = \omega_{0b} + \omega_{ub}; \\ \frac{\partial(V_b + U'_b)}{\partial S} + (V_n + U'_n)r_1 - (V_\tau + U'_\tau)p_1 = -(\omega_{0n} + \omega_{un}), \end{aligned} \quad (1.48)$$

де  $\omega_{0b}$ ,  $\omega_{ub}$  - проекції векторів кутових швидкостей  $\omega_0$ ,  $\omega_u$  на бинормаль головного тригранника;  $\omega_{0n}$ ,  $\omega_{un}$  - проекції векторів кутової швидкості елемента нитки, що обертається, на нормальну вісь.

Якщо в системі диференціальних рівнянь (1.48) нехтувати змінанням поперечного перетину ( $\vec{U} = 0$ ), то отримаємо систему рівнянь [1], що визначають умови на швидкостях для немнучких ниток

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_\tau}{\partial S} + V_b p_1 - V_n q_1 = 0; \\ \frac{\partial V_n}{\partial S} + V_\tau q_1 - V_b r_1 = \omega_{0b}; \\ \frac{\partial V_b}{\partial S} + V_n r_1 - V_\tau p_1 = -\omega_{0n}. \end{aligned} \quad (1.49)$$

Вважаючи, що в системі рівнянь (1.49) кут Сен-Венана рівний нулю  $\psi_0 = \psi^* = 0$  і враховуючи рівняння (1.24), матимемо відомі співвідношення для швидкостей для ідеальної нитки [1,10]

$$\frac{\partial V_\tau}{\partial S} - \frac{V_n}{\rho_0} = 0; \quad \frac{\partial V_n}{\partial S} + \frac{V_\tau}{\rho_0} - \frac{V_b}{\rho_{01}} = \omega_{e3}; \quad \frac{\partial V_b}{\partial S} + \frac{V_n}{\rho_{01}} = -\omega_{e2}.$$

Система рівнянь (1.39) служить для визначення проєкцій вектора прискорення на координатні осі  $\tau^*, n^*, b^*$

$$\begin{aligned} (\bar{W}^*)_\tau &= \frac{\partial V^*_\tau}{\partial S} + \omega_2 V^*_b - \omega_3 V^*_n; \\ (\bar{W}^*)_n &= \frac{\partial V^*_n}{\partial S} - \omega_1 V^*_b + \omega_3 V^*_\tau; \\ (\bar{W}^*)_b &= \frac{\partial V^*_b}{\partial S} + \omega_1 V^*_n - \omega_2 V^*_\tau, \end{aligned} \quad (1.50)$$

де  $W^*\phi$ ,  $W^*n$ ,  $W^*b$  - проєкції вектора прискорення на осі головного тригранника.

Для визначення залежності між проєкціями вектора прискорення від дугової координати, продиференціюємо вираз (1.50) по  $S$ , отримаємо

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial \bar{W}^*}{\partial S} \right)_\tau &= \frac{\partial W^*_\tau}{\partial S} + \frac{\partial \omega_2}{\partial S} V^*_b + \omega_2 \frac{\partial V^*_b}{\partial S} - \frac{\partial \omega_3}{\partial S} V^*_n - \omega_3 \frac{\partial V^*_n}{\partial S}; \\ \left( \frac{\partial \bar{W}^*}{\partial S} \right)_n &= \frac{\partial W^*_n}{\partial S} + \frac{\partial \omega_3}{\partial S} V^*_\tau + \omega_3 \frac{\partial V^*_\tau}{\partial S} - \frac{\partial \omega_1}{\partial S} V^*_b - \omega_1 \frac{\partial V^*_b}{\partial S}; \\ \left( \frac{\partial \bar{W}^*}{\partial S} \right)_b &= \frac{\partial W^*_b}{\partial S} + \frac{\partial \omega_1}{\partial S} V^*_n + \omega_1 \frac{\partial V^*_n}{\partial S} - \frac{\partial \omega_2}{\partial S} V^*_\tau - \omega_2 \frac{\partial V^*_\tau}{\partial S}, \end{aligned} \quad (1.51)$$

де  $\left( \frac{\partial \bar{W}^*}{\partial S} \right)_\tau, \left( \frac{\partial \bar{W}^*}{\partial S} \right)_n, \left( \frac{\partial \bar{W}^*}{\partial S} \right)_b$  - проєкції вектора першої похідної прискорення точки  $A^*$  по дуговій координаті на осі головного тригранника.

Першу похідну вектора прискорення по дуговій координаті можна представити як

$$\frac{\partial \bar{W}^*}{\partial S} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \bar{V}^*}{\partial S} = \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\omega}_e \times \bar{\tau}^*) = \frac{\partial \bar{\omega}_e}{\partial t} \times \bar{\tau}^* + \bar{\omega}_e \times \frac{\partial \bar{\tau}^*}{\partial t} = \frac{\partial \bar{\omega}_e}{\partial t} \times \bar{\tau}^* + \bar{\omega}_e \times (\bar{\omega}_e \times \bar{\tau}^*). \quad (1.52)$$

З урахуванням виразу (1.41) і

$$\bar{\varepsilon}_e = \frac{\partial \bar{\omega}_e}{\partial t} = \varepsilon_1 \bar{\tau}^* + \varepsilon_2 \bar{n}^* + \varepsilon_3 \bar{b}^*, \quad (1.53)$$

де  $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$  - відповідно проекції вектора кутового прискорення на осі  $\phi^*, n^*, b^*$ , перетворимо формулу (1.52)

$$\frac{\partial \bar{W}^*}{\partial S} = (-\omega_2^2 - \omega_3^2) \bar{\tau}^* + (\omega_1 \omega_2 + \varepsilon_3) \bar{n}^* + (\omega_1 \omega_3 - \varepsilon_2) \bar{b}^*. \quad (1.54)$$

Прирівнюючи відповідні проекції векторного рівняння (1.54) до правих частин системи (1.51), отримаємо

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial W_{*\tau}}{\partial S} + \frac{\partial \omega_2}{\partial S} V_{*b} + \omega_2 \frac{\partial V_{*b}}{\partial S} - \frac{\partial \omega_3}{\partial S} V_{*n} - \omega_3 \frac{\partial V_{*n}}{\partial S} &= -\omega_2^2 - \omega_3^2 \bar{\tau}^*; \\ \frac{\partial W_{*n}}{\partial S} + \frac{\partial \omega_3}{\partial S} V_{*\tau} + \omega_3 \frac{\partial V_{*\tau}}{\partial S} - \frac{\partial \omega_1}{\partial S} V_{*b} - \omega_1 \frac{\partial V_{*b}}{\partial S} &= \omega_1 \omega_2 + \varepsilon; \\ \frac{\partial W_{*b}}{\partial S} + \frac{\partial \omega_1}{\partial S} V_{*n} + \omega_1 \frac{\partial V_{*n}}{\partial S} - \frac{\partial \omega_2}{\partial S} V_{*\tau} - \omega_2 \frac{\partial V_{*\tau}}{\partial S} &= \omega_1 \omega_3 - \varepsilon. \end{aligned} \right\}$$

Систему рівнянь (1.50) можна представити в розгорненому вигляді через складові, які визначають ступінь змінання нитки в зоні контакту. З урахуванням рівнянь (1.46) -(1.48) система (1.50) прийме вигляд

$$\left. \begin{aligned} (\bar{W}^*)_{\tau} &= \frac{\partial (V_{\tau} + U'_{\tau})}{\partial t} + (\omega_{0n} + \omega_{un})(V_b + U'_b) - (\omega_{0b} + \omega_{ub})(V_n + U'_n); \\ (\bar{W}^*)_n &= \frac{\partial (V_n + U'_n)}{\partial t} - (\omega_{0\tau} + \omega_{u\tau})(V_b + U'_b) + (\omega_{0b} + \omega_{ub})(V_{\tau} + U'_{\tau}); \\ (\bar{W}^*)_b &= \frac{\partial (V_b + U'_b)}{\partial t} + (\omega_{0\tau} + \omega_{u\tau})(V_n + U'_n) - (\omega_{0n} + \omega_{un})(V_{\tau} + U'_{\tau}). \end{aligned} \right\} \quad (1.55)$$

Якщо нитка рухається в площині (наприклад  $\tau^*, A^*, n^*$ ), то тоді система рівнянь (1.55) перетвориться

$$\begin{aligned} (\bar{W}^*)_{\tau} &= \frac{\partial (V_{\tau} + U'_{\tau})}{\partial t} - (\omega_{0b} + \omega_{ub})(V_n + U'_n); \\ (\bar{W}^*)_n &= \frac{\partial (V_n + U'_n)}{\partial t} + (\omega_{0b} + \omega_{ub})(V_{\tau} + U'_{\tau}); \\ (\bar{W}^*)_b &= (\omega_{0\tau} + \omega_{u\tau})(V_n + U'_n) - (\omega_{0n} + \omega_{un})(V_{\tau} + U'_{\tau}) = 0. \end{aligned} \quad (1.56)$$

У разі прямолінійного руху нитки система (1.56) перетвориться в систему тотожності

$$(\bar{W}^*)_{\tau} = \frac{\partial (V_{\tau} + U'_{\tau})}{\partial t}; (\bar{W}^*)_n = 0; (\bar{W}^*)_b = 0.$$

Зазвичай, в розрахунках, нехтують подовжнім зсувом при зминанні в зоні контакту і враховують тільки поперечну складову. Тоді, система рівнянь (1.55) спроститься

$$\begin{aligned}(\bar{W}^*)_{\tau} &= \frac{\partial V_{\tau}}{\partial t} - (\omega_{0b} + \omega_{ub})(V_n + U'_n); \\(\bar{W}^*)_n &= \frac{\partial(V_n + U'_n)}{\partial t} + (\omega_{0b} + \omega_{ub})V_{\tau}; \\(\bar{W}^*)_b &= (\omega_{0\tau} + \omega_{u\tau})(V_n + U'_n) - (\omega_{0n} + \omega_{un})V_{\tau} = 0.\end{aligned}$$

#### 1.4. Основні рівняння динаміки нитки, яка рухається по направляючій великої кривизни

Розробку основ механіки ниток завершимо виведенням рівнянь динаміки, які описують взаємодію ниток з направляючими поверхнями великої кривизни.

До теперішнього часу достатньо детально описаний процес взаємодії з направляючою жорстких на вигин і кручення ниток без урахування зминання в зоні контакту [1]. У роботі [24] робляться спроби описати процес взаємодії рухомої гнучкої нитки з направляючою. Істотне поглиблення дана тема отримала в роботах проф. Ефремова Е.Д. [1].

Відсутність відповідного математичного забезпечення для опису динамічних процесів взаємодії ниток що зминаються з направляючою утрудняє аналіз явищ, що відбуваються при цьому, і, як наслідок, гальмує роботу по оптимізації технологічних процесів і вдосконаленню устаткування.

Підхід до розробки системи диференціальних рівнянь необхідно починати з вибору відповідної моделі нитки I або II модифікації (див. рис. 1.1). Слід зазначити, що математичні рівняння, що описують поведінку ниток-моделей II модифікації, простіші [10]. Проте, як наголошувалося вище, вони використовуються в тих випадках, коли реальні нитки піддаються дії у вузькому спектрі силового поля.

На рис. 1.10, а, б, в представлені різні розрахункові схеми для виведення диференціальних рівнянь руху нитки. Схема 1.10 а описує процес розтягування невагомої нитки, для якою моделлю служить нитка-модель II модифікації Максвелла (див. рис. 1.3, е). Диференціальне рівняння, що зв'язує головний вектор всіх зовнішніх сил  $R_0$ , відносно деформацію  $\varepsilon$  і час  $t$ , має вигляд

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{E} \frac{\partial R_0}{\partial t} + \frac{R_0}{\eta},$$

де  $E$  - модуль пружності нитки при розтягуванні;  $\eta$  - коефіцієнт, що характеризує в'язкі властивості ниток.

Векторна умова рівноваги для даної нитки-моделі II модифікації можна записати як

$$\bar{R}_0 = \bar{P}.$$

Нитки-моделі I модифікації (рис. 1.10 б, в) по своїй будові і вигляду найбільш наближені до реальних. Так на рис. 1.10 б представлена найбільш поширена схема, яка використовується для виведення диференціальних рівнянь руху нитки. Всі зовнішні сили і реакції зв'язків, нитки, що діють на елемент, нескінченно малої довжини  $dS$ , представимо у вигляді головного вектора  $R_0$  і головного моменту  $M_0$ . Дані вектора приведемо до точки  $A^*$  - центру мас виділеного елемента нитки. До даної точки приводиться і результуюча сила інерції  $\Phi^*$  і вектор  $M\phi$ . Головний тригранник  $\tau^*n^*b^*$ , з вершиною в точці  $A^*$ , служить координатною системою, щодо якої розглядається умовна рівновага всіх сил і моментів.

Виділення елемента нескінченно малої товщини  $BC$  шляхом перетину нитки двома площинами, перпендикулярними осі нитки в точках  $B$  і  $C$ , дозволяє всі внутрішні силові чинники в кожному з них привести до головного вектора і головного моменту: до точки  $B$  ( $M, R$ ) - для лівого перетину; до точки  $C$

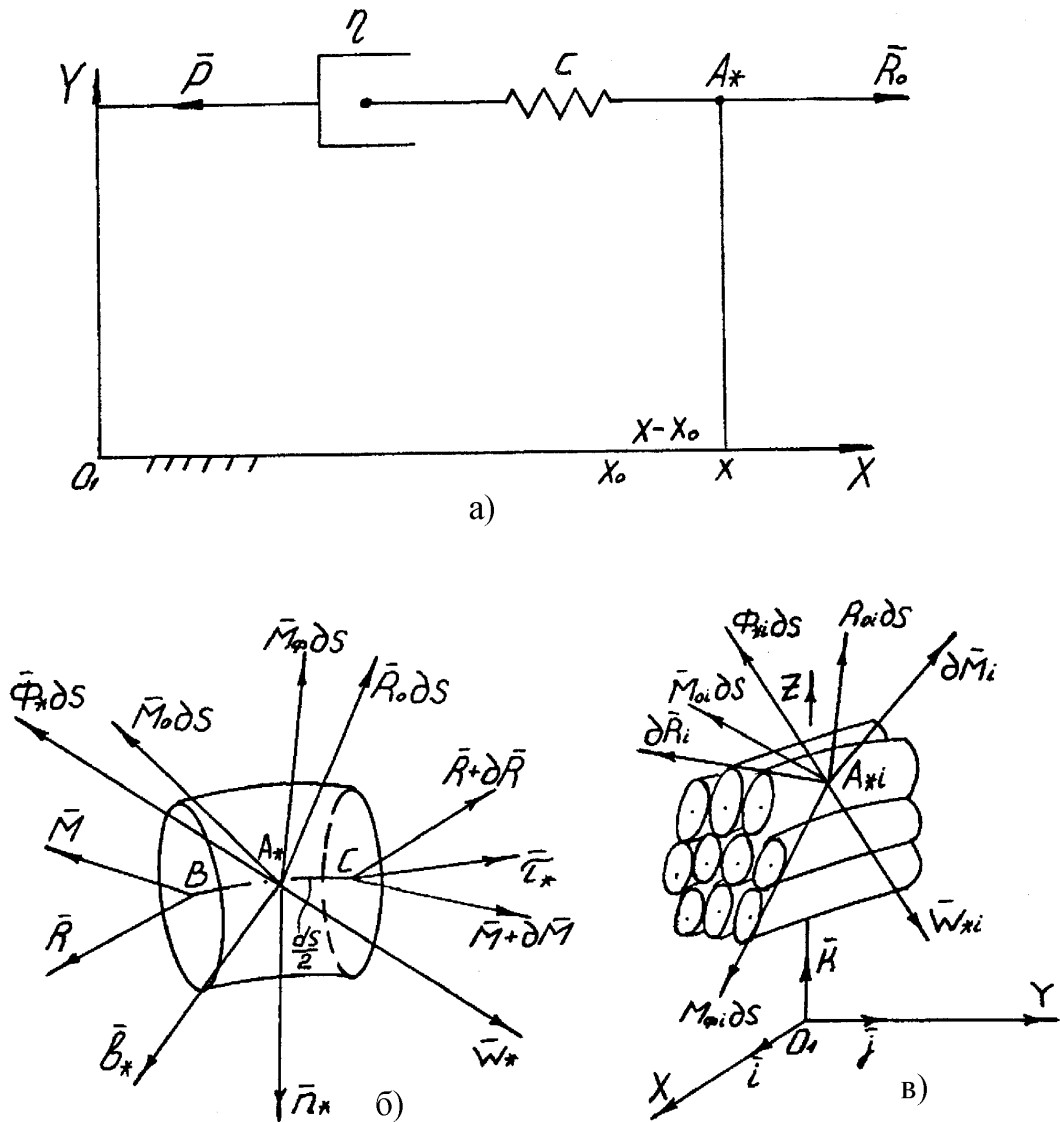


Рис.1.10. Силова схема навантаження елемента нитки

$(\bar{R}+\partial\bar{R}, \bar{M}+\partial\bar{M})$  - для правого перетину. При побудові даної схеми вважали, що рух відбувається зліва направо. Векторні рівняння

$$\frac{\partial \bar{R}}{\partial S} + \bar{R}_0 - \bar{\Phi}_* = 0; \quad \frac{\partial \bar{M}}{\partial S} + \bar{M}_0 + \bar{\tau}_* \times \bar{Q} - \bar{M}_\phi = 0, \quad (1.57)$$

описують рух нескінченно малого елемента нитки.

При вивченні взаємодії комплексних ниток і пряжі з направляючими поверхнями проф. Щербаковим В. П. була запропонована модель (див. рис.

1.10, в), що складається з окремих, прямолінійно розташованих філаментів (циліндричної форми). Нами вона віднесена до моделей I модифікації.

В даному випадку маємо справу з системою матеріальних тіл. Використовуючи основні принципи методу кінетостатики необхідно для досягнення умовної рівноваги до активно заданих сил і моментів додати відповідні реакції зв'язків і сили інерції, які діють на тіло або систему тіл.

Якщо двома площинами, перпендикулярними осі комплексної нитки або пряжі, відсікти елемент (див. рис. 1.10, в) нескінченно малої довжини  $ds$ , що складається з  $n$  елементарних філаментів, то відповідно до приведеного вище методу кінетостатики необхідно до кожного  $i$ -му елементарному філаменту прикласти вказані вище сили.

Центром приведення у кожного  $i$  елементарного волокна буде точка  $A^*i$  - центр мас. Всі активно задані сили і відповідні реакції зв'язків приведемо до головного вектора  $R_{0i}$  і головному моменту  $M_{0i}$ . Внутрішні зусилля в двох перетинах також приведемо до центру мас. Їх дія на елементарний філамент замінює головний вектор  $dR_i$  і головний момент  $dM_i$ .

Сили інерції приведемо до головного вектора  $\Phi^*i$  і головному моменту  $M\phi_i$ .

Для  $i$ -го філаменту векторні рівняння рівноваги матимуть вигляд

$$\frac{\partial \bar{R}_i}{\partial S} + \bar{R}_{0i} - \bar{\Phi}^*i = 0; \quad \frac{\partial \bar{M}_i}{\partial S} + \bar{M}_{0i} - \bar{M}_{\phi i} = 0.$$

Якщо дані залежності підсумувати для  $n$  елементарних волокон, з яких складається комплексна нитка або пряжа, то при цьому реакції зв'язків (окрім внутрішніх зусиль) знищуються як взаємно урівноважені сили для кожної пари волокон.

У проекції на координатні осі  $X, Y, Z$  отримаємо систему шести рівнянь



$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial R_{ix}}{\partial S} + R_{0ix}^- - \Phi_{*ix} \right) &= 0; \quad \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial M_{ix}}{\partial S} + M_{0ix}^- - M_{\phi ix} \right) = 0; \\ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial R_{iy}}{\partial S} + R_{0iy}^- - \Phi_{*iy} \right) &= 0; \quad \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial M_{iy}}{\partial S} + M_{0iy}^- - M_{\phi iy} \right) = 0; \\ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial R_{iz}}{\partial S} + R_{0iz}^- - \Phi_{*iz} \right) &= 0; \quad \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial M_{iz}}{\partial S} + M_{0iz}^- - M_{\phi iz} \right) = 0, \end{aligned}$$

де відповідний індекс  $x, y$  або  $z$  указує проекцію на відповідну вісь.

Проте нитки-моделі даного вигляду є досить "грубими". Наприклад при її побудові філаменти вважають розташованими прямолінійно. Насправді, елементарні волокна переплітаються між собою, а це істотним чином міняє характер взаємодії між ними. Крім того, при вирішенні приведеної вище системи рівнянь стикаються з дуже серйозними труднощами. Це стосується складності у визначенні проекцій векторів сил і моментів на відповідні осі координат.

Феноменологічний підхід, який використовувався нами при побудові розрахункової схеми 1.10 б, дозволяє уникнути вказаних вище труднощів при описі руху комплексних ниток і пряжі з урахуванням змінання.

Таким чином, найбільш прийнятною, з погляду простоти отримуваних результатів, є нитка-модель I модифікації, у якій весь об'єм рівномірно заповнений матеріалом.

Для отримання системи диференціальних рівнянь необхідно векторні рівняння (1.57) спроекувати на осі головного тригранника  $\tau^*n^*b^*$  (див. рис. 1.10 б). Головний вектор  $\mathbf{R}$  рівний

$$\bar{\mathbf{R}} = P\bar{\tau}^* + Q_2\bar{n}^* + Q_3\bar{b}^*, \quad (1.58)$$

а головний момент  $\mathbf{M}$  рівний

$$\bar{\mathbf{M}} = M_k\bar{\tau}^* + M_{u2}\bar{n}^* + M_{u3}\bar{b}^*. \quad (1.59)$$

Продиференціюємо вирази (1.58) і (1.59) по дуговій координаті

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{R}}{\partial S} &= \left( \frac{\partial P}{\partial S} - Q_2 q_1 + Q_3 p_1 \right) \vec{\tau}_* + \left( \frac{\partial Q_2}{\partial S} + P q_1 + Q_3 r_1 \right) \vec{n}_* + \left( \frac{\partial Q_3}{\partial S} - P p_1 + Q_2 r_1 \right) \vec{b}_*, \\ \frac{\partial \vec{M}}{\partial S} &= \left( \frac{\partial M_k}{\partial S} - M_{u2} q_1 + M_{u3} p_1 \right) \vec{\tau}_* + \left( \frac{\partial M_{u2}}{\partial S} + M_k q_1 + M_{u3} r_1 \right) \vec{n}_* + \\ &+ \left( \frac{\partial M_{u3}}{\partial S} - M_k p_1 + M_{u2} r_1 \right) \vec{b}_*, \end{aligned} \quad (1.60)$$

де  $P$  - натяг нитки;  $Q_2, Q_3$  - проекції перерізуючої сили на нормаль і бінормаль;  $M_k$  - момент, що крутить перетин;  $M_{u2}, M_{u3}$  - моменти, що вигинають нитку у відповідних перетинах.

Сила інерції, що входить у вираз (1.57), визначиться з урахуванням (1.55) по формулі

$$\begin{aligned} \vec{\Phi}_* &= T \vec{W}_* = T \times \\ &\times \left\{ \left[ \frac{\partial (V_\tau + U'_\tau)}{\partial t} + (\omega_{0n} + \omega_{un})(V_b + U'_b) - (\omega_{0b} + \omega_{ub})(V_n + U'_n) \right] \vec{\tau}_* + \right. \\ &+ \left[ \frac{\partial (V_n + U'_n)}{\partial t} - (\omega_{0\tau} + \omega_{u\tau})(V_b + U'_b) + (\omega_{0b} + \omega_{ub})(V_\tau + U'_\tau) \right] \vec{n}_* + \\ &+ \left. \left[ \frac{\partial (V_b + U'_b)}{\partial t} + (\omega_{0\tau} + \omega_{u\tau})(V_n + U'_n) - (\omega_{0n} + \omega_{un})(V_\tau + U'_\tau) \right] \vec{b}_* \right\}, \end{aligned} \quad (1.61)$$

де  $T$  - лінійна щільність нитки.

Для визначення величини  $M\phi$  скористаємося відомим з теоретичної механіки співвідношенням [10], тоді для елемента нитки

$$\vec{M}_\phi = \frac{J}{\partial S} \frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t}, \quad (1.62)$$

де  $J$  - тензор інерції (враховуючи, що осі головного тригранника, розташованого в центрі мас елемента  $BC$ , є осями симетрії і головними осями інерції, вважаємо, що відцентрові моменти інерції рівні нулю і значущими будуть тільки розташовані на головній діагоналі матриці тензора інерції).

Складові тензора інерції, розташовані на головній діагоналі матриці, визначаються по формулах

$$\begin{aligned} J_{\tau^*} &= \gamma_n [J_{\tau_0} \pm \Delta_{\tau}(\bar{U})] \delta S, \\ J_{n^*} &= \gamma_n [J_{n_0} \pm \Delta_n(\bar{U})] \delta S, \\ J_{b^*} &= \gamma_n [J_{b_0} \pm \Delta_b(\bar{U})] \delta S, \end{aligned} \quad (1.63)$$

де  $J_{\tau^*}$ ,  $J_{n^*}$ ,  $J_{b^*}$  - відповідно моменти інерції виділеного елемента (див. рис. 1.10 б) щодо осей головного тригранника;  $J_{\tau 0}$ ,  $J_{n 0}$ ,  $J_{b 0}$  - геометричні моменти інерції щодо осей головного тригранника до змінюваної нитки;  $\Delta_{\tau(U)}$ ,  $\Delta_n(U)$ ,  $\Delta_b(U)$  - функціональні коефіцієнти, що визначають зміну геометричних моментів інерції за рахунок змінання в зоні контакту;  $\gamma$  - об'ємна щільність.

З урахуванням залежності (1.53) вираз (1.62) прийме вигляд

$$\bar{M}_{\Phi} = \gamma_n \left\{ [J_{\tau_0} \pm \Delta_{\tau}(\bar{U})] \varepsilon_1 \bar{\tau}^* + [J_{n_0} \pm \Delta_n(\bar{U})] \varepsilon_2 \bar{n}^* + [J_{b_0} \pm \Delta_b(\bar{U})] \varepsilon_3 \bar{b}^* \right\}, \quad (1.64)$$

де  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$  - проекції вектора кутового прискорення елемента нитки  $\varepsilon^*$  на осі головного тригранника.

Твір одиничного орта  $\tau^*$  на вектор перерізуючої сили  $Q$  з другого рівняння системи (1.56) буде рівний

$$\bar{\tau}^* \times \bar{Q} = -Q_3 \bar{n}^* + Q_2 \bar{b}^*. \quad (1.65)$$

Проекції головного вектора всіх зовнішніх сил, для випадку взаємодії нитки з направляючою, можна виразити таким чином

$$\bar{R}_0 = F_{\tau} \bar{\tau}^* + F_n \bar{n}^* + F_b \bar{b}^*, \quad (1.66)$$

де  $F_{\tau}$ ,  $F_n$ ,  $F_b$  - проекції вектора  $R_0$ , що становлять, на осі головного тригранника.

Аналогічна залежність буде і для головного моменту зовнішніх сил  $M_0$

$$\bar{M}_0 = M_{\tau} \bar{\tau}^* + M_n \bar{n}^* + M_b \bar{b}^*, \quad (1.67)$$

де  $M_{\tau}$ ,  $M_n$ ,  $M_b$  - відповідні проекції на осі головного тригранника.

Результуюча система диференціальних рівнянь, що описують рух ниток що змінюються по направляючій поверхні, була отримана шляхом проектування системи (1.57) з урахуванням (1.24) (1.25) (1.27) (1.29).(1.33), (1.50), (1.56), (1.60).(1.67) на осі головного тригранника

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial P}{\partial S} - Q_2 q_1 + Q_3 p + F_\tau = T \times \\
 & \times \left[ \frac{\partial(V_\tau + U'_\tau)}{\partial t} + (\omega_{0n} + \omega_{un})(V_b + U'_b) - (\omega_{0b} + \omega_{ub})(V_n + U'_n) \right]; \\
 & \frac{\partial Q_2}{\partial S} + P q_1 + Q_3 r + F_n = T \times \\
 & \times \left[ \frac{\partial(V_n + U'_n)}{\partial t} - (\omega_{0\tau} + \omega_{u\tau})(V_b + U'_b) + (\omega_{0b} + \omega_{ub})(V_\tau + U'_\tau) \right]; \\
 & \frac{\partial Q_3}{\partial S} - P p_1 + Q_2 r_1 + F_b = T \times \\
 & \times \left[ \frac{\partial(V_b + U'_b)}{\partial t} + (\omega_{0\tau} + \omega_{u\tau})(V_n + U'_n) - (\omega_{0n} + \omega_{un})(V_\tau + U'_\tau) \right]; \quad (1.68) \\
 & \frac{\partial M_\kappa}{\partial S} - M_{u2} q_1 + M_{u3} p + M_\tau = \gamma_n [J_{\tau_0} \pm \Delta_\tau(\bar{U})] \varepsilon_1; \\
 & \frac{\partial M_{u2}}{\partial S} + M_\kappa q_1 + M_{u3} r - Q_3 + M_n = \gamma_n [J_{n_0} \pm \Delta_n(\bar{U})] \varepsilon_2; \\
 & \frac{\partial M_{u3}}{\partial S} - M_\kappa p_1 + M_{u2} r + Q_2 + M_b = \gamma_n [J_{b_0} \pm \Delta_b(\bar{U})] \varepsilon_3; \\
 & F_\tau = F_t(A, \mu, N) \cos \varphi_t; F_n = N; F_b = F_t(A, \mu, N) \sin \varphi_t; \\
 & \frac{1}{\rho_0} = \frac{\partial \varphi}{\partial S}; \frac{1}{\rho_{01}} = \frac{\partial \Psi}{\partial S}; \varphi_t = (\bar{\tau}_*; \bar{V}_*); M_b = r_x F_t,
 \end{aligned}$$

де  $F_t(A, \mu, N)$  - відповідна залежність між нормальним тиском  $N$  в довільній крапці і силою тертя  $F_t$ ;  $\mu$  - коефіцієнт тертя;  $\varphi_t$  - кут азимута тертя;  $A$  - коефіцієнт, що характеризує вплив міжмолекулярної взаємодії поверхонь, що труться;  $r_x$  - відстань від точки  $A^*$  осі елемента нитки до тієї, що направляє ( $r_x = r - Uv$ , де  $r$  - розрахунковий радіус перетину нитки).

Декілька слів необхідно сказати про залежність величини питомого тиску  $N$  від швидкості деформації і величини відносної деформації поперечного перетину нитки.

Як було встановлено проф. Гарбаруком В.Н. [10] натяг нитки із збільшенням швидкості зменшується. При зменшенні розмірів поперечного перетину нитки вплив швидкості її руху на натяг зменшується. Отримані результати справедливі лише для монониток. Для комплексних ниток і пряжі спостерігається протилежна картина. Як буде показано нижче, при збільшенні швидкості руху нитки її натяг зростає.

Така ж тенденція спостерігається і при збільшенні відносної деформації поперечного перетину нитки. На наш погляд пояснення даного явища необхідно шукати при визначенні швидкості розповсюдження деформацій при зминанні нитки, що взаємодіє з направляючою.

Враховуючи сказане, як модель, що описує залежність між нормальним питомим тиском  $N$  і відносною деформацією поперечного перетину  $\delta$ , прийнята залежність (1.1). Нелінійний зв'язок між вказаними величинами, з урахуванням (1.1), виражається залежностями

$$N = bE_1\delta(1 - b_3\delta^{b_4}) + \eta\dot{\delta}^{b_6}(1 - b_5\dot{\delta}^{b_6}); \delta = \frac{r - r_x}{r}; \dot{\delta} = \frac{\partial U_v}{\partial t} \frac{1}{r}, \quad (1.69)$$

де  $b$  - ширина сліду контакту;  $\delta'$  - швидкість відносної деформації поперечного перетину нитки;  $\eta$  - коефіцієнт, що характеризує в'язкі властивості нитки при її поперечній деформації;  $E_1$  - поточний модуль жорсткості;  $b_3, b_4, b_5, b_6$  - експериментальні коефіцієнти, які визначалися з діаграми "навантаження - деформація".

Аналогічні нелінійні залежності вигляду (1.69) для натягу  $P$ , для моменту крутіння  $M_k$  і моментів  $M_{u2}$  та  $M_{u3}$ , що вигинають нитку представляють фізичні рівняння динамічних деформацій розтягування, кручення і вигину, доповнюють систему диференціальних рівнянь (1.68).

Залежність (1.69) була отримана для випадку деформації нитки у напрямі головної нормалі ( $Uv \neq 0$ ). Враховуючи ізотропну властивостей матеріалу нитки при зминанні, можна вважати, що і у напрямі бінормалі ( $U\beta \neq 0$ ) і дотичної ( $U\tau \neq 0$ ) форма рівняння (1.69) не зміниться.

Головні компоненти кривизни визначимо по формулах (1.25), (1.27) і (1.31)

$$\begin{aligned} q_1 &= \frac{\cos\Psi_0}{\rho_0} + \frac{\partial\beta}{\partial S} + \frac{\alpha}{\rho_{01}} + \alpha \frac{\partial\Psi_0}{\partial S}; \\ p_1 &= \frac{\sin\Psi_0}{\rho_0} + \frac{\partial\alpha}{\partial S} - \frac{\beta}{\rho_{01}} - \beta \frac{\partial\Psi_0}{\partial S}; r_1 = \frac{1}{\rho_0} + \frac{\partial\Psi_0}{\partial S} - \alpha \frac{\cos\Psi_0}{\rho_0} + \frac{\sin\Psi_0}{\rho_0} \beta, \end{aligned} \quad (1.70)$$

де

$$\gamma = \frac{\partial U_\tau}{\partial S} - \frac{\cos \Psi_0}{\rho_0} U_\nu + \frac{\sin \Psi_0}{\rho_0} U_\beta; \beta = \frac{\partial U_\nu}{\partial S} + \frac{\cos \Psi_0}{\rho_0} U_\tau - \frac{U_\beta}{\rho_{01}} - U_\beta \frac{\partial \Psi_0}{\partial S};$$

$$\alpha = \frac{\sin \Psi_0}{\rho_0} U_\tau - \frac{\partial U_\beta}{\partial S} - \frac{U_\nu}{\rho_{01\nu}} - U_\nu \frac{\partial \Psi_0}{\partial S}.$$

До отриманих рівнянь необхідно приєднати системи рівнянь (1.43), (1.45), (1.46) і (1.48), які визначають собою умови на швидкостях.

В результаті отримали систему 38 рівнянь, що описує рух нитки-моделі, жорсткої на вигин і кручення, яка зминається в зоні контакту з направляючою поверхнею. Необхідно відзначити, що залежності "навантаження-деформація" носять для пружно вязкопластической нитки нелінійний характер.

Для вирішення системи рівнянь (1.68)-(1.70), (1.43), (1.45), (1.46), (1.48) вважаємо спочатку заданими від аргументів  $S$  і  $t$  функції  $\psi_0$ ,  $\varphi t$ ,  $\varphi_0$ ,  $\psi$  [1].

Отримана система є замкнутою нелінійною системою з 31 диференціального і 7 рівняннями алгебри. Дана система містить 38 невідомих функцій  $P$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $M_k$ ,  $M_{U_2}$ ,  $M_{U_3}$ ,  $F_\nu$ ,  $F_\nu$ ,  $F_b$ ,  $M_b$ ,  $F_T$ ,  $N$ ,  $r_b$ ,  $p_b$ ,  $q_b$ ,  $V_{*\nu}$ ,  $V_{*\nu}$ ,  $V_{*b}$ ,  $V_\tau + U_\tau'$ ,  $V_n + U_n'$ ,  $V_b + U_b'$ ,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ ,  $\omega_{0\tau} + \omega_{un}$ ,  $\omega_{0n} + \omega_{un}$ ,  $\omega_{0b} + \omega_{ub}$ ,  $\Delta\tau(\bar{U})$ ,  $\Delta n(\bar{U})$ ,  $\Delta b(\bar{U})$ ,  $r_x$ ,  $\delta$ ,  $\delta$ ,  $U_\nu$ ,  $U_\nu$ ,  $U_\beta$ ,  $\rho_0$ ,  $\rho_{01}$  відносно аргументів  $S$  і  $t$ .

Інтегрування даної системи диференціальних рівнянь пов'язане з великими труднощами і можливо тільки із застосуванням ЕОМ. Складність інтегрування полягає у виборі граничних і початкових умов для похідних відповідних ступенів (вище другий).

Зазвичай, при вирішенні конкретних прикладних завдань механіки ниток що зминаються систему рівнянь спрощують, що дозволяє отримати відповідь в кінцевому вигляді.

### **1.5. Умови взаємодії ниток з направляючою, що деформується**

При дослідженні різних технологічних процесів легкої і текстильної промисловості необхідно визначати натяг ниток безпосередньо в зоні переробки (в'язання, формування тканини і ін.). В даному випадку має місце взаємодія нитки з направляючою поверхнею, що деформується [1].

Підхід до рішення даного завдання може базуватися на тих же припущеннях, що і при дослідженні рівноваги або руху стрижня по напрямній що деформується.

При взаємній деформації поверхонь нитки і направляючій в зоні контакту їх геометрична форма змінюється так, щоб при взаємному зсуві виконувався принцип найменшої дії. У даній системі, як і в будь-якій іншій саморегульованій системі, витрата енергії повинна бути мінімальною. Дані особливості саморегульованих механічних систем роблять можливим характеризувати поведінку графічних залежностей їх повної енергії як кривих ліній, що мають властивості максимуму або мінімуму.

Визначення геометричних параметрів осі нитки при її взаємодії з направляючою поверхнею, що деформується, зв'язане з великими труднощами. Це пояснюється тим, що при деформації зона контакту змінює своє положення щодо координатної системи  $O_1XYZ$ . Переміщення викликане змінанням напрямної і її переносним рухом разом з ниткою (у загальному випадку). Якщо при цьому врахувати змінання самої нитки, то видно, що вона здійснюватиме в просторі складний рух. Результати теоретичного дослідження процесу взаємодії нитки з направляючою, що деформується, служать основою при розробці програмного забезпечення для ЕОМ при вирішенні прикладних завдань.

На рис. 1.11 представлена розрахункова схема для визначення геометричних і кінематичних параметрів точок осі нитки.

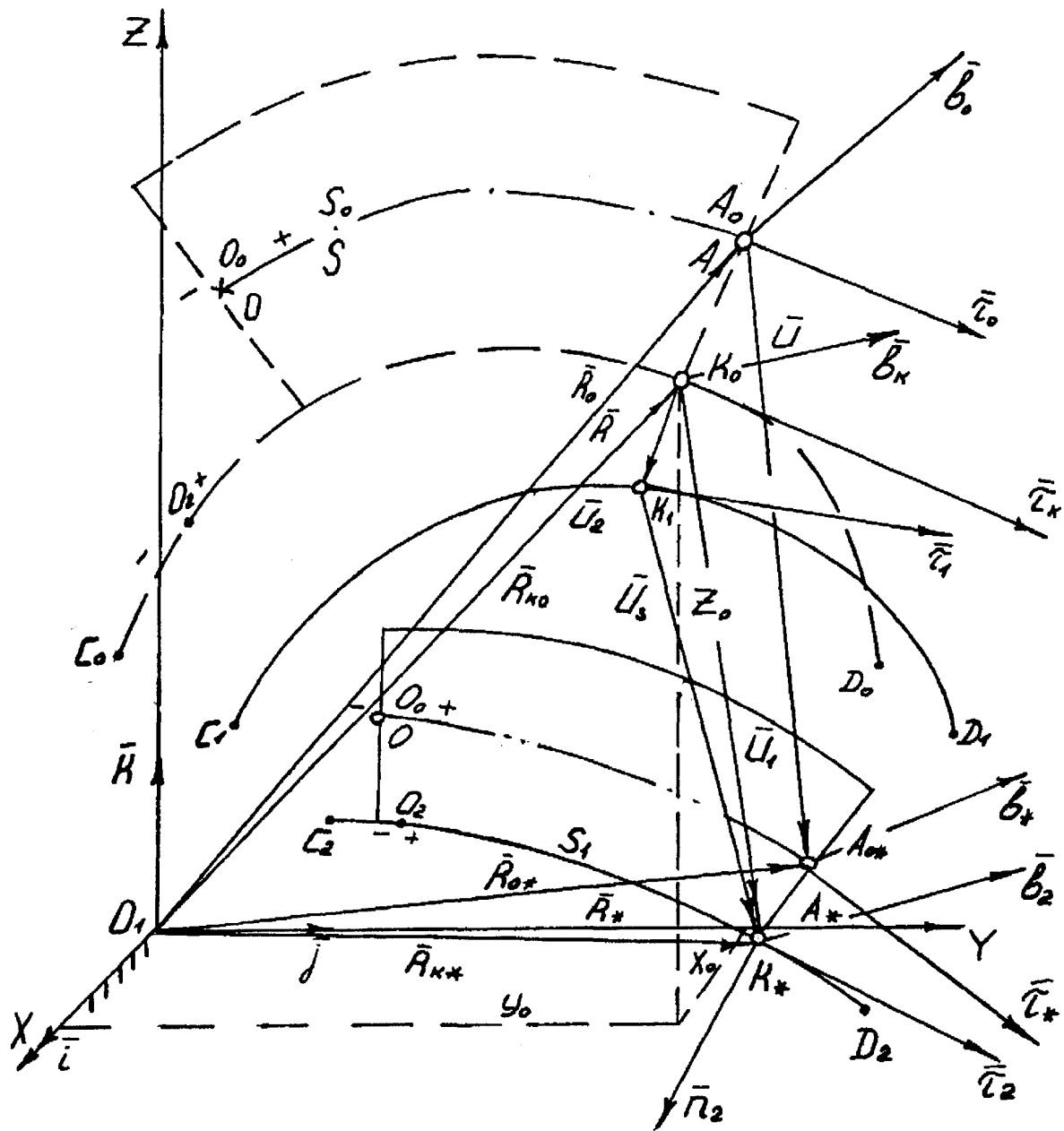


Рис.1.11. Визначення геометричних характеристик точок вісі нитки при її взаємодії з напрямною що деформується

Положення елемента нитки на поверхні, що деформується, визначатимемо щодо нерухомої координатної системи  $O_1XYZ$ . Для



простоти вважатимемо, що зона контакту представляє деяку лінію. До деформації зона контакту займала положення  $C0D0$ .

За рахунок руху направляючої зона контакту, без урахування її зминання, переміститься в положення  $C1D1$ . Кінцеве положення зони контакту –  $C2D2$ .

Положення точок  $A0$ ,  $A$  і  $A0^*$ ,  $A^*$  на осі нитки визначатимемо лагранжевою  $S0$  і ейлеровою  $S$  дуговою координатою. Відносно початку координат нерухомої системи дані точки визначені радіус-векторами  $R0$ ,  $R$  і  $R0^*$ ,  $R^*$ . Початки координат  $0$  і  $0_0$  лагранжевої і ейлерової координат нерухомі і розташовані в одній точці.

Положення точок на лінії, що визначає зону контакту, заданою координатою  $S1$ . Вона відлічується від деякого нерухомого центру  $O2$  на цій лінії.

Якщо нехтувати розтягуванням нитки, то  $ds=ds0$  і точки  $A0$ ,  $A$  і  $A0^*$ ,  $A^*$  співпадуть. Кожній з них, на лінії контакту, відповідатиме точка  $K0$  і  $K^*$ . Вони отримуються шляхом перетину лінії контакту нормальною площиною до нитки в точках  $A$  і  $A^*$  відповідно.

Радіус-вектори  $Rk0$  і  $Rk^*$  визначають положення точок  $K0$  і  $K^*$  відносно початки нерухомої координатної системи.

У разі, коли поверхня напрямної має малу кривизну і розмірами поперечного перетину нитки можна нехтувати, вісь нитки співпадатиме з лінією контакту.

У проекції на осі головного тригранника  $\tau_k n_k b_k$  вектор  $\vec{U}_1$  можна представити таким чином

$$\vec{U}_1 = U_{1\tau} \vec{\tau}_k + U_{1n} \vec{n}_k + U_{1b} \vec{b}_k = (U_{2\tau} + U_{3\tau}) \vec{\tau}_k + (U_{2n} + U_{3n}) \vec{n}_k + (U_{2b} + U_{3b}) \vec{b}_k, \quad (1.71)$$

де  $U_{1\tau}$ ,  $U_{1n}$ ,  $U_{1b}$  - відповідні проекції вектора  $\vec{U}$  на осі головного тригранника;  $U_{2\tau}$ ,  $U_{3\tau}$ ,  $U_{2n}$ ,  $U_{3n}$ ,  $U_{2b}$ ,  $U_{3b}$  - відповідно проекції векторів  $\vec{U}_2$  і  $\vec{U}_3$  на дотичну  $\tau k$ , нормаль  $n k$  і бінормаль  $b k$ .

Позначимо кути між дотичній  $\tau k$  і осями головного тригранника  $\tau_0 n_0 b_0$  в точці  $A$  осі нитки через  $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ . Між нормаллю  $nk$  і відповідними осями  $\tau_0, n_0, b_0$  через  $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$ . Тоді бінормаль  $bk$  в точці  $K_0$  утворює з осями головного тригранника  $\tau_0 n_0 b_0$  кути  $\alpha_3, \beta_3, \gamma_3$ .

Виразимо вектор  $\vec{U}$  через відповідні проекції на осі головного тригранника. Для цього спроектуємо векторне рівняння (1.71) на відповідні координатні осі з урахуванням (1.21)

$$\begin{aligned} \vec{U} = U_{\varepsilon\tau} \vec{\tau}_0 + U_{\varepsilon n} \vec{n}_0 + U_{\varepsilon b} \vec{b}_0 = (U_{\tau} + U_{I\tau} \cos \alpha_1 + U_{In} \cos \alpha_2 + U_{Ib} \cos \alpha_3) \vec{\tau}_0 + \\ + (U_{\nu} + U_{I\tau} \cos \beta_1 + U_{In} \cos \beta_2 + U_{Ib} \cos \beta_3) \vec{n}_0 + \\ + (U_{\beta} + U_{I\tau} \cos \gamma_1 + U_{In} \cos \gamma_2 + U_{Ib} \cos \gamma_3) \vec{b}_0, \end{aligned} \quad (1.72)$$

де  $U_{\varepsilon\tau}, U_{\varepsilon n}, U_{\varepsilon b}$  - проекції вектора  $\vec{U}$  на осі головного тригранника  $\tau_0 n_0 b_0$  з урахуванням деформації направляючої поверхні. Співвідношення між одиничними ортами головних тригранників в точках  $A$  і  $A^*$  знайдемо з системи векторних рівнянь (1.20) з урахуванням (1.71) -(1.72)

$$\begin{aligned} \vec{\tau}_* &= \vec{\tau}_0 - \alpha_{\varepsilon} \vec{b}_0 + \beta_{\varepsilon} \vec{n}_0; \\ \vec{n}_* &= \vec{n}_0 - \beta_{\varepsilon} \vec{\tau}_0 + \gamma_{\varepsilon} \vec{b}_0; \\ \vec{b}_* &= \vec{b}_0 + \alpha_{\varepsilon} \vec{\tau}_0 - \gamma_{\varepsilon} \vec{n}_0, \end{aligned} \quad (1.73)$$

де  $\alpha_{\varepsilon}, \beta_{\varepsilon}, \gamma_{\varepsilon}$  - проекції вектора повороту  $\vec{U}$  на осі головного тригранника.

Прирівнюючи праві частини першого рівняння системи (1.73) і рівняння (1.26), з урахуванням (1.18) (1.22).(1.25), (1.72), спроектуємо отриманий результат на осі головного тригранника  $\tau_0 n_0 b_0$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_{\varepsilon\tau}}{\partial S} - q_0 U_{\varepsilon\nu} + p_0 U_{\varepsilon\beta} &= 0; \\ \frac{\partial U_{\varepsilon\nu}}{\partial S} + q_0 U_{\varepsilon\tau} - r_0 U_{\varepsilon\beta} &= \beta_{\varepsilon}; \\ \frac{\partial U_{\varepsilon\beta}}{\partial S} - p_0 U_{\varepsilon\tau} + r_0 U_{\varepsilon\nu} &= -\alpha_{\varepsilon}. \end{aligned} \quad (1.74)$$

Система рівнянь (1.74) визначає собою умови на переміщеннях для нитки, що взаємодіє з направляючою, що деформується.

Використовуючи методику визначення головних компонентів кривизни для ниток що зминаються, а також залежності (1.28).(1.33), для випадку взаємодії нитки з направляючою поверхнею, що деформується, величини  $q_{\varepsilon 1}$ ,  $p_{\varepsilon 1}$ ,  $r_{\varepsilon 1}$  будуть рівні

$$\begin{aligned}
 q_{\varepsilon 1} &= \frac{\cos \Psi_0}{\rho_0} + \frac{\partial \beta_{\varepsilon}}{\partial S} + \frac{\alpha_{\varepsilon}}{\rho_{01}} + \alpha_{\varepsilon} \frac{\partial \Psi_0}{\partial S}; \\
 p_{\varepsilon 1} &= \frac{\sin \Psi_0}{\rho_0} + \frac{\partial \alpha_{\varepsilon}}{\partial S} - \frac{\beta_{\varepsilon}}{\rho_{01}} - \beta_{\varepsilon} \frac{\partial \Psi_0}{\partial S}; \\
 r_{\varepsilon 1} &= \frac{1}{\rho_0} + \frac{\partial \Psi_0}{\partial S} - \alpha_{\varepsilon} \frac{\cos \Psi_0}{\rho_0} + \frac{\sin \Psi_0}{\rho_0} \beta_{\varepsilon}; \\
 \gamma_{\Sigma} &= \frac{\partial U_{\varepsilon \tau}}{\partial S} - \frac{\cos \Psi_0}{\rho_0} U_{\varepsilon \nu} + \frac{\sin \Psi_0}{\rho_0} U_{\varepsilon \beta}; \\
 \beta_{\Sigma} &= \frac{\partial U_{\varepsilon \nu}}{\partial S} + \frac{\cos \Psi_0}{\rho_0} U_{\varepsilon \tau} - \frac{U_{\varepsilon \beta}}{\rho_{01}} - U_{\varepsilon \beta} \frac{\partial \Psi_0}{\partial S}; \\
 \alpha_{\Sigma} &= \frac{\sin \Psi_0}{\rho_0} U_{\varepsilon \tau} - \frac{\partial U_{\varepsilon \beta}}{\partial S} - \frac{U_{\varepsilon \nu}}{\rho_{01 \nu}} - U_{\varepsilon \nu} \frac{\partial \Psi_0}{\partial S},
 \end{aligned} \tag{1.75}$$

де  $\psi_0$  – значення кута Сен-Венана в точці  $A$  осі нитки.

Якщо припустити, що нитка розташовується на направляючій поверхні по геодезичній лінії і кут Сен-Венана рівний нулю, то для нерозтяжної нитки співвідношення між дуговими координатами  $S$  і  $S_1$ , будуть мати вигляд

$$\partial S_1 = \frac{\rho_{k^*}}{(\rho_{k^*} + A_* K_*)} \partial S,$$

де  $\rho_{k^*}$  - радіус кривизни в точці  $K^*$  лінії контакту.

При  $A_* K_* \rightarrow 0$  отримаємо  $ds_1 = ds$  (поперечними розмірами нитки нехтуємо).

Розподіл швидкостей точок осі нитки, що взаємодіє з направляючою, що деформується, отримаємо на підставі рівності (1.38)

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \vec{V}_x}{\partial S}\right)_\tau &= \frac{\partial V_{x\tau}}{\partial S} + V_{xb}p_{\varepsilon 1} - V_{xn}q_{\varepsilon 1}; \\ \left(\frac{\partial \vec{V}_x}{\partial S}\right)_n &= \frac{\partial V_{xn}}{\partial S} - V_{xb}r_{\varepsilon 1} + V_{x\tau}q_{\varepsilon 1}; \\ \left(\frac{\partial \vec{V}_x}{\partial S}\right)_b &= \frac{\partial V_{xb}}{\partial S} + V_{xn}r_{\varepsilon 1} - V_{x\tau}p_{\varepsilon 1}. \end{aligned} \quad (1.76)$$

Вирішувати останню систему рівнянь (1.76) необхідно спільно з (1.74).

Аналогічно визначається закон розподілу прискорень точок осі нитки, що взаємодіє з направляючою, що деформується.

На підставі рівності (1.68), (1.69) і (1.74) будується система диференціальних рівнянь, що описують рівновагу елемента нитки на тій, що направляє, що деформується.

Приведені вище результати показують, що досліджуваний процес є дуже складним з погляду його теоретичного опису. Використання як об'єкт дослідження нитки-моделі I модифікації (див. 1.1) вимагає введення великого числа допущень і обмежень, що знижує точність отримуваних результатів. Все сказане указує на те, що дане питання ще далеке від свого кінцевого рішення, результати якого можна використовувати в інженерних розрахунках.

Нижче приведено дослідження процесу взаємодії нитки з направляючої малої кривизни, що деформується, з використанням нитки-моделі II модифікації.

На рис. 1.12, а приведена розрахункова схема. На лівому рисунку показана реальна картина процесу зминання напрямної і зменшення кута обхвату. Штриховою лінією показана напрямна до деформації.

Під дією нормального тиску напрямна сплющується і змінює форму зовнішньої поверхні, що приводить до зменшення кута обхвату направляючою ниткою. Це, у свою чергу, позначається на величині натяг ведучої галузь нитки.

При складанні розрахункової схеми вважалося, що нерозтяжна нитка, поперечними розмірами якої можна нехтувати, рухається з постійною швидкістю, сили тертя підкоряються закону Амонтона. Жорсткістю на вигин і зминанням нитки можна нехтувати ( $U\tau=0=U\eta=U\epsilon$ ). Пружність матеріалу нитки при стисненні характеризується жорсткістю пружини  $C$ , яка еквівалентна їй і однорідна за об'ємом. Вважатимемо, що повзун  $O$  переміщається в вертикальних напрямних без тертя, а напрямна жорстко пов'язана з повзуном. Натяг веденої гілки нитки приймемо рівним  $P_0$ .

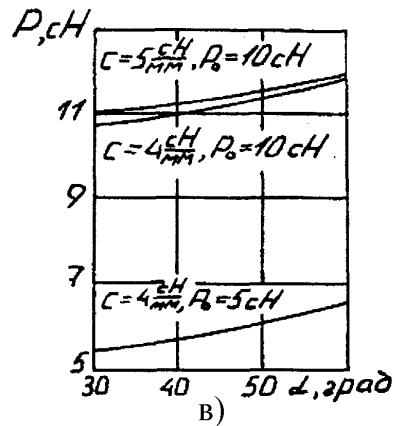
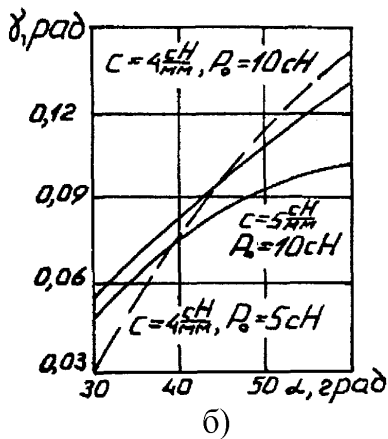
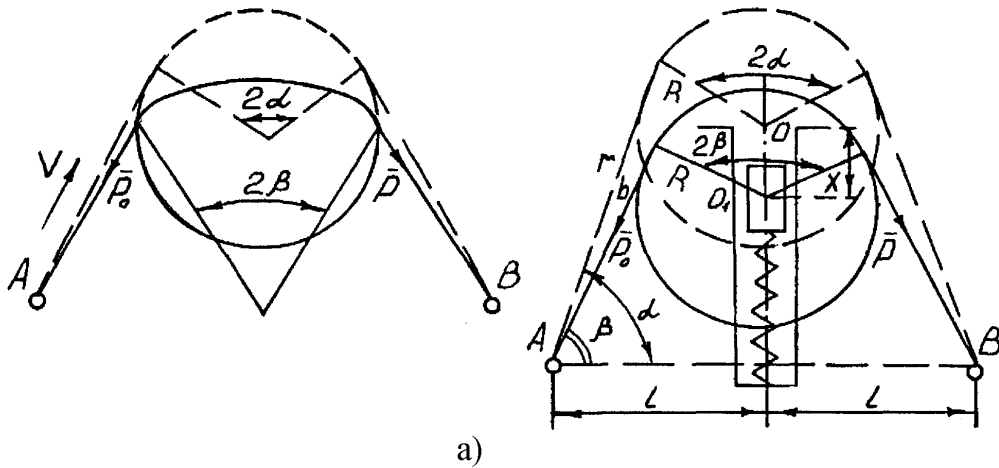


Рис.1.12. Розрахункова схема та основні залежності зміни натягу ведучої гілки нитки як функції кута охоплення направляючої що деформується

При русі нитки по направляючій відбуватиметься деформація пружини. Величину деформації позначимо через  $X$ . Рівновага рухомої направляючої описується наступною системою рівнянь

$$CX = P_0 \sin \beta (1 + e^{1\mu\beta}); P = P_0 e^{2\mu\beta}; \beta = \alpha - \gamma, \quad (1.77)$$

де  $\beta$  - половина кута обхвату при деформованій пружині;  $\alpha$  - половина кута обхвату в початковий момент (до початку деформації);  $\gamma$  - величина, яка визначає зменшення кута обхвату направляючої при зминанні;  $\mu$  - коефіцієнт тертя.

Для визначення кута обхвату складаємо рівняння, що геометрично зв'язують деформацію  $X$  і величину зміни кута обхвату  $\gamma$

$$\begin{aligned} X &= r \sin \alpha - R \cos \alpha - b \sin \beta + R \cos \beta; \\ r &= \frac{l - R \sin \alpha}{\cos \alpha}; b = \frac{l - R \sin \beta}{\cos \beta}, \end{aligned} \quad (1.78)$$

де  $R$  - радіус кривизни циліндричної направляючої (відповідає розрахунковому радіусу нитки);  $l$  - відстань від точки спрямовувача нитки до вертикальної осі переміщення повзуна.

Вирішуючи спільно рівняння (1.77) і (1.78), нехтуючи членами рівнянь, що містять квадрати і твори малих величин, отримаємо трансцендентне рівняння для визначення величини кута  $\gamma$  як функції деформації направляючої

$$\gamma = \frac{P_0 \sin(\alpha - \gamma) [1 + e^{2\mu(\alpha - \gamma)}] \cos^2 \alpha}{C(l - R \sin \alpha)}. \quad (1.79)$$

Вирішення рівняння (1.79) можна знайти за допомогою ЕОМ, застосовуючи метод дихотомії. На рис. 1.12 б приведені залежності зміни кута  $\gamma$  від величини кута обхвату  $\alpha$ . Аналіз показав, що із зменшенням коефіцієнта жорсткості з 5 до 4 сН/мм кут  $\gamma$  збільшується в середньому на 10-16%, що зменшує вихідне натяг. Приведені залежності дозволили

встановити, що при збільшенні сукання ниток зростає і коефіцієнт їх жорсткості при зминанні.

Результати розрахунку натягу ведучої галки нитки по формулі (1.77) представлені нижче.

Таблиця 1.3. Залежність натягу нитки від величини кута обхвату  
напрямної

Початковий натяг	Натяг ведучої галки нитки $P$ , сН			
	Кут обхвату до деформації, град.			
	<i>30</i>	<i>40</i>	<i>50</i>	<i>60</i>
$P_0=5$ сН, $C = 4$ сН/мм	5,52	5,69	5,88	6,07
$P_0=10$ сн, $C= 5$ сН/мм	11,00	11,33	11,67	12,06
$P_0=10$ сн, $z = 4$ сН/мм	10,98	11,30	11,62	11,90

За наслідками розрахунків побудовані графічні залежності (рис. 1.12 в) зміни натяг ведучій галки від кута обхвату.

При взаємодії нитки з направляючою що деформується, відбувається зниження натягу (в порівнянні з випадком, коли деформація зминання відсутня) за рахунок зменшення кута обхвату.

Зменшення кута обхвату більшою мірою спостерігається у ниток, що мають мале скручування і використовуються як направляючі поверхні.

### 1.6. Аналіз причин обривності ниток при їх переробці на технологічному устаткуванні

Вдосконалення технологічного устаткування текстильної і легкої промисловості повинне вестися, шляхом збільшення його продуктивності. Одним з напрямів підвищення продуктивності є зниження часу простою за рахунок ліквідації обривів ниток [1-14].

У роботі [1] приводяться дані розподіли відмов по сумарному часу відновлення і по кількості. При аналізі приведених діаграм видно, що по

кількості відмов обриви ниток складають 77, 6%, а питомий час на їх ліквідацію складає 28,1% від загального часу простою з різних причин.

Обриви ниток, виникаюча поперечна смугастість в період пуску і останову приводять до того, що сотні тонн полотна йдуть на вирізку. Наприклад, за даними Мінлеглапрома України, по Мукачевському ПТО умовна вирізка склала приблизно 24 тонни (для різних артикулів трикотажного полотна), по Горлівському ПТО - 145 тонн, по Чернівецькому ПТО - 12 тонн.

Руйнування ниток негативно позначається і на якості трикотажних і тканих полотен. Так в роботі Адамової н.А. і Дибленко в.І. [1] встановлено, що дефекти трикотажного полотна в 52 випадках із ста відбуваються з вини того, що в'яже, коли нитка взаємодіє з направляючими і робочими органами.

У практиці роботи підприємств вивченню обривності приділяється багато уваги. З цією метою проводяться систематичні спостереження за обривністю. Вельми істотним є не тільки визначення кількості обривів на певну довжину одиночної нитки, але і з'ясування причин обриву.

Враховуючи, що обриви ниток є основною причиною останову технологічного устаткування і, як наслідок, зниження продуктивності, поряд дослідників була проведена робота по виявленню основних причин обриву і їх систематизація. У роботі проф. Далідовіча а.С. [1] були виділені чотири основні причини: конструктивні, технологічні, експлуатаційні, старіння. Зважаючи на специфіку дослідження, що проводиться, нас цікавитимуть технологічні і експлуатаційні причини.

Аналіз процесу руйнування ниток при їх переробці необхідно починати з визначення розподіли обривів ниток по глибині і ширині заправки технологічного устаткування. Це необхідно для виявлення умов, в яких працює нитка в зоні руйнування.

На рис. 1.13 і 1.14 представлені технологічні схеми заправки мотальної машини М-150-2, снувальної машини СЛ-250-Ш (для стрічкового снования), ткацького верстата АТТ-120-5М, основовязальної машини "Кокетт",



панчішного автомата ОЗД. Тут же приведені гістограми розподілу обривності (%) і відносного натяг ниток  $P/p_0$  (де  $P_0$  - натяг нитки при виході з балоногасника) залежно від зони технологічної лінії заправки, які були отримані на основі експлуатаційних спостережень і проведення відповідних експериментальних досліджень [8-31]. Пунктиром показана зміна відносного натяг.

Вибір такого переліку устаткування дозволяє широко охопити всю область технологічної переробки ниток, починаючи від підготовчого виробництва і закінчуючи виготовленням безпосередньо тканини і трикотажу. Для мотальної машини М-150-2 (мал. 1.13, а) зона **A** відповідає відстані від точки сходу нитки з бобіни до балоногасника, зона **B** включає балоногасник і до приладу для натягу нитки, зона **У** включає прилад для натягу нитки і до контрольно-очисного пристрою, зона **Г** включає контрольно-очисний пристрій і до точки намотування включно.

Аналіз залежностей показав, що максимальна обривність (60%) і величина відносного натяг (2,8) буде в зоні **Г** [19]. Проф. Гордєєв В. А. [1] пояснює це збільшення м'ятою шишок і потовщень при проходженні через нитенатяжної прилад і контрольно-очисний пристрій.

На рис. 1.13 б представлені технологічна схема і гістограми розподілу обривності і відносного натягу ниток для стрічкової снувальної машини СЛ-250-Ш. За даними експериментальних досліджень, проведених на Київській фабриці "Техноткань", найбільша обривність спостерігалася в зоні **B** - від пристрою для натягу нитки до контрольної коробочки (50%). Відносне натягіння збільшувалося по глибині заправки і в зоні **Д** досягало 4,1.

Для ткацького верстата АТТ-120-5М відповідні гістограми і пружна схема заправки приведені на рис. 1.14, а (пунктиром показана зміна відносного натягу). Зона **A** включала точку сходу нитки з навоя до скало, зона **B** включала скало і до ламельного розділового приладу, зона **У** включала ламельний розділовий прилад до першої ремізи, зона **Г** включала ремізнi рамки і до зони формування тканини.

Обривність і натяг збільшуються по глибині верстата (наприклад, для капронової тканини СТСЗ-5М, що виробляється на Київській фабриці "Техноткань", обривність в зонах *В* і *Г* дорівнювала відповідно 20 і 54%, а відносний

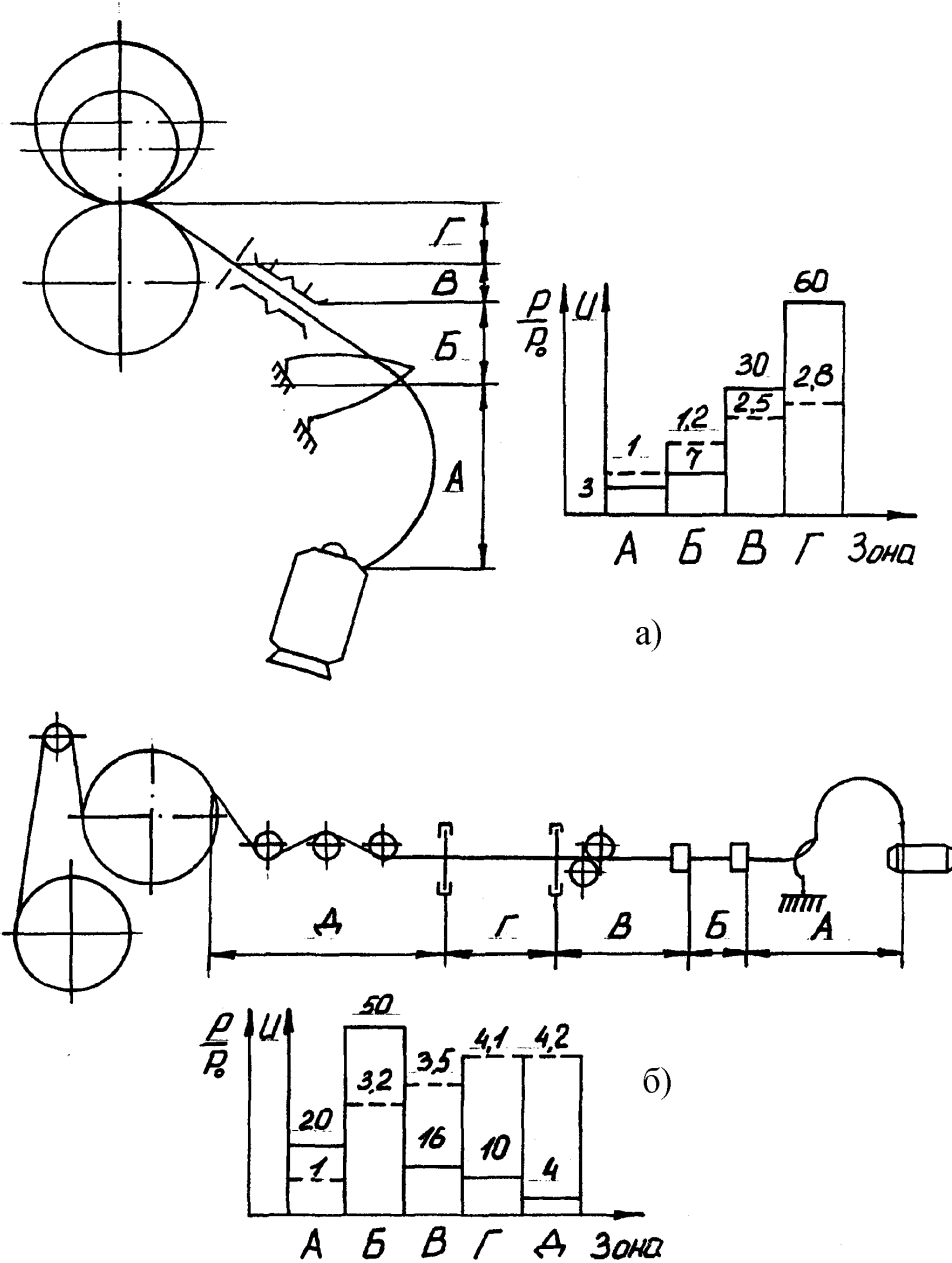


Рис.1.13. Технологічні схеми заправки та номограми вимірів обривності та відносного натягу

натяг - відповідно 1,6 і 2,4). Таке збільшення можна пояснити зростанням натягу ниток основи при їх взаємодії з направляючими великої кривизни (ламельі, отвори галев і ін.).

Д.т.н. Николаєвим с.Д. [1] при дослідженні умов формування тканини арт. 966 "Ліана", з подовжніми смугами полотняного і саржевого 3/1 переплетення, на верстатах АТ-100-5М і АТПР-100-4 встановлено, що відбувається зростання натягу основи при наближенні до зони формування. Умовна напруга в зоні "ламельі - реміз" більше заправного для верстата АТПР в 1,2-1,24 разу, а для верстата АТ в 1,37-1,43 разу.

Форма пружної системи заправки робить вплив на величину натягу і обривності ниток. Найменша обривність спостерігатиметься при співвідношенні довжини основи і тканини 148/85 і 148/104.

По ширині заправки ткацького верстата, як було встановлено проф. Гордєєвим В.А. , більшість обривів качка на верстаті типу АТ відбувається при польоті човника зліва направо і при цьому слід чекати появи місця розриву в зіві з вірогідністю 0,576.

Для основовязальной машини "Кокетт" (рис. 1.14,б) в зоні  $\Gamma$  взаємодії ниток з ушковинами гребінок, де відбувається обрив окремих філаментів і формування шишок і потовщень, обривність досягає 70% [1-14]. При цьому відносний натяг зростає до 3,3.

Дослідження, проведені проф. Волощенко В.П. і к.т.н. Новаком С.Н. [1], показали, що на панчішному автоматі ОЗД в зонах  $B$  і  $\Gamma$  (рис. 1.14,в) обривність зростає відповідно до 40 і 50% при одночасному зростанні відносного натягу до 3,3-3,5. На рис. 1.15,а приведені характерні види руйнування волокон. Унаслідок наявності дефектності структури орієнтованих полімерів розриви концентруються в місцях найбільших дефектів, приводячи до появи мікротріщин. Характер осередків руйнування, що утворюються, залежить від структури волокон. За даними Мортонна в.Е. і Херла д.В. [1] сильно напружені і розірвані елементарні волокна мають тріщини на поверхні і в місцях руйнування.

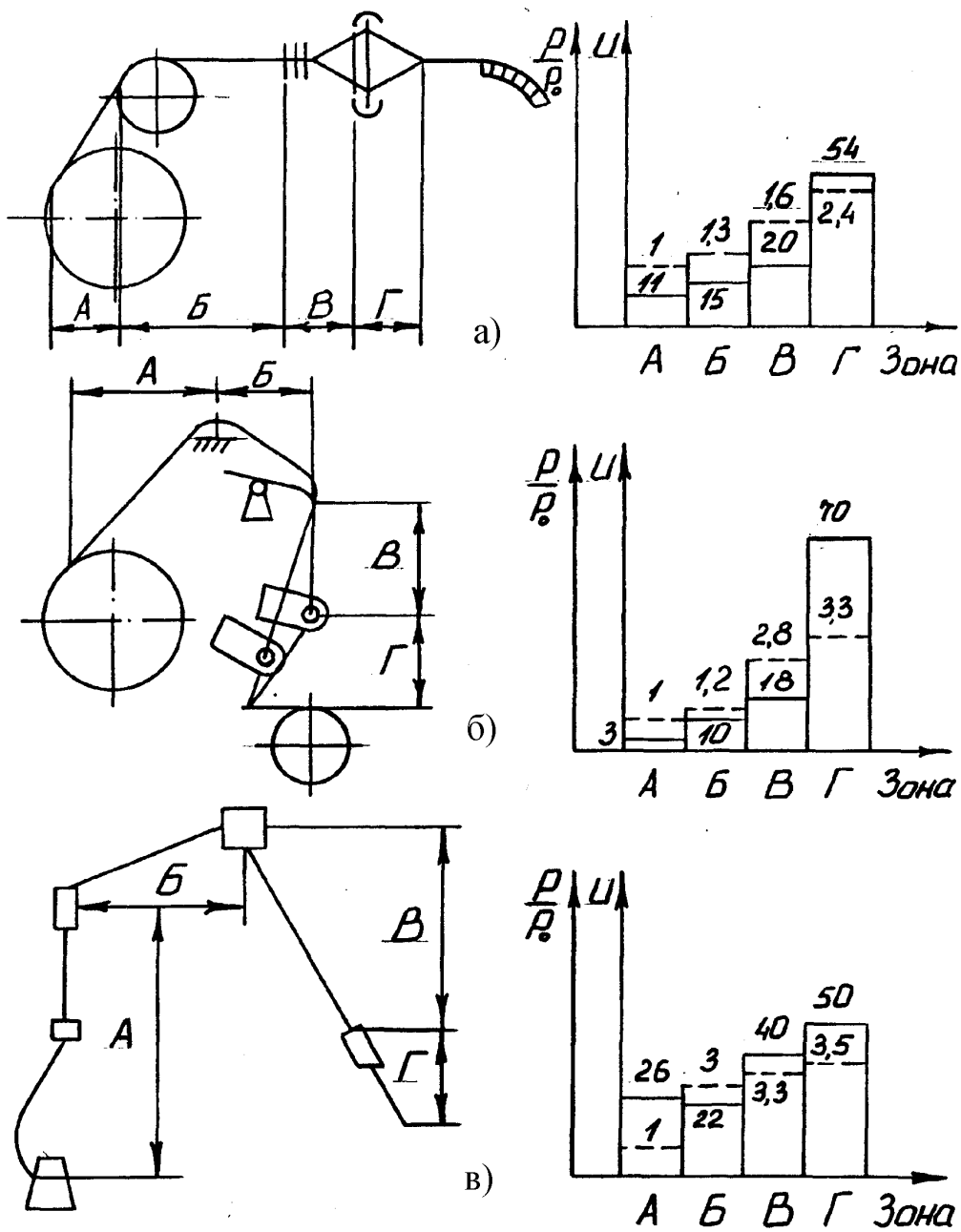


Рис.1.14. Технологічні схеми заправки та номограми вимірів обривності та відносного натягу

З чого автори роблять висновок, що розрив відбувається спочатку в поверхневих шарах, що мають нижче розривне подовження.

При теоретичному дослідженні впливу скручування стеклонитки при вигині на деформованість філаментов Рагоза І.В. встановив, що найбільшу деформацію мають зовнішні волокна. Це приводить до збільшення внутрішньої напруги в останніх і їх руйнування.

Дану обставину має велике значення, коли нитка взаємодіє з направляючою поверхнею. Зусилля, що виникають при стисненні нитки, приводять до виникнення руйнуючої напруги в її поперечному перетині і уздовж волокон.

Специфіка переробки ниток на технологічному устаткуванні приводить до того, що останні випробовують багатократні дії з боку робочих органів. Як відзначав проф. Моїсеєнко ф.А. [1], це приводить до стирання зовнішніх філаментов, їх руйнування. Форма розриву при цьому (рис. 1.15, а) носить явно виражений фібрилізаційний характер. До особливо цього схильні високоанізотропні волокна.

Взаємодія ниток направляючими великої кривизни, при багатократному переміщенні уздовж останніх, приводить до посилення стираючої дії за рахунок збільшення нормального тиску в зоні контакту. У волокон гетерогенної мікроструктури наголошується ступінчастий характер руйнування за рахунок виникнення подовжніх і поперечних тріщин. Міцність в поперечному напрямі визначається руйнуванням міжатомних зв'язків.

Як наголошувалося вище, руйнування волокон концентруються в місцях найбільших дефектів нитки. На рис. 1.15 б представлений процентний розподіл дефектів, наявність яких викликає обрив нитки при її переробці на технологічному устаткуванні [1,10]. До зовнішніх дефектів текстильних ниток відносяться такі, які характеризують чистоту ниток. Необхідно відзначити, що при складанні діаграми не враховувалися причини, що викликають обрив при сході нитки з бобіни (зростаюче натягнення при сході нитки з торця, зліт витків і ін.). Дані чинники впливають на умови переробки нитки на технологічному

устаткуванні. Їх усунення дозволяє понизити обривність і підвищити якість продукту, що випускається.

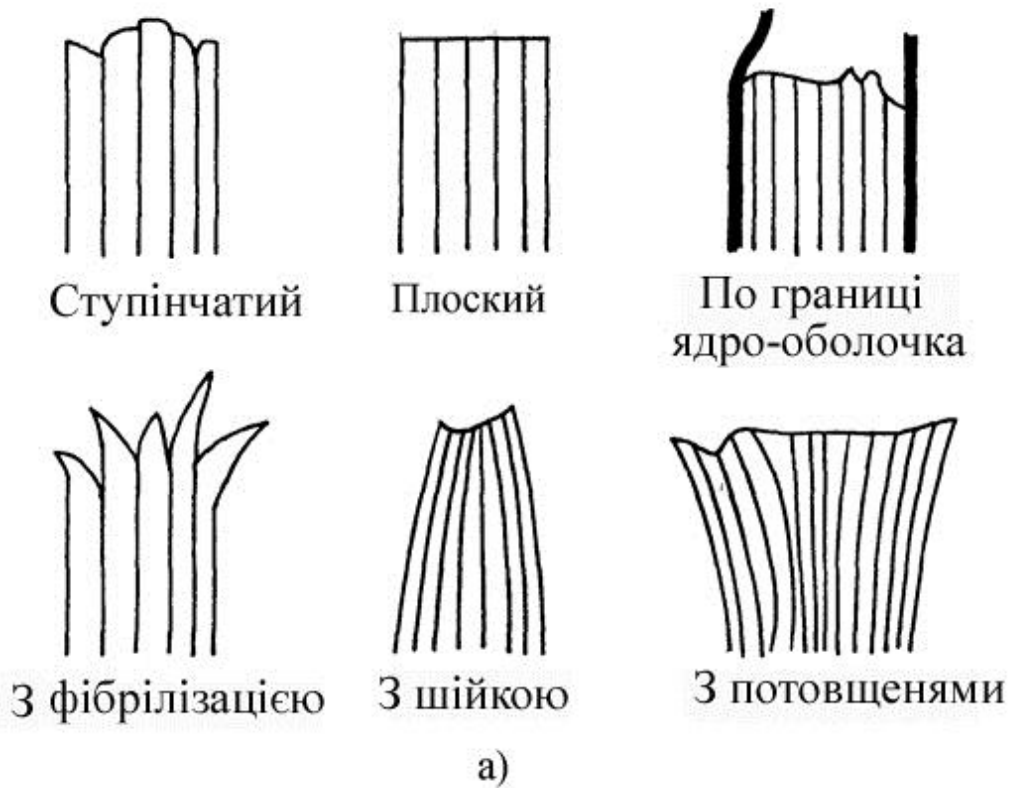


Рис.1.15. Характерні види руйнування волокон та процентний розподіл дефектів нитки

Зважаючи на специфіку дослідження, що проводиться, розглядатимемо вплив тільки тих пороків, яких набуває нитка в процесі свого виготовлення, і які залежать від якості початкового матеріалу.

Аналіз дефектів, що приводять до обриву нитки при переробці, показав, що найбільш вагомими є: слабкі місця на нитці (стоншування) - 32%, шишки і потовщення - 28%, моховитість - 20%. Якщо виникнення перших двох дефектів пояснюється низькою якістю початкової сировини і порушенням технологічного процесу при виробництві ниток (витяжка, кручення), то останній, як наголошувалося вище, виникає безпосередньо при взаємодії ниток з робочими органами технологічного устаткування. За рахунок великої кривизни поверхні останніх значно зростає величина питомого тиску. Це приводить до руйнування окремих філаментов, що знижує міцність нитки на розрив.

При зворотно-поступальних рухах відбувається збиття кінців зруйнованих філаментов і не зароблених при виробництві ниток в шишки і потовщення. Наявність останніх утрудняє рух нитки в нитенатяжних, контрольно-очисних приладах, по робочих органах великої кривизни. Для цього необхідно витратити додаткову роботу на м'яту шишок і потовщень, що приводить до різких скачок натяг і обриву.

Таким чином, при переробці ниток з дефектами, з одного боку, виникають скачки натягу при проходженні шишок і потовщень через прилади для натягу нитки, по робочих органах великої кривизни, а з іншого боку, в місцях стоншування в нитці виникає напруга, рівна розривної [1-14].

При оцінці міцності ниток в умовах переробки проф. Щербаковим В.П. [1] була запропонована функція руйнування, як основна величина для зв'язку напруги і деформації з урахуванням ступеня накопичення пошкоджень.

Дослідження за визначенням впливу швидкості руху комплексних ниток на обривність елементарних волокон дозволили Матуконісу А.В. і Лазауьскасу Ю.Ю. [1] встановити, що для диацетатної і триацетатної ниток обривність із

збільшенням швидкості зростає, а при швидкостях, що перевищують 3,3 м/с, - зменшуються.

Аналізуючи приведену вище інформацію можна зробити вивід про те, що обривність ниток виникає із-за дефектів, які можна розділити на придбані (руйнування окремих філаментов при стиранні і зминанні в зоні контакту нитки з напрямною при переробці, на технологічному устаткуванні) і дефекти, яких набуває нитка в процесі свого виготовлення. Зменшення сумарного опору руху нитки по направляючих і робочих органах дозволить понизити величину напруги в небезпечних перетинах нитки і запобігти її розриву в робочій зоні.

Порівнюючи гістограми обривності і відносного натяг (див. рис. 1.13, 1.14), можна прослідкувати пряму залежність.

Зниження натягу ниток в робочій зоні, як відзначав проф. Окс Б.С., дозволяє зменшити обривність і створює передумови для оптимізації процесів петлеобрання на трикотажних машинах [1, 10].

Представляють інтерес роботи, пов'язані з визначенням ступеня руйнування і обривів ниток при їх взаємодії з макро- і мікронерівностями на поверхні направляючих і робочих органів.

У дослідженні Школи Н.Н. і Антонової А.І. [10] було встановлене зниження міцності капронових ниток при переробці на круглочулочних автоматах на 55%. Наголошується, що при зосередженій дії нитки на певні ділянки отворів фурнітури для спрямування на одноволкнистих нитках з'являються надрізи, глибина яких досягає 60-90 мкм, а в багатоволкнистих нитках відбуваються обриви або затягування елементарних волокон.

Для експерименту на круглочулочном автоматі 34 класи використовували послідовно нові петлеобразующие органи і зношені, із задирками, забоїнами, подряпинами. Дані механічні пошкодження утворюються при аварійних поломках голок, платин. Зниження міцності нитки в процесі того, що в'яже в першому випадку склало 2-3%, а в другому - до 25% .



Враховуючи, що комплексні нитки і пряжа складають в загальному об'ємі всіх ниток, що переробляються, велику частину, зупинимося на аналізі причин обривності елементарних волокон при їх взаємодії з макро- і мікронерівностями.

На рис. 1.16, а приведена розрахункова схема. Умовно можна вважати, що макронерівності - це такі нерівності, у яких геометричні розміри соизмеримы з розрахунковим діаметром нитки або пряжі, а мікронерівності - це такі нерівності, у яких геометричні розміри соизмеримы з розмірами поперечного перетину окремого філаменту. Зменшення шкідливого впливу взаємодії ниток з мікронерівностями (з погляду зменшення обривності за рахунок руйнування зовнішньої поверхні окремих філаментів) досягається шляхом зменшення шорсткості поверхні робочих органів за рахунок додаткової їх обробки. Складніші процеси відбуваються при взаємодії нитки з макронерівностями. Для простоти аналізу вважатимемо, що макронерівність має форму півкола радіусу  $R$ . Кути обхвату окремими філаментами поверхні будуть рівні:  $1 - \pi, i - \varphi, i+1 - \varphi_{i+1}$ . У пропонованій моделі [10] окремі філаменти діаметром  $d$ , враховуючи малу величину зони контакту нитки з направляючою, розташовуватимуться по прямих лініях. Велике значення при визначенні напруженості умов взаємодії комплексних ниток і пряжі з макронерівністю має довжина ковзання волокна. Це довжина зони  $L$ , в якій волокно зберігає можливість переміщатися щодо інших волокон при зминанні.

Проведені дослідження показали, що величина  $L$  може бути визначена залежністю

$$L = F(f, f_1, R) / K,$$

де  $F(f, f_1, R)$  - деяка функція, що визначає залежність між суканням нитки і величиною  $L$ ;  $f$  - коефіцієнт тертя між окремими елементарними волокнами;  $f_1$  - коефіцієнт тертя між окремими елементарними волокнами і направляючою поверхнею;  $K$  - скручування нитки.

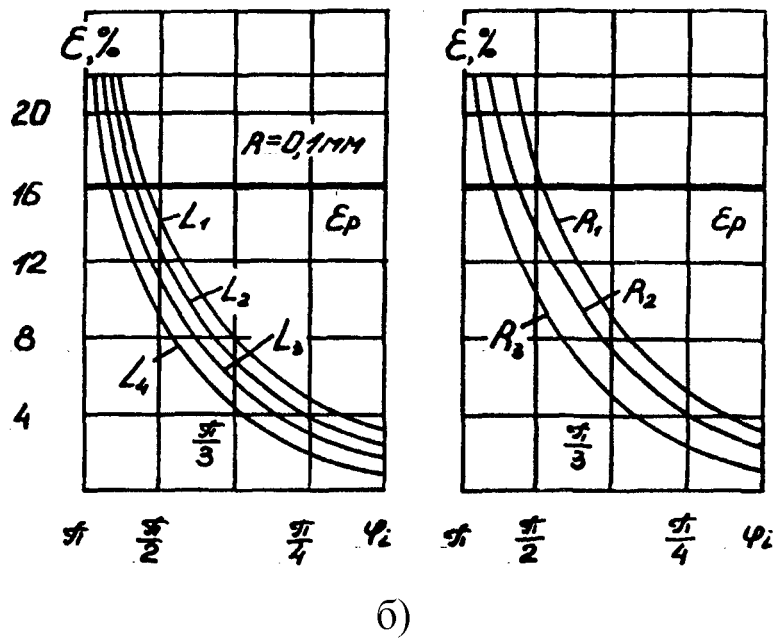
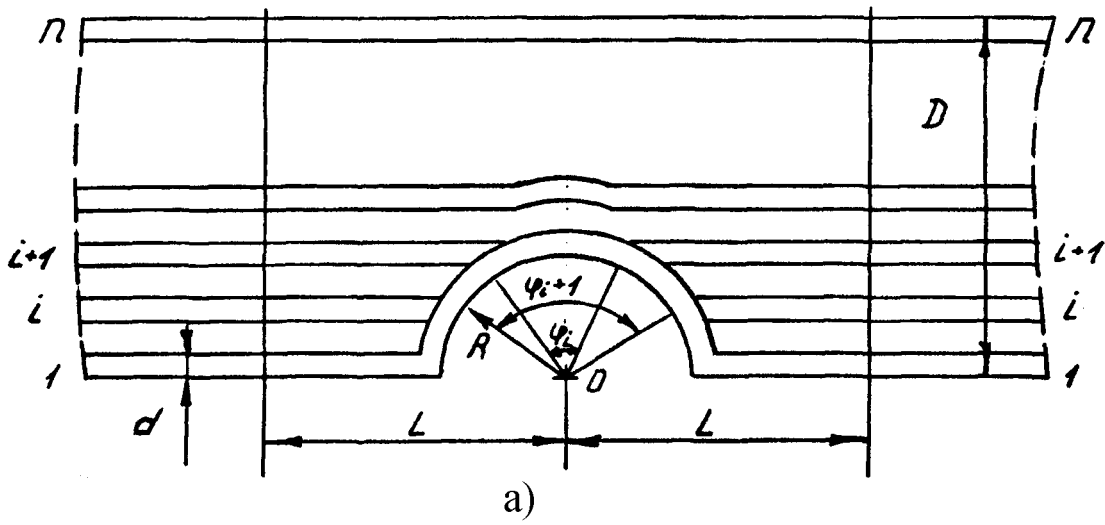


Рис.1.16. Взаємодія ниток з макро- та мікронерівностями поверхні робочих органів

Аналіз виразу показує, що із збільшенням скручування довжина зони  $L$  скорочується. Це пояснюється підвищенням нормального тиску між окремими філаментами.

Абсолютне розривне подовження  $\Delta l$  для  $i$ -го філамента можна виразити в наступному вигляді

$$\Delta l = l_1 - l_0 = \left(R + \frac{d}{2}\right)\varphi_i - 2R \sin \frac{\varphi_i}{2}; l_0 = 2L;$$

$$l_i = 2\left(L - R \sin \frac{\varphi_i}{2}\right) + \left(R + \frac{d}{2}\right)\varphi_i.$$

Тоді відносна деформація розтягування  $i$ -го філамента може бути виражена, як

$$\varepsilon = \frac{\left[\left(R + \frac{d}{2}\right)\varphi_i - 2R \sin \frac{\varphi_i}{2}\right]}{2L} 100.$$

Результати розрахунку по формулі приведені на рис. 1.16 б. Початкові дані бралися для капронової комплексної нитки лінійною щільністю 29 текс пологого скручування. Кількість філаментів дорівнювала 80. Розрахунковий діаметр  $D = k\sqrt{T}$ , де  $k=0,0386$  [1,10].

Діаметр одного філамента визначали по формулі  $d = D / 11 = 0,019$  мм.

Для даного матеріалу нитки величина розривного подовження  $\varepsilon_p = 16\%$ .

Основна умова нормальної взаємодії  $\varepsilon < \varepsilon_p$

Аналіз результатів показав, що із зменшенням сукання ( $L1 > L2 > L3 > L4$ ) величина відносної деформації зменшується, а із збільшенням  $R$  збільшується і наближається до гранично допустимої. З цього можна зробити висновок, що нитки підвищеного скручування більш схильні до руйнувань при взаємодії з макронерівностями. Необхідно відзначити, що значення відносної деформації при  $\varphi_i = \pi$  у реальних умовах менше розрахунковою за рахунок жорсткості філаментів на вигин і їх нещільного прилягання до поверхні макронерівності.

Таким чином, всі реальні нитки володіють певними дефектами і пороками. В процесі переробки на технологічному устаткуванні натяг ниток

зростає і досягає своєї максимальної величини в робочій зоні. Обрив нитки настає тоді, коли за рахунок збільшення натяг (в результаті тертя, зминання в зоні контакту з направляючою) напруга в небезпечному перетині (місці розриву окремих філаментів, стоншування) досягне свого критичного значення.

Отже, зменшення обривності можна досягти двома шляхами: підвищенням якості ниток і пряжі, оптимізацією натягу ниток на всій протяжності пружної системи заправки на основі його мінімізації. Остання мета може бути досягнута на основі комплексних теоретико-експериментальних досліджень процесу взаємодії нитки з направляючими поверхнями з урахуванням м'ятої, жорсткості на вигин, анізотропії фрикційних властивостей.

### Основні виводи по розділу

1. Запропонована класифікація ниток-моделей і реальних ниток. Нитки-моделі I і II модифікації можна класифікувати по структурі, по фізико-механічним властивостям. Нитки-моделі першої модифікації, крім того, класифікуються за формою поперечного перетину.

2. З урахуванням зминання нитки в зоні контакту з направляючою визначені геометричні характеристики точок осі ниток що зминаються:

а) співвідношення між одиничними ортами натуральних тригранників в точках  $A$  і  $A^*$  мають вигляд

$$\begin{aligned}\bar{\tau}_* &= \bar{\tau}_0 + \frac{\partial \bar{U}}{\partial S}; \bar{\nu}_* = \bar{\nu}_0 \frac{\rho_1}{\rho_0} + \rho_1 \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial S^2}; \\ \bar{\beta}_* &= \bar{\beta}_0 \frac{\rho_1}{\rho_0} + \frac{\partial \bar{U}}{\partial S} \times \bar{\nu}_0 \frac{\rho_1}{\rho_0} + \bar{\tau}_0 \times \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial S^2} \rho_1 + \frac{\partial \bar{U}}{\partial S} \times \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial S_0^2} \rho_1.\end{aligned}$$

б) умови на переміщеннях, виражені через складові вектора деформації, для точок осі нитки що зминається

$$\frac{\partial U_\tau}{\partial S} - q_0 U_\nu + p_0 U_\beta = 0; \frac{\partial U_\nu}{\partial S} + q_0 U_\tau - r_0 U_\beta = \beta; \frac{\partial U_\beta}{\partial S} - p_0 U_\tau + p_0 U_\nu = -\alpha.$$

в) головні компоненти кривизни осі нитки

$$q_1 = \frac{\cos \Psi_0}{\rho_0} + \frac{\partial \beta}{\partial S} + \frac{\alpha}{\rho_{01}} + \alpha \frac{\partial \Psi_0}{\partial S};$$

$$p_1 = \frac{\sin \Psi_0}{\rho_0} + \frac{\partial \alpha}{\partial S} - \frac{\beta}{\rho_{01}} - \beta \frac{\partial \Psi_0}{\partial S};$$

$$r_1 = \frac{1}{\rho_0} + \frac{\partial \Psi_0}{\partial S} - \alpha \frac{\cos \Psi_0}{\rho_0} + \frac{\sin \Psi_0}{\rho_0} \beta.$$

3. Визначені швидкості і прискорення і закони їх розподілу з урахуванням змінання в зоні контакту

$$\vec{V}_* = \vec{V} + \frac{\partial \vec{U}}{\partial t}; \vec{W}_* = \frac{\partial \vec{V}_*}{\partial t} = \vec{\omega}_e \times \vec{V}_* + \frac{\partial \vec{V}_*}{\partial t}; \frac{\partial \vec{V}_*}{\partial S} = \vec{\Omega} \times \vec{V}_* + \frac{\partial \vec{V}_*}{\partial S} = -\omega_2 \vec{b}_* + \omega_3 \vec{n}_*;$$

$$\vec{\Omega} \times (\vec{V} + \vec{U}') + \frac{\partial (\vec{V} + \vec{U}')}{\partial S} = (\vec{\omega}_0 + \vec{\omega}_u) \times \vec{\tau}_*;$$

$$\frac{\partial \vec{W}_*}{\partial S} = \vec{\Omega} \times \vec{W}_* + \frac{\partial \vec{W}_*}{\partial S} = \frac{\partial \vec{\omega}_e}{\partial t} \times \vec{\tau}_* + \vec{\omega}_e \times (\vec{\omega}_e \times \vec{\tau}_*).$$

Отримані відповідні проекції даних векторних рівнянь на осі головного тригранника.

4. Складена система диференціальних рівнянь, що описують рух елемента нитки по направляючої великої кривизни з урахуванням змінання, жорсткості на вигин і кручення нитки

$$\frac{\partial \vec{R}}{\partial S} + \vec{R}_0 - \vec{\Phi}_* = 0; \frac{\partial \vec{M}}{\partial S} + \vec{M}_0 + \vec{\tau}_* \times \vec{Q} - \vec{M}_\Phi = 0; \vec{\tau}_* \times \vec{Q} = -Q_3 \vec{n}_* + Q_2 \vec{b}_*;$$

$$\vec{M}_\Phi = \gamma_u \{ J_{\tau_0} \pm \Delta_\tau(\bar{U}) \} \varepsilon \vec{\tau}_* + \{ J_{n_0} \pm \Delta_n(\bar{U}) \} \varepsilon_2 \vec{n}_* + \{ J_{b_0} \pm \Delta_b(\bar{U}) \} \varepsilon_3 \vec{b}_* \};$$

$$\frac{\partial \vec{R}}{\partial S} = \left( \frac{\partial P}{\partial S} - Q_2 q_1 + Q_3 p_1 \right) \vec{\tau}_* + \left( \frac{\partial Q_2}{\partial S} + P q_1 + Q_3 r_1 \right) \vec{n}_* + \left( \frac{\partial Q_3}{\partial S} - P p_1 + Q_2 r_1 \right) \vec{b}_*;$$

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial S} = \left( \frac{\partial M_k}{\partial S} - M_{u2} q_1 + M_{u3} p_1 \right) \vec{\tau}_* + \left( \frac{\partial M_{u2}}{\partial S} + M_k q_1 + M_{u3} r_1 \right) \vec{n}_* +$$

$$+ \left( \frac{\partial M_{u3}}{\partial S} - M_k p_1 + M_{u2} r_1 \right) \vec{b}_*;$$

$$\vec{\Phi}_* = T \vec{W}_* = T \left( \frac{\partial \vec{V}_*}{\partial t} + \vec{\omega}_e \times \vec{V}_* \right); N_i = b_i E_{i1} \delta_i (1 - b_{i3} \delta_i^{b_{i4}}) + \eta_i \delta_i^{b_{i6}} (1 - b_{i5} \delta_i^{b_{i6}}); i = 1, 2, 3.$$

5. Проведено теоретичне дослідження процесу взаємодії нитки з направляючою поверхнею з урахуванням деформації останньої. Визначені основні геометричні і кінематичні параметри точок осі нитки.

6. З використанням ниток-моделей II модифікації розглянутий випадок руху по направляючій поверхні малої кривизни. Отриманий вираз

для натягу ведучої гілки нитки з урахуванням зменшення кута обхвату направляючої за рахунок зминання в зоні контакту.

7. Всі реальні нитки володіють певними дефектами і пороками. В процесі переробки на технологічному устаткуванні натяг ниток зростає і досягає своєї максимальної величини в робочій зоні. Обрив нитки настає тоді, коли за рахунок збільшення натягу (в результаті тертя, зминання в зоні контакту з направляючою) напруга в небезпечному перетині (місці розриву окремих філаментів, стоншування) досягне свого критичного значення.

## **2. ВЗАЄМОДІЯ НИТОК З НАПРАВЛЯЮЧИМИ ПОВЕРХНЯМИ**

Результати теоретичних досліджень, приведені в першому розділі, використовувалися нами для вирішення цілого ряду конкретних завдань. При їх рішенні ми прагнули отримувати відповіді, зручні для подальшого використання в інженерних розрахунках.

При переробці на технологічному устаткуванні нитки взаємодіють з направляючими поверхнями малої і великої кривизни. Залежно від умов взаємодії [1,2,35-37] змінюється і характер поведінки об'єкту дослідження. Так, визначення натягу і форми осі ниток, що взаємодіють з напрямною, що деформується, відрізняється по своєму підходу від випадку, коли нитки взаємодіють з напрямною, що не деформується.

Велике значення має визначення поведінки ниток в різних силових полях. Від цього залежить вибір тієї або іншої системи диференціальних рівнянь, що описують рівновагу елемента нитки, визначення граничних і початкових умов.

Необхідно відзначити, що більшість отриманих результатів в даному розділі є оригінальними, раніше в літературі не описаними. Основною метою при написанні даного розділу, який ставили автор, було застосування основ механіки ниток що зминаються до безпосереднього дослідження технологічних процесів легкої і текстильної промисловості на базі вивчення різних випадків взаємодії ниток з направляючими поверхнями.

### **2.1. Теоретичне дослідження процесу взаємодії нитки з направляючими поверхнями малої кривизни при її подовжньому і поперечному ковзанні**

При вирішенні різних практичних завдань, дуже часто, має місце взаємодія нитки з направляючою поверхнею малої кривизни, коли розрахунковий радіус поперечного перетину нитки-моделі I модифікації

(надалі просто нитка) значно менше радіусу кривизни направляючої поверхні  $r \ll R$ .

Зміна радіусу кривизни приводить до зміни величини коефіцієнта тертя. На цю обставину звертали свою увагу Хвальковський Н.В. Це пояснюється змінною величиною питомого тиску на поверхні контакту, що приводить до зміни умов взаємодії поверхонь пари, що третяся. Не останню роль, на зміну величини коефіцієнта тертя, грає натяг нитки і швидкість її руху. Як це було встановлено при постановці завдань дослідження, наявні відомості з даної проблеми носять суперечливий характер.

На нашу думку таку невідповідність можна пояснити недосконалістю експериментальних установок і недооцінкою деяких чинників, які є визначальний. Так недооцінка впливу м'ятої нитки може привести до значної помилки. Цю обставину необхідно враховувати при розробці експериментальної установки і проведенні теоретичних досліджень.

Вельми характерний, що для ниток що зминаються, при визначенні величини коефіцієнта тертя, необхідно враховувати величину їх попереднього зсуву щодо тієї, що направляє. На цю обставину звертав увагу проф. Мігушов І.І.[1]. Нами, при проведенні теоретичних досліджень в першому розділі, це враховувалося шляхом введення відповідної проекції вектора переміщення  $\vec{U}$  на дотичну вісь головного тригранника.

При визначенні величини натягу ведучої галузь нитки характер зміни кривизни направляючої поверхні (постійна або змінна кривизна) може істотним чином вплинути на кінцевий результат.

Таким чином, при дослідженні взаємодії ниток з направляючими поверхнями малої кривизни необхідно отримати розрахункові рівняння для наступних основних випадків: гнучка нитка взаємодіє з направляючої малої кривизни змінного радіусу; жорстка на вигин нитка взаємодіє з



направляючої малої кривизни постійного радіусу; гнучка нитка здійснює поперечний рух по нахиленій направляючій постійної кривизни.

### 2.1.1. Визначення натяг ведучої гілки нитки у разі кривизни змінного радіусу

Дослідження процесу взаємодії нитки з напрямною тісно пов'язане з визначенням величини коефіцієнта тертя. Його залежність від величини натягу веденої гілки і радіусу кривизни направляє виражається формулою

$$\mu = \frac{a}{\left(\frac{P_0}{\rho}\right)^b}, \quad (2.1)$$

де  $P_0$  - натяг веденої гілки;  $\rho$  - радіус кривизни тієї, що направляє;  $a$ ,  $b$  - досвідчені коефіцієнти (для кожної нитки мають своє певне значення [1,10]).

Формула (2.1) використовується при теоретичному описі процесу взаємодії гнучкої нитки з направляючої змінної кривизни. Розрахункова схема приведена на мал. 2.1, а.

Для визначення нелінійної залежності коефіцієнта тертя від вказаних вище чинників необхідно було виконати серію експериментальних досліджень. План проведення експерименту і основні результати приведені в 3 розділі.

Для капронової нитки 28 текс (XV, див. главу 3), віскозній комплексній нитки 16,7 текс (XIV), вовняної пряжі 29,9 (XII), бавовняної пряжі 27,6 текс (XI), віскозної штапельної пряжі 28,8 текс (XIII) були визначені коефіцієнти  $a$  і  $b$ . Їх значення відповідно були рівні: XV -  $a= 0,1765$ ,  $b= 0,1186$ ; XIV -  $a= 0,1580$ ,  $b= 0,1160$ ; XII -  $a= 0,1330$ ,  $b = 0,0910$ ; XI -  $a= 0,1656$ ,  $b = 0,0590$ ; XIII -  $a= 0,1470$ ,  $b= 0,0690$ .

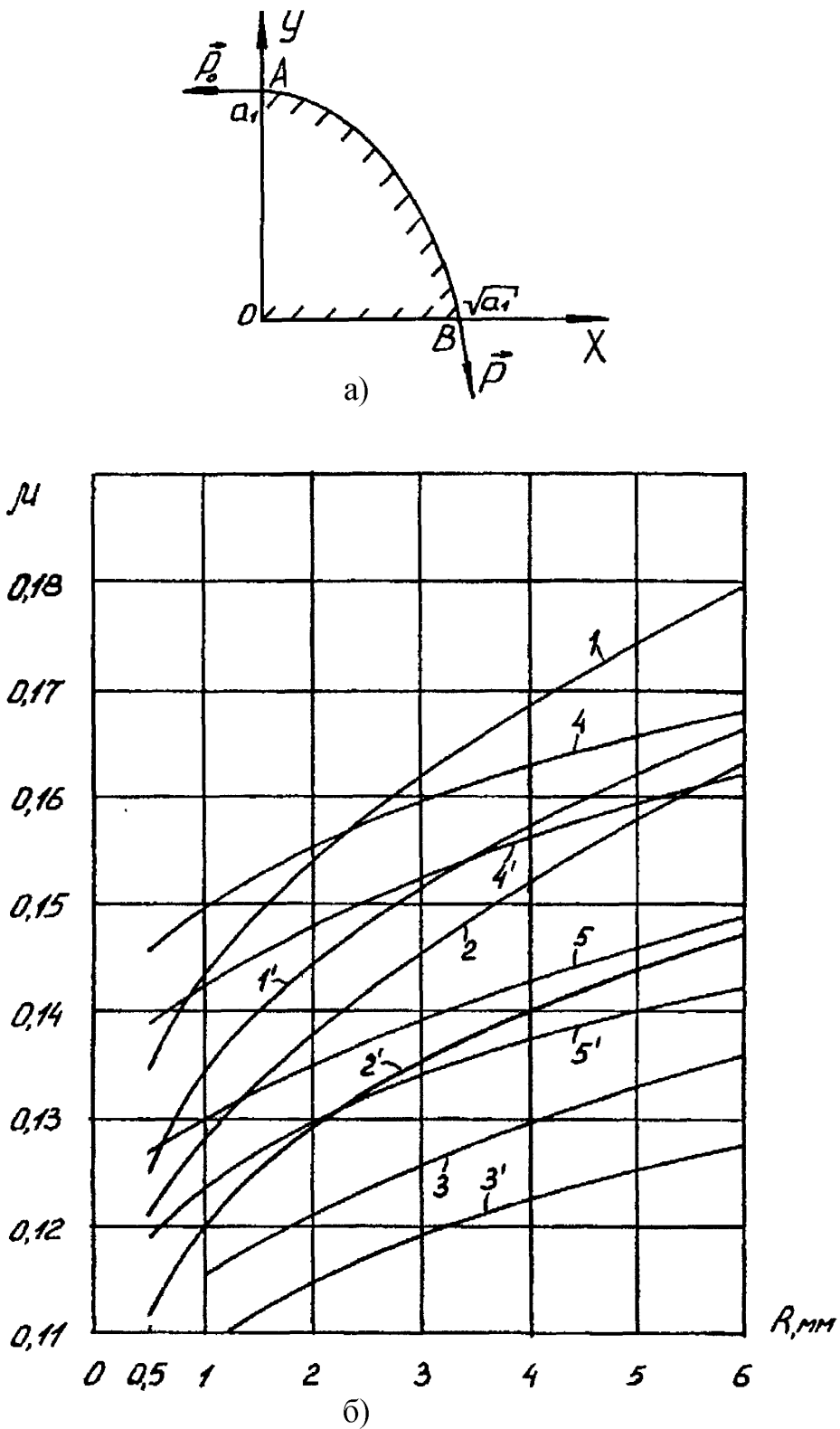


Рис.2.1. Розрахункова схема і залежності коефіцієнта тертя від кривизни напрямної

Використовуючи отримані дані, по формулі (2.1) були побудовані розрахункові залежності, приведені на рис. 2.1, б. Нитки підбиралися з умовою відносної рівності розрахункових діаметрів їх поперечних перетинів. Величина заправного натягу змінювалася в межах 5-10 сН, а радіус кривизни направляючої - від 0,5 до 6 мм.

На рис. 2.1, би приведені і експериментальні значення величини коефіцієнта тертя. Помилка при цьому не перевищує 2-6%, що дозволяє використовувати формулу (2.1) не тільки для якісного, але і для кількісного аналізу процесу взаємодії нитки з направляючої змінної кривизни.

Криві 1, 1г були отримані для капронової нитки (XV) (штрихом позначена крива, відповідна заправному натягненню 10 сН, а без штриха - 5 сН), криві 2, 2г - для віскозної комплексної нитки (XIV), криві 3, 3г - для вовняної пряжі (XII), криві 4, 4г - для бавовняної пряжі (XI) криві 5, 5г - для віскозної штапельної пряжі (XIII).

Аналіз приведених залежностей показує, що при збільшенні натягу веденої гілки нитки відбувається зменшення величини коефіцієнта тертя. При зменшенні радіусу кривизни напрямної, у всіх випадках, відбувається зменшення величини коефіцієнта тертя. Це пояснюється зменшенням площі контакту.

Перейдемо до визначення залежності зміни натягу нитки, яка рухається по направляючій змінної кривизни (див. рис. . 2.1, а).

Для опису рівноваги елементу нитки скористаємося основною системою диференціальних рівнянь (1.68) -(1.70) (див. розділ 1).

Вважатимемо, що нитка входить на направляючу поверхню  $F(x,y)=0$  у точці  $A$  з натягом  $P_0$ , а сходиться в точці  $B$  з деяким невідомим натягом  $P$  [12]. Хай нитка не розтягується, сила тертя підкоряється закону Амонтона, кривизна поверхні невелика і, отже, радіус кривизни значно більше радіусу поперечного перетину нитки. Останнє твердження дозволяє нехтувати

жорсткістю на вигин і змінанням нитки в зоні контакту. Тоді,  $Q=Mu=Mk=0, Fb=M\theta=0, p1=0=r1, \omega2=0=\omega3, (V'^{*}\tau)=(V'^{*}n)=(V'_{*b})=0=\omega1$ .

З урахуванням зроблених допущень і формули (2.1) система диференціальних рівнянь (1.68) прийме вигляд

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial S} - \mu N &= 0; \\ \frac{P}{\rho(S)} - N &= 0; \\ \mu &= \frac{a\rho^b(S)}{P_0^b}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

де  $P$  - натяг нитки;  $N$  - нормальна питома реакція поверхні;  $\rho(S)$  - радіус кривизни.

Вирішення системи рівнянь (2.2) дозволяє отримати наступне диференціальне рівняння

$$\frac{\partial P}{P} = \frac{a\rho^{b-1}}{P_0^b} \partial S. \quad (2.3)$$

Для інтегрування рівняння (2.3) виразимо залежність між радіусом кривизни і дуговою координатою наступною статечною функцією

$$s = a_1(b_1\rho^{c_1} - 1), \quad (2.4)$$

де  $a_1, b_1, c_1$  - деякі постійні коефіцієнти.

Тоді диференціал дугової координати буде рівний

$$\partial S = a_1 b_1 c_1 \rho^{c_1-1} \partial \rho.$$

З урахуванням останнього виразу диференціальне рівняння (2.3) прийме вигляд

$$\frac{\partial P}{P} = \frac{a a_1 b_1 c_1}{P_0^b} \rho^{(b+c_1-2)} \partial \rho.$$

Після його інтегрування

$$P = P_0 \exp \left\{ \frac{a a_1 b_1 c_1}{P_0^b (b + c_1 - 1)} \left[ \rho^{(b+c_1-1)} - \rho_0^{(b+c_1-1)} \right] \right\}, \quad (2.5)$$

де  $\rho_0$  - радіус кривизни поверхні в точці входу  $A$  нитки на напрямній.

Для визначення постійних коефіцієнтів  $a1, b1, c1$  можна скористатися наступною методикою. Відомі формули [1,10] для визначення радіусу кривизни  $\rho$  і дугової координати  $S$  через декартові координати

$$\rho = \frac{[1 + y'^2]^{\frac{3}{2}}}{|y''|}; S = \int \sqrt{1 + y'^2} dx.$$

Маючи рівняння  $F(x,y)=0$  направляючій поверхні, визначуваний  $\rho=\rho(x)$  і  $S=S(x)$ . Після цього виключаємо з них  $x$  і визначаємо функцію  $S=S(\rho)$ . Потім, прирівнюючи цю функцію відносно  $S$  до рівняння (2.4), отримаємо

$$a_1(b_1\rho^{c_1} - 1) = S(\rho). \quad (2.6)$$

Змінюючи радіус кривизни направляючої поверхні, отримаємо три рівняння, з яких можна визначити коефіцієнти  $a1, b1, c1$ .

$$a_1(b_1\rho_1^{c_1} - 1) = S_1(\rho_1); a_1(b_1\rho_2^{c_1} - 1) = S_2(\rho_2); a_1(b_1\rho_3^{c_1} - 1) = S_3(\rho_3). \quad (2.7)$$

Як приклад визначимо натяг нитки при її русі по ділянці параболи (див. рис. 2.1, а)

$$F(x, y) = y - 9 + x = 0.$$

Радіус кривизни і дугова координата визначаються по формулах

$$\rho = \frac{(1 + 4x^2)^{\frac{3}{2}}}{2}; S = \frac{x\sqrt{1 + 4x^2}}{2} + \frac{1}{4} \ln(2x + \sqrt{1 + 4x^2}).$$

Шукана функція  $S=S(\rho)$  буде отримана шляхом виключення  $x$  з двох останніх виразів

$$S(\rho) = \frac{\left[ (2\rho)^{\frac{2}{3}} - 1 \right]^{\frac{1}{2}}}{4} (2\rho)^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{4} \ln \left\{ \left[ \left[ (2\rho)^{\frac{2}{3}} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} + (2\rho)^{\frac{1}{3}} \right\}.$$

Вирішуючи останнє рівняння сумісно з (2.6), (2.7), набудемо значень шуканих коефіцієнтів:  $a1 = -0,092$ ;  $b1 = -4,980$ ;  $c1 = 0,6449$ .

Проведемо порівняльний аналіз розрахунку натяг по формулі (2.5) і відомій формулі Л.Ейлера

$$P = P_0 e^{\mu\alpha}. \quad (2.8)$$

Формула (2.8) отримана для направляючої постійної кривизни без урахування зміни коефіцієнта тертя від радіусу кривизни направляючої.

Розрахунок проводитимемо для капронової комплексної нитки (XV). З урахуванням визначених раніше коефіцієнтів  $a$  і  $b$ , при натягу веденої гілки нитки  $P_0=10$  сН, по формулі (2.5)  $P=11,5$  сН.

Для визначення натягу по формулі (2.8) необхідно знати величину кута обхвату ниткою напрямної  $\alpha$ . Він визначається по формулі

$$\alpha = \int_0^x \frac{y''}{1+y'^2} dx = \operatorname{arctg} 2x.$$

В умовах нашого завдання  $\alpha=1,406$  радіан. Коефіцієнт тертя  $\mu=0,214$  - постійний коефіцієнт тертя без урахування впливу кривизни поверхні (величина узята з довідника для контактної пари капронова комплексна нитка - сталева напрямна). Остаточно, по формулі (2.8), було знайдено значення  $P=13,5$  сН.

Аналіз отриманих результатів показав, що помилка при визначенні натягу по формулі (2.8) досягає 18%, що неприпустимо в розрахунках при кількісному аналізі процесу. Дане твердження підтверджують і результати експерименту (див. розділ 3).

Звідси можна зробити висновок, що при визначенні натягу ниток, рухомих по направляючих змінної кривизни, необхідно враховувати зміну величини коефіцієнта тертя.

Забезпечення необхідного закону зміни натягу нитки, рухомій по направляючій поверхні, дозволяє оптимізувати процес петле утворення, понизити обривність.

Досліджуємо процес взаємодії нитки з напрямною, якщо закон зміни натяг від дугової координати, в загальному випадку, можна представити у вигляді

$$P = P_0(1 + a_1 s^{a_{22}}), \quad (2.9)$$

де  $s$  - дугова координата (відлічується від точки входу нитки на направляючу);  $a_{11}$ ,  $a_{22}$  - відповідні коефіцієнти, визначувані для кожного конкретного закону розподілу.

На рис. 2.2, а представлені криві закону зміни натягу від дугової координати залежно від значень постійних коефіцієнтів  $a_{11}$  і  $a_{22}$ .

Криві ( $a_{22}>1$ ,  $a_{11}>0$ ), ( $a_{22}=1$ ,  $a_{11}>0$ ) і ( $a_{11}>0$ ,  $a_{22}<1$ ) відповідають випадку ковзання нитки по нерухомій направляючій (див. рис. 2.2, б). Пряма ( $a_{11}=0$ ) відповідає випадку, коли натяг ведучої гілки дорівнює натягу веденої гілки  $P=P_0$ . Випадок, коли коефіцієнт  $a_{22}=0$ , відповідає взаємодії нитки (див. рис. 2.2, в) з рухомою направляючою, рухомою поступально із швидкістю  $V$ .

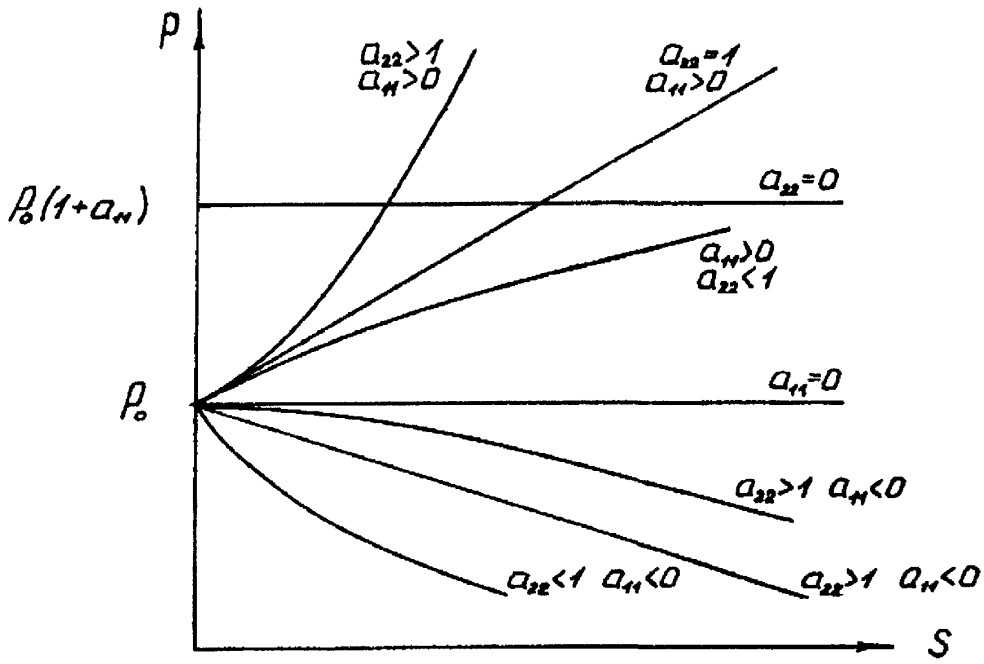
Криві ( $a_{22}>1$ ,  $a_{11}<0$ ), ( $a_{11}=1$ ,  $a_{11}<0$ ) і ( $a_{22}<1$  і  $a_{11}<0$ ) закону зміни натягу відповідають випадку взаємодії нитки (див. рис. 2.2, г) з напрямною, яка переміщається убік, протилежно вектору швидкості нитки  $V_n$  (наприклад, пара нитка-ролик, що обертається з кутовою швидкістю  $\omega_n$ ).

Визначимо, з урахуванням залежності (2.9), закон зміни радіусу кривизни направляючої поверхні, який дозволяє забезпечити необхідну залежність  $P=f(S)$ . Основна система диференціальних рівнянь виходить шляхом спрощення (1.68) -(1.70) при  $Q_3=M_k= M_{n2}=0$ ,  $P_1=0=r_1$ ,  $F_b=M_0=0$ ,  $\omega_e=0=V^*$

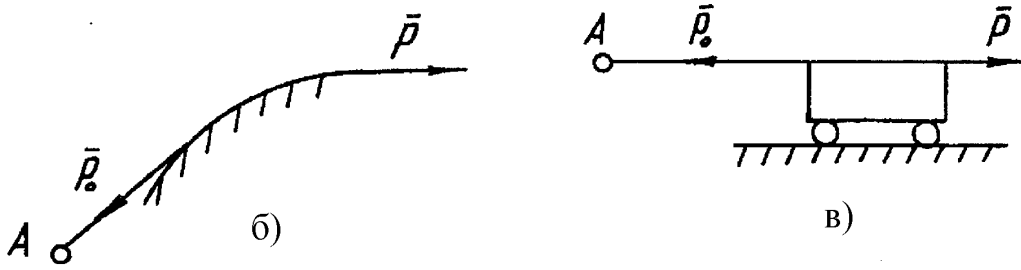
$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial S} - q_1 Q_2 - \mu N = 0; \quad \frac{\partial P}{\partial S} = P_0 a_{11} a_{22} s^{a_{22}-1}; \\ \frac{\partial Q_2}{\partial S} + q_1 P - N = 0; \quad \mu = \frac{a \rho^b(S)}{P_0^b} = \frac{a}{(q_1 P_0)^b}; \\ \frac{\partial M_{u3}}{\partial S} + Q_2 = 0; \quad q_1 = \frac{1}{\rho(S)}, \\ M_{u3} = B q_1; \end{aligned} \quad (2.10)$$

де  $B$  - коефіцієнт жорсткості на згин.

Вирішуючи систему диференціальних рівнянь (2.10), отримаємо

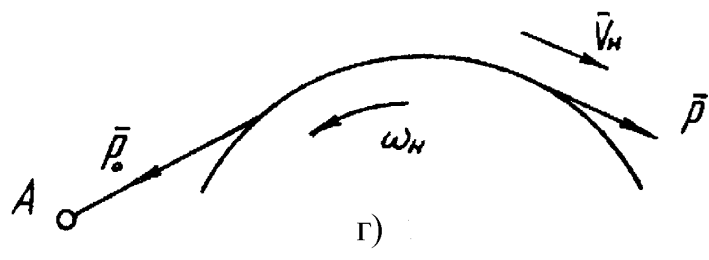


а)



б)

в)



г)

Рис.2.2. Зміна натягу нитки в залежності від величини дугової координати

$$P_0 a_{11} a_{22} s^{(a_{22}-1)} + q_1 B \frac{\partial q_1}{\partial S} - \frac{a}{(q_1 P_0)^{b-1}} (1 + a_{11} s^{a_{22}}) + \frac{a}{(q_1 P_0)^b} B \frac{\partial^2 q_1}{\partial S^2} = 0. \quad (2.11)$$

Після інтегрування вираз для кривизни поверхні матиме вигляд



$$q_1 = \frac{1}{\rho(S)} = \sqrt{\frac{2}{8}} \sqrt{\frac{a q_1}{P_0^{b-1}} \int q_1^{-(b-1)} (1 + a_{11} s^{a_{22}}) \partial S - \frac{a B}{P_0^b} \int q_1^b \partial \left( \frac{\partial}{\partial S} \right) - P_0 a_{11} s^{a_{22}} + c},$$

де  $z$  - довільна постійна інтегрування.

Якщо вважати нитку абсолютно гнучкою, то тоді  $B = 0$  і вираз (2.11) спроститься

$$P_0 a_{11} a_{22} s^{(a_{22}-1)} = \frac{a \rho^{(b-1)}}{P_0^{b-1}} (1 + a_{11} s^{a_{22}}),$$

або остаточно

$$\rho = \left[ \frac{P_0^b a_{11} a_{22} s^{(a_{22}-1)}}{a(1 + a_{11} s^{a_{22}})} \right]^{\frac{1}{b-1}}. \quad (2.12)$$

Визначимо значення радіусу кривизни напрямної для капронової нитки (XV), віскозної комплексної нитки (XIV), вовняної пряжі (XII), бавовняної пряжі (XI), віскозної штапельної пряжі (XIII). Закони зміни натягу характеризувалися кривими ( $a_{22} > 1, a_{11} > 0$ ), ( $a_{22} = 1, a_{11} > 0$ ) і ( $a_{11} > 0, a_{22} < 1$ ) (нитка рухається по нерухомій напрямній). Необхідні значення коефіцієнтів  $a$  і  $b$  приведені вище. Отримані результати, для  $P_0 = 10$  сН, представлені в таблиці 2.1.

Аналіз показав, що для випадків, коли  $a_{11} = 1, a_{22} \leq 1$  значення радіусу кривизни зростає із збільшенням дугової координати. Це приводить до зменшення величини питомого тиску в зоні контакту і зниження сили тертя. Найбільш прийнятним, з погляду нормалізації технологічних процесів і зменшення обривності, є випадок, коли  $a_{11} = 1, a_{22} < 1$ .

### 2.1.2. Визначення натягу ведучої гілки нитки у разі постійного радіусу кривизни

Велика кількість спрямовувачів нитки, робочих органів технологічних машин в поперечному перетині мають круглу форму або близьку до неї. У зв'язку з цим виникає необхідність визначення натягу ведучої гілки нитки, яка взаємодіє з направляючої постійної кривизни. Для ідеально гнучких ниток залежність зміни натягу встановлена Л.Ейлером - рівняння (2.8).

Таблиця 2.1. Значення радіусів кривизни для різних законів зміни натяг

Нитка	Значення коефіцієнтів	Радіус кривизни, см						
		$S$ , мм						
		0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Капронова нитка (XV)	$a_{11}=1 a_{22}=2$	0	0,10	0,11	0,12	0,15	0,17	0,20
	$a_{11}=1 a_{22}=1$	0	0,18	0,25	0,32	0,39	0,47	0,54
	$a_{11}=1 a_{22}=0,5$	0	0,31	0,54	0,77	0,99	1,22	1,44
Віскозна комплексна нитка (XIV)	$a_{11}=1 a_{22}=2$	0	0,09	0,10	0,11	0,13	0,15	0,18
	$a_{11}=1 a_{22}=1$	0	0,16	0,22	0,29	0,35	0,42	0,48
	$a_{11}=1 a_{22}=0,5$	0	0,27	0,48	0,69	0,89	1,08	1,28
Вовняна пряжа (XII)	$a_{11}=1 a_{22}=2$	0	0,08	0,09	0,10	0,12	0,14	0,16
	$a_{11}=1 a_{22}=1$	0	0,15	0,19	0,25	0,31	0,37	0,43
	$a_{11}=1 a_{22}=0,5$	0	0,24	0,43	0,59	0,77	0,93	1,09
Бавовняна пряжа (XI)	$a_{11}=1 a_{22}=2$	0	0,12	0,13	0,15	0,17	0,19	0,23
	$a_{11}=1 a_{22}=1$	0	0,21	0,28	0,35	0,43	0,51	0,58
	$a_{11}=1 a_{22}=0,5$	0	0,34	0,58	0,81	1,03	1,25	1,46
Віскозна штапельна пряжа (XIII)	$a_{11}=1 a_{22}=2$	0	0,10	0,11	0,12	0,14	0,17	0,19
	$a_{11}=1 a_{22}=1$	0	0,18	0,24	0,30	0,37	0,44	0,50
	$a_{11}=1 a_{22}=0,5$	0	0,29	0,50	0,69	0,89	1,08	1,27

Проте, для ниток, що володіють підвищеною жорсткістю на вигин, розрахунок натягу необхідно проводити з урахуванням зменшення кута обхвату. До таких ниток можна віднести сталевий дріт, різні мононитки, волосінь, а також комплексні нитки і пряжу підвищеного скручування. Збільшення жорсткості на вигин комплексних ниток і пряжі пояснюється тим, що із збільшенням скручування зростає питомий тиск між окремими філаментами, що приводить до збільшення сил тертя, які перешкоджають переміщенню елементарних волокон при вигині. Так мінімальне значення

коефіцієнта жорсткості для капронової комплексної нитки 28 текс (при скручуванні, прагнучому до нуля) дорівнює  $4,3 \cdot 10 \text{ сНмм}^2$ , а максимальне (при скручуванні, близькому до критичного, при якій відбувається руйнування нитки) дорівнює  $11,2 \text{ сНмм}^2$ .

При теоретичному визначенні величини коефіцієнта жорсткості на вигін необхідно враховувати нелінійний характер між кривизною осі зігнутої нитки і внутрішньою напругою в перетині. Проте в більшості випадків дослідниками приймається пропорційна залежність між моментом, що вигинає, і кривизною.

Великий вплив на умови взаємодії жорсткої нитки з напрямною надає силова схема навантаження. Від того або іншого конкретного випадку навантаження залежить порядок визначення величини реального кута обхвату, натяг ведучої галузь нитки.

При вивченні даного процесу необхідно розрізнити теоретичний  $\varphi p$  і дійсний  $\gamma$  кут обхвату. Причому, якщо не враховувати змінання в зоні контакту нитки з напрямною, теоретичний кут обхвату буде більший реального  $\varphi p > \gamma$ . Зменшення кута обхвату пояснюється жорсткістю нитки на вигін [1,10].

Таким чином, враховуючи, що досліджень в даній області проводилося мало, а отримані дані носять суперечливий характер, на що зверталася увага в роботах [1,35-37], встало завдання описати процес взаємодії жорсткої на згин, нитки що незминається з циліндричною направляючою поверхнею.

На рис. 2.3, а показана розрахункова схема. Вважатимемо нитку пружною на вигін. Методика рішення даної задачі приведена для веденої гілки нитки. Для ведучій гілки вона аналогічна.

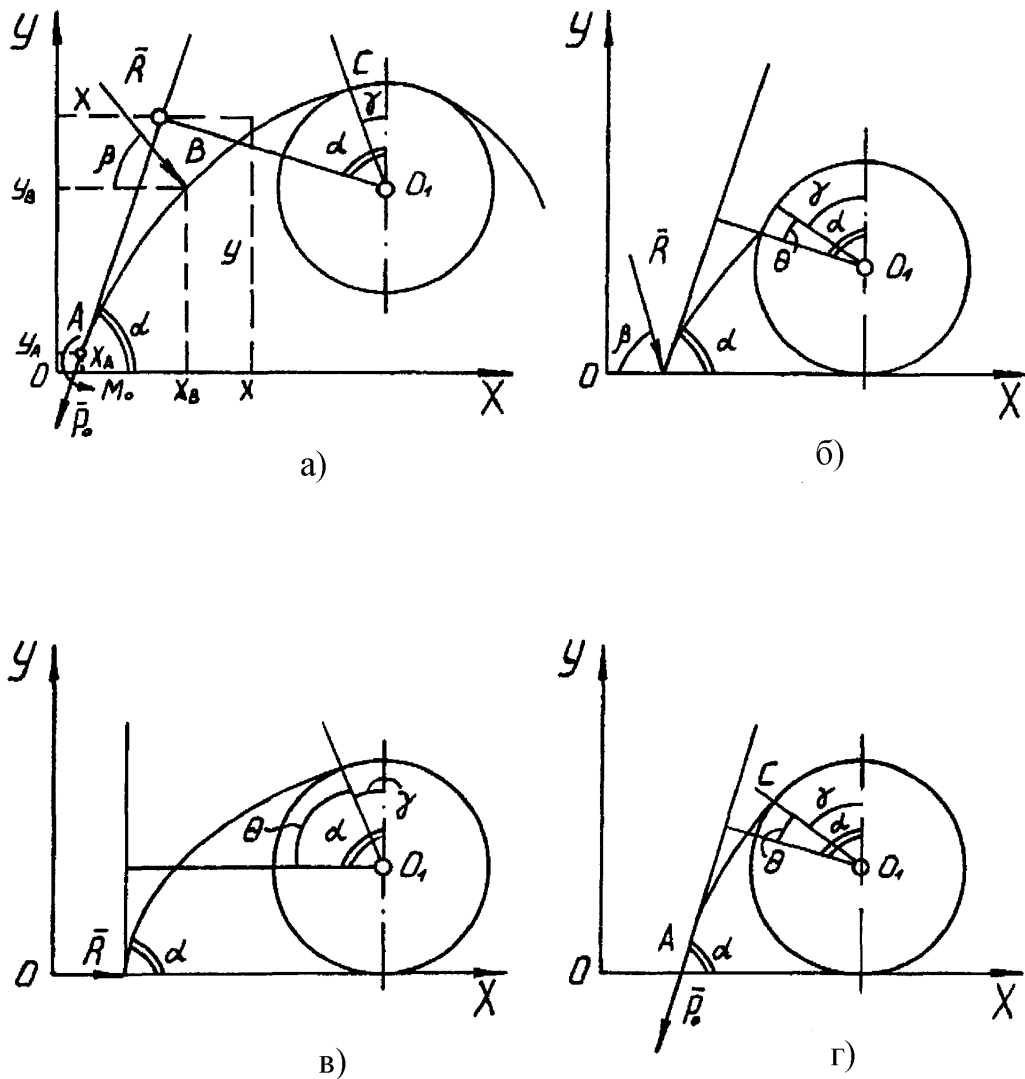


Рис.2.3. Розрахункові схеми визначення кута обхвату жорсткої на згин нитки циліндричної напрямної

На ведену гілку нитки, в загальному випадку, діє натяг  $P_0$ , постійний момент  $M_0$ , деяка зовнішня сила  $R$ . Кути нахилу даних сил до осі  $x$  позначимо через  $\alpha$  і  $\beta$ . Вважатимемо, що величини сил і моментів відомі. У точці  $A$  кривизна нитки рівна нулю ( $q_A=0$ ), а в точці  $C$

$$q_* = \frac{1}{R_{\perp}} + \lambda,$$

де  $R_{\perp}$  - радіус циліндра;  $\lambda$  - радіус поперечного перетину нитки.

Тоді диференціальне рівняння для опису кривизни в довільній точці веденої гілки нитки, з координатами  $x$  і  $y$ , прийме вигляд

$$\begin{aligned} \frac{\partial \gamma}{\partial S} = & -\frac{M_0}{B} + \frac{P_0}{B} [-\sin \alpha (x - x_a) + \cos \alpha (y - y_a)] + \\ & + \frac{R}{B} [-\cos \beta (y - y_b) + \sin \beta (x - x_b)], \end{aligned} \quad (2.13)$$

де  $\gamma$  - кут нахилу дотичної до осі  $x$ ;  $S$  - дугова координата точки прикладання сили  $R$  на осі нитки;  $B=EJ$  - коефіцієнт жорсткості нитки на вигин;  $x_A, y_A, x_B, y_B$  - координати точок додатку сил  $P_0, R$ .

Необхідно відзначити, що відношення

$$\frac{d\gamma}{dS} = q, \quad (2.14)$$

а кут  $\gamma$  є фактичним кутом обхвату веденою гілкою направляючої.

Продиференціюємо рівняння (2.13) по дуговій координаті

$$\frac{d^2 \gamma}{dS^2} = \frac{dq}{dS} = \frac{q dq}{d\gamma} = \frac{P_0}{B} \left[ -\sin \alpha \frac{dx}{dS} + \cos \alpha \frac{dy}{dS} \right] + \frac{R}{B} \left[ -\cos \beta \frac{dy}{dS} + \sin \beta \frac{dx}{dS} \right]. \quad (2.15)$$

Вирішуючи спільно рівняння (2.14) і (2.15), отримаємо

$$\int q dq = \frac{P_0}{B} \int (-\sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma) d\gamma + \frac{R}{B} \int (-\cos \beta \sin \gamma + \sin \beta \cos \gamma) d\gamma + C.$$

Після підстановки граничних умов в останнє рівняння, визначимо довільну постійну інтегрування. Остаточний останній вираз прийме вигляд

$$\frac{Bq_*^2}{2P_0} - 1 + \frac{R}{P_0} \cos(\beta + \alpha) = -\cos(-\gamma + \alpha) + \frac{R}{P_0} \cos(\gamma + \beta), \quad (2.16)$$

де  $q^*$  - кривизна нитки в точці входу на напрямну.

Розглянемо ряд окремих випадків. Хай натяг  $P_0=0$  (рис. 2.3, б). Рівняння (2.16) спроститься (вважатимемо, що точка  $B$  співпадає з точкою  $A$ )

$$\frac{Bq_*^2}{2} + R \cos(\beta + \alpha) = R \cos(\gamma + \beta),$$

звідки

$$\gamma = -\beta + \arccos \left[ \cos(\beta + \alpha) + \frac{Bq_*^2}{2R} \right].$$

Кут  $\Theta$ , на який зменшиться теоретичний кут обхвату  $\varphi p$  ( $\varphi p = \alpha$ ), буде рівний

$$\Theta = \alpha - \gamma = \alpha + \beta - \arccos \left[ \cos(\beta + \alpha) + \frac{Bq_*^2}{2R_{II}} \right].$$

Вирішуємо останнє рівняння, використовуючи метод додаткового кута

$$\cos \Theta = \cos(\alpha + \beta) \left[ \cos(\alpha + \beta) + \frac{Bq_*^2}{2R_{II}} \right] + \sin(\alpha + \beta) \sqrt{1 - \left[ \cos(\alpha + \beta) + \frac{Bq_*^2}{2R_{II}} \right]^2}, \quad (2.17)$$

де  $q^*$  - кривизна нитки в точці входу на напрямну.

Якщо в рівнянні (2.17) рахувати  $\beta=0$ ,  $\alpha=\pi/2$  (рис. 2.3, в), тоді

$$\cos \Theta = \sqrt{1 - \frac{B^2 q_*^4}{4R_{II}^2}}.$$

Якщо в рівнянні (2.16) зовнішня сила  $R$  рівна нулю (рис. 2.3, г), тоді

$$\frac{Bq_*^2}{2P_0} - 1 = -\cos(-\gamma + \alpha); \cos \Theta = 1 - \frac{Bq_*^2}{2P_0}.$$

Даний результат був отриманий раніше [1] і є тільки окремим випадком при даному силовому вантаженні.

При  $R=P_0$  і  $\beta=0$ , з рівняння (2.16), отримаємо

$$\begin{aligned} \cos \Theta &= \frac{\cos \alpha \sqrt{(-\cos \alpha + 1)}}{\sqrt{2^2(1 - \cos \alpha)}} \left( \frac{Bq_*^2}{2P_0} - 1 + \cos \alpha \right) + \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{(\cos \alpha - 1)^2}{2(1 - \cos \alpha)}} \times \\ &\times \sqrt{1 - \frac{\left( \frac{Bq_*^2}{2P_0} - 1 + \cos \alpha \right)^2}{2(1 - \cos \alpha)}} + \sin \alpha \sqrt{1 - \frac{(\cos \alpha - 1)^2}{2(1 - \cos \alpha)}} \times \frac{1 - \left( \frac{Bq_*^2}{2P_0} - 1 + \cos \alpha \right)}{2(1 - \cos \alpha)} + \\ &+ \sin \alpha \sqrt{1 - \frac{\left( \frac{Bq_*^2}{2P_0} - 1 + \cos \alpha \right)^2}{2(1 - \cos \alpha)}} \times \frac{(\cos \alpha - 1)}{\sqrt{2(1 - \cos \alpha)}}. \end{aligned}$$

При  $\alpha=\pi/2$

$$\cos \Theta = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \frac{1}{2} \left( -1 + \frac{Bq_*^2}{2P_0} \right) - \sqrt{1 - \frac{1}{2} \left( -1 + \frac{Bq_*^2}{2P_0} \right)^2} \right].$$

На закінчення необхідно привести випадок, коли  $R=P\theta=0$ , тоді кривизна осі нитки буде постійною, залежною від величини моменту, що вигинає

$$q_1 = \frac{\mu_0}{B} = \text{const.}$$

Аналізуючи отримані залежності, можна зробити висновок, що величина реального кута обхвату залежить від величини жорсткості  $B$  нитки на вигин, розташування зовнішніх сил.

### **2.1.3. Поперечне ковзання нитки по напрямній постійного радіусу кривизни**

Поперечне ковзання ниток, широко поширене в різних технологічних процесах трикотажної і швейної промисловості (взаємодія ниток з голками і платинами при петле утворенні; на окремих ділянках при снуванні і перемотуванні; при підготовці пряжі до в'язання), вивчене недостатньо детально. Рішення даного питання дозволить описувати процеси, що протікають в зоні контакту нитки з напрямною, і, як наслідок, створить умови для їх оптимізації.

У роботах [10,12] наводяться результати теоретичних і експериментальних досліджень за визначенням форми і натягу ниток при їх поперечному ковзанні при малих кутах геодезичного відхилення.

Розглянемо поперечний рух нерозтяжної, гнучкої нитки що незминається по направляючій поверхні постійної кривизни. Силу тертя вважатимемо підпорядкованими закону Амонтона. Розрахункова схема приведена на рис. 2.4 (напрямок руху циліндра вказаний вектором його швидкості).

З урахуванням зроблених вище допущень система диференціальних рівнянь (1.68).(1.70) у циліндричних координатах прийме вигляд

$$\begin{aligned}
 PR\left(\frac{d\varphi}{dS}\right) + N - \mu_0 g \cos \lambda \cos \varphi = 0; \quad \frac{d}{dS}\left(PR\frac{d\varphi}{dS}\right) + \mu_0 g \cos \lambda \sin \varphi = 0; \\
 \frac{d}{dS}\left(PR\frac{dz}{dS}\right) - NK + \mu_0 g \sin \lambda = 0; \quad R^2\left(\frac{d\varphi}{dS}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dS}\right)^2 = 1,
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

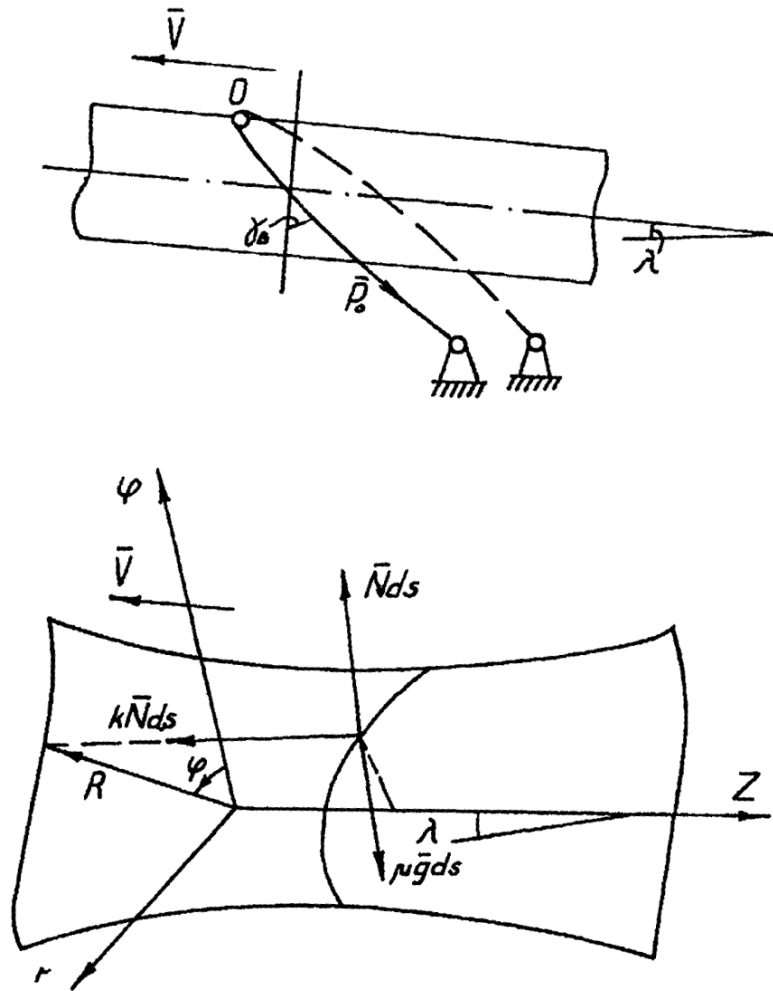


Рис.2.4. Розрахункова схема для дослідження руху нитки по нахиленому циліндру

де  $P$  - натяг нитки;  $N$ - нормальна реакція поверхні;  $R$  - радіус кривизни циліндра;  $S$  - дугова координата;  $\mu_0$  - лінійна щільність нитки;  $g$  - прискорення вільного падіння;  $\lambda$  - кут нахилу осі циліндра до горизонту;  $k$  - коефіцієнт тертя нитки об ту, що направляє;  $\varphi, z$  - відповідні циліндричні координати.



Розглянемо деякі окремі випадки. Якщо нехтувати силою тяжіння, то система рівнянь (2.18) спроститься

$$\begin{aligned} -PR\left(\frac{d\varphi}{dS}\right)^2 + N &= 0; \\ \frac{d}{dS}\left(PR\frac{d\varphi}{dS}\right) &= 0; \\ \frac{d}{dS}\left(PR\frac{dz}{dS}\right) - NK &= 0; \\ R^2\left(\frac{d\varphi}{dS}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dS}\right)^2 &= 1. \end{aligned} \tag{2.19}$$

З другого рівняння системи (2.19) отримаємо

$$P\frac{d\varphi}{dS} = C = \text{const.} \tag{2.20}$$

Вирішуючи спільно (2.19) і (2.20), отримаємо наступне диференціальне рівняння

$$\frac{dz}{d\varphi} = kR\varphi + C_1, \tag{2.21}$$

де  $C_1$  - довільна постійна.

Визначимо останню з граничних умов. При  $\varphi = \pi/2$

$$\left(\frac{dz}{d\varphi}\right)_{\varphi=\frac{\pi}{2}} = Rtg\gamma_b,$$

звідки

$$C_1 = Rtg\gamma_b - kR\frac{\pi}{2}.$$

Підставляючи останній вираз у формулу (2.21) і інтегруючи його, матимемо

$$Z = kR\frac{\varphi^2}{2} + Rtg\gamma_b\varphi - kR\frac{\pi}{2}\varphi. \tag{2.22}$$

Вирішуючи рівняння (2.22) з урахуванням останнього рівняння системи (2.19), отримаємо вираз для закону зміни дугової координати

$$S = \int_0^{\varphi} \sqrt{1 + \left(kR\varphi + Rtg\gamma_b - kR\frac{\pi}{2}\right)^2} d\varphi + C_2,$$

де  $C_2$  - довільна постійна інтегрування.

Натяг нитки в будь-якій точці, з урахуванням формул (2.19), (2.20), визначається з рівняння

$$P = P_B \cos \gamma_b \sqrt{1 + \left( k\varphi + \operatorname{tg} \gamma_b - k \frac{\pi}{2} \right)^2}, \quad (2.23)$$

де  $P_B$  - натяг нитки в точці входу напрямну.

Якщо вважати, що нитка взаємодіє з напрямною при невеликому куті обхвату, то систему рівнянь (2.18) можна перетворити таким чином

$$\begin{aligned} -PR \left( \frac{d\varphi}{dS} \right)^2 + N - \mu_0 g \cos \lambda \cos \lambda &= 0; \\ \frac{d}{dS} \left( PR^2 \frac{d\varphi}{dS} \right) &= 0; \\ \frac{d}{dS} \left( P \frac{dz}{dS} \right) - Nk + \mu_0 g \sin \lambda &= 0; \\ R^2 \left( \frac{d\varphi}{dS} \right)^2 + \left( \frac{dz}{dS} \right)^2 &= 1. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Вирішення системи диференціальних рівнянь (2.24) аналогічно вирішенню системи (2.19). При цьому необхідно приймати  $S = R\varphi$ .

Виконавши необхідні перетворення і інтегруючи відповідні диференціальні рівняння, отримаємо

$$\begin{aligned} Z &= \frac{kR\varphi^2}{2} + \frac{\mu_0 g (\cos \lambda k - \sin \lambda) R\varphi \left( \varphi - \frac{\pi}{2} \right) + R \operatorname{tg} \gamma_b \varphi - kR \frac{\pi}{2} \varphi; \\ P &= P_B \cos \gamma_b \sqrt{1 + \left[ k\varphi + \frac{\mu_0 g (\cos \lambda k - \sin \lambda)}{P_B \cos \gamma_b} \left( \varphi - \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{tg} \gamma_b - k \frac{\pi}{2} \right]^2}. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Результати розрахунку по формулах (2.22), (2.23) і (2.25) приведені на рис. 2.5. Для розрахунку були прийняті наступні дані:  $P_B = 10$  сН,  $k = 0,2$ ,  $R = 10$  мм,  $\mu_0 g = 0,09$  сН/мм,  $\gamma_0 = 0,4; 0,8$  рад.,  $\lambda = 0; 0,6$  рад.

Аналіз графічних залежностей показав, що на форму і натяг ниток істотно впливає величина кута нахилу вільних гілок нитки до утворюючої циліндра -  $\gamma_b$ . Нахил циліндра (визначається кутом  $\lambda$ ) на натяг істотно не впливає. Але потрібно мати на увазі, що при збільшенні товщини нитки значення погонної ваги впливатиме на її форму і натяг. На закінчення можна відмітити наступне. Якщо в системі рівнянь (2.18) прийняти  $\lambda = 0$  і

вважати, що  $R \rightarrow \infty$  (тобто важка нитка з двома точками закріплення взаємодіє з горизонтальною площиною, що рухається), то

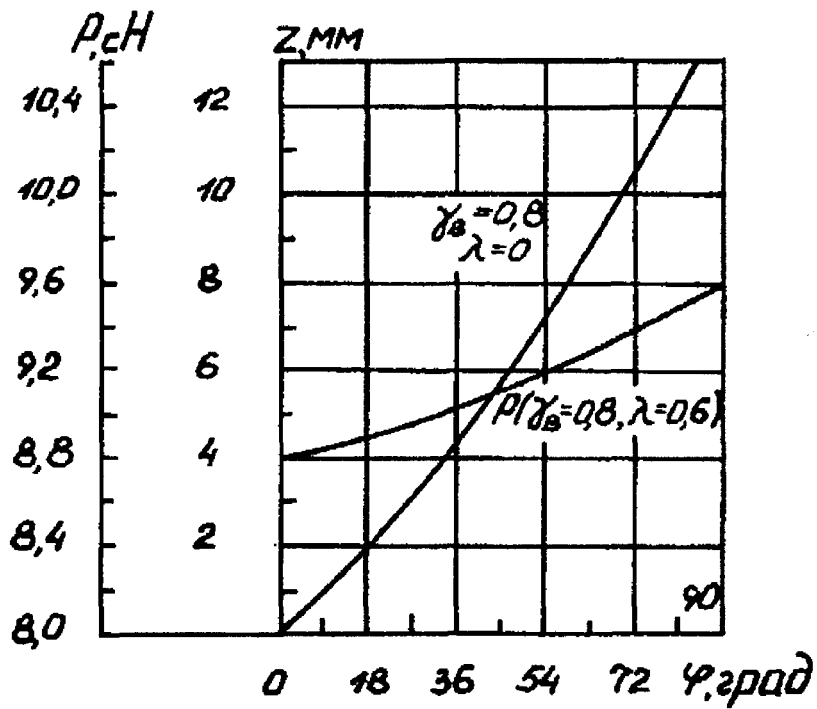
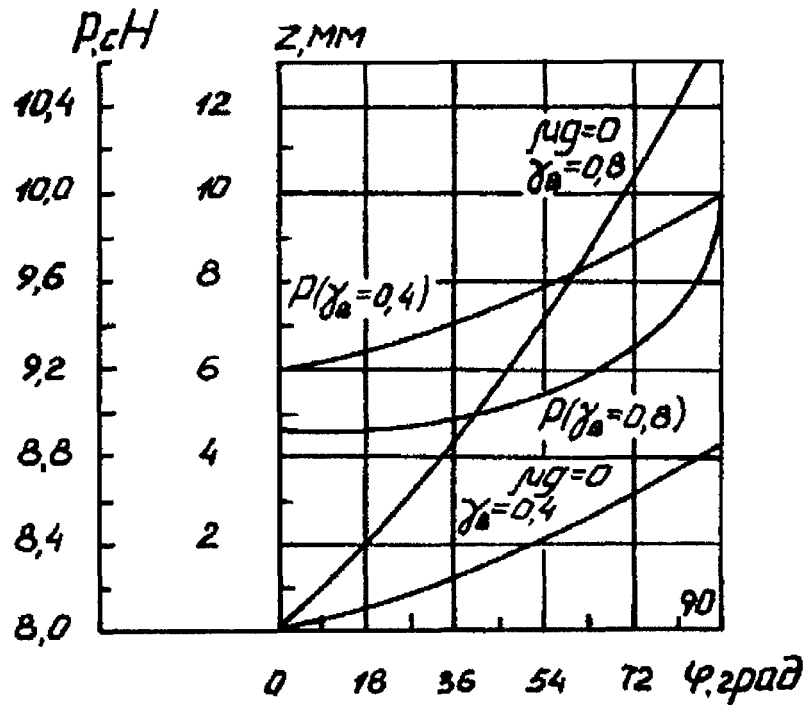


Рис.2.5. Залежність натягу нитки  $P$  та координати  $z$  від величини циліндричної координати  $\varphi$

$$Y = Z + h \left[ ch \left( \frac{x}{h} - 1 \right) \right]; h = \frac{P_0}{\mu_0 g K},$$

де  $h$  - деяка постійна.

Отже, нитка розташовуватиметься по ланцюговій лінії [1].

## 2.2. Рівновага жорсткої на вигин нитки в полі сили тяжіння

Вивчення рівноваги або стаціонарного руху жорстких на вигин ниток має велике значення для вдосконалення різних технологічних процесів легкої промисловості, зокрема, при снуванні і перемотуванні ниток.

Визначення форми осі жорсткої на вигин нитки, її натяг як функції дугової координати дозволяє раціональним чином вибрати відстань між опорами, що, у свою чергу, дозволить зменшити обривність і підвищити продуктивність устаткування.

Розглянемо рівновагу жорсткої на вигин нитки під дією сил тяжіння. При цьому вважатимемо, що момент, що вигинає, пропорційний кривизні, швидкість зміни величини перерізуючої сили від дугової координати незначна (це пояснюється великою відстанню між опорами).

Проведені дослідження дозволили встановити, що абсолютно гнучка нитка в полі сили тяжіння розташовується по ланцюговій лінії. Проте результати не можна використовувати на практиці, оскільки реальні нитки, що переробляються в легкій промисловості, володіють жорсткістю на вигин.

Вважатимемо (див. рис. 2.6), що важка нитка, закріплена в точках  $A$  і  $B$ , розташовується в полі сили тяжіння і маса її рівномірно розподілена по довжині.

Основну систему диференціальних рівнянь, що описують рівновагу елемента нитки, можна отримати з системи диференціальних рівнянь (1.68).(1.70) при  $Q_3 = Mk = Mu^2 = 0$ ,  $r_1 = 0 = p_1$ ,  $\omega e = 0 = V^*$ ,  $Fb = \mu 0 = 0$

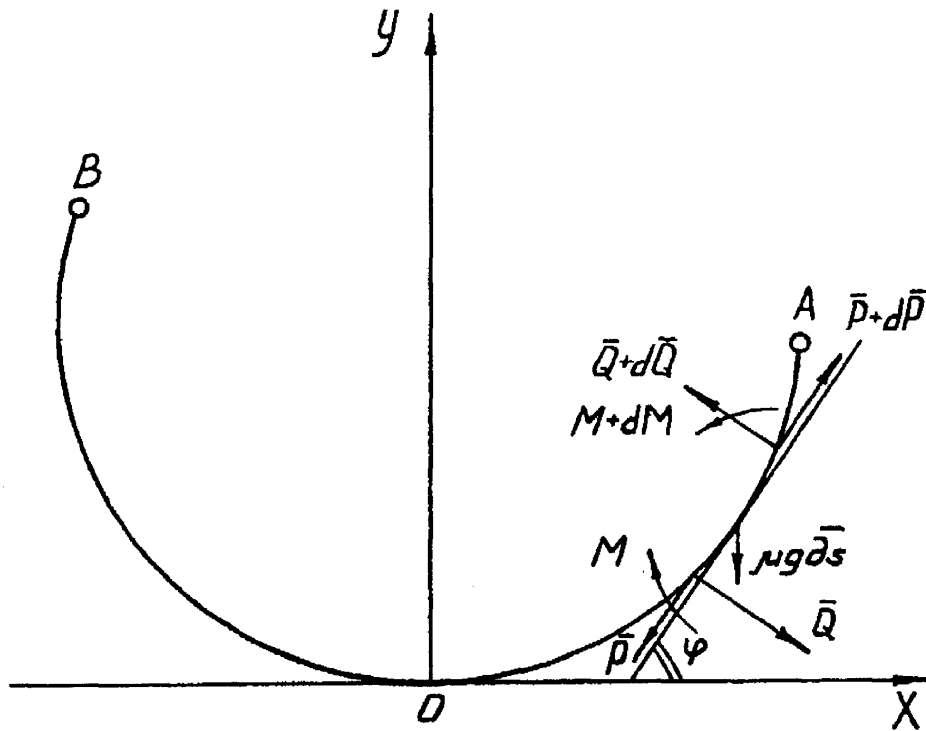


Рис.2.6. Розрахункова схема для дослідження рівноваги жорсткої нитки в полі сили тяжіння

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial P}{\partial S} - q_1 Q_2 - \mu_0 g \sin \varphi &= 0; \\
 \frac{\partial Q_2}{\partial S} - P q_1 - \mu_0 g \cos \varphi &= 0; \\
 \frac{\partial M_{u3}}{\partial S} + Q_2 &= 0; M_{u3} = B q_1; \\
 q_1 &= \frac{1}{\rho(S)} = \frac{\partial \varphi}{\partial S},
 \end{aligned}
 \tag{2.26}$$

де  $\varphi$  - кут нахилу дотичної до осі  $X$ ;  $\mu_0$  - лінійна щільність нитки;  $g$  - прискорення вільного падіння.

З першого диференціального рівняння системи (2.26), з урахуванням останніх трьох, можна отримати

$$\partial P + B q_1 \partial q_1 - \mu_0 g \partial y = 0,$$

де  $dy = \sin \varphi dS$  або

$$P = C + \mu_0 g y - \frac{B q_1^2}{2}, \quad (2.27)$$

де  $C$  - довільна постійна інтегрування, рівна

$$C = P_0 + \frac{B q_{10}^2}{2},$$

де  $P_0$  - натяг нитки в точці  $O$ ;  $q_{10}$  - кривизна осі нитки в точці  $O$ .

Остаточно формула (2.27) прийме вигляд

$$P = P_0 + \mu_0 g y + \frac{B}{2} (q_{10}^2 - q_1^2). \quad (2.28)$$

Враховуючи, що швидкістю зміни величини перерізуючої сили можна нехтувати, друге рівняння системи (2.26) спроститься

$$P = \frac{\mu_0 g \cos \varphi}{q_1}.$$

Підставляючи отриманий результат в перше рівняння системи, отримаємо

$$-2\mu_0 g \sin \varphi q_1^2 - \frac{\partial q_1}{\partial S} \mu_0 g \cos \varphi + B \frac{\partial q_1}{\partial S} q_1^3 = 0. \quad (2.29)$$

Інтегруємо останній вираз з урахуванням першої теореми про середній

$$\ln \cos^2 \varphi - \ln q_1 + \frac{B}{3\mu_0 g} q_1^3 = \ln C_1; \quad (2.30)$$

$$\frac{B}{\mu_0 g} \int \frac{q_1^2}{\cos \varphi} \partial q_1 = \frac{B}{\mu_0 g \cos \varphi^*} \int q_1^2 \partial q_1 = \frac{B}{3\mu_0 g} q_1^3,$$

де  $\cos \varphi^*$  - значення функції в інтегралі від 0 до кута нахилу дотичної в точці закріплення  $A$  (приймаємо  $\varphi^* = 0$ , тоді  $\cos \varphi^* = 1$ );  $C_1$  - довільна постійна інтегрування, рівна

$$C_1 = \frac{1}{q_{10}} e^{\frac{B}{3\mu_0 g} q_{10}^3}.$$

Остаточний вираз (2.30) можна представити у формі

$$\cos \varphi = \sqrt{\frac{q_1}{q_{10}} e^{\frac{B}{3\mu_0 g} (q_{10}^3 - q_1^3)}}. \quad (2.31)$$

Залежність перерізуючої сили від кривизни і кута нахилу дотичної, з урахуванням залежності (2.29), буде рівна

$$Q_2 = \frac{2\mu_0 g q_1^2 \sin \varphi}{\mu_0 g \cos \varphi - B q_1^3}. \quad (2.32)$$

Якщо у формулах (2.28) і (2.31) нехтувати жорсткістю на вигин, то отримаємо відомі залежності [12] для ланцюгової лінії ідеально гнучкій нитки

$$P = P_0 + \mu_0 g y, q_1 = q_{10} \cos^2 \varphi.$$

Аналіз отриманих виразів (2.28), (2.31), (2.32) показав, що натяг нитки, кут нахилу дотичної монотонно зростають від нижньої точки провису **O** до точки закріплення **A** або **B**. При незмінній довжині нитки між точками закріплення і при збільшенні відстані між останніми перепад натягу буде невеликим, що сприятливо позначиться на умовах переробки ниток на снувальних машинах.

На рис. 2.7 показані графічні залежності зміни натягу і кута нахилу дотичної від кривизни осі нитки. У розрахунках приймали, що  $q_{10}=1 \text{ м}^{-1}$ ,  $B=17 \cdot 10^{-8} \text{ Нм}^2$ ,  $\mu_0 g=3 \cdot 10^{-3} \text{ Нм}$ .

### **2.3. Рівновага і рівномірний рух нитки у разі направляючої поверхні великої кривизни**

Нормальний перебіг багатьох технологічних процесів забезпечується створенням мінімально можливого натягу нитки в зоні взаємодії з робочими органами трикотажних і швейних машин [1,10,12,35].

Рішення даної задачі повинне базуватися на комплексному теоретично - експериментальному дослідженні процесу взаємодії нитки з направляючою поверхнею великої кривизни [1,10]. Це можуть бути поверхні голок, платин, різних спрямовувачів нитки і натяжних пристроїв.

Визначення натягу ведучої гілки нитки (див. рис. 2.8) після огинання нею однією направляючої дозволить шляхом послідовного переходу [10,12] визначити величину натягу в робочій зоні.

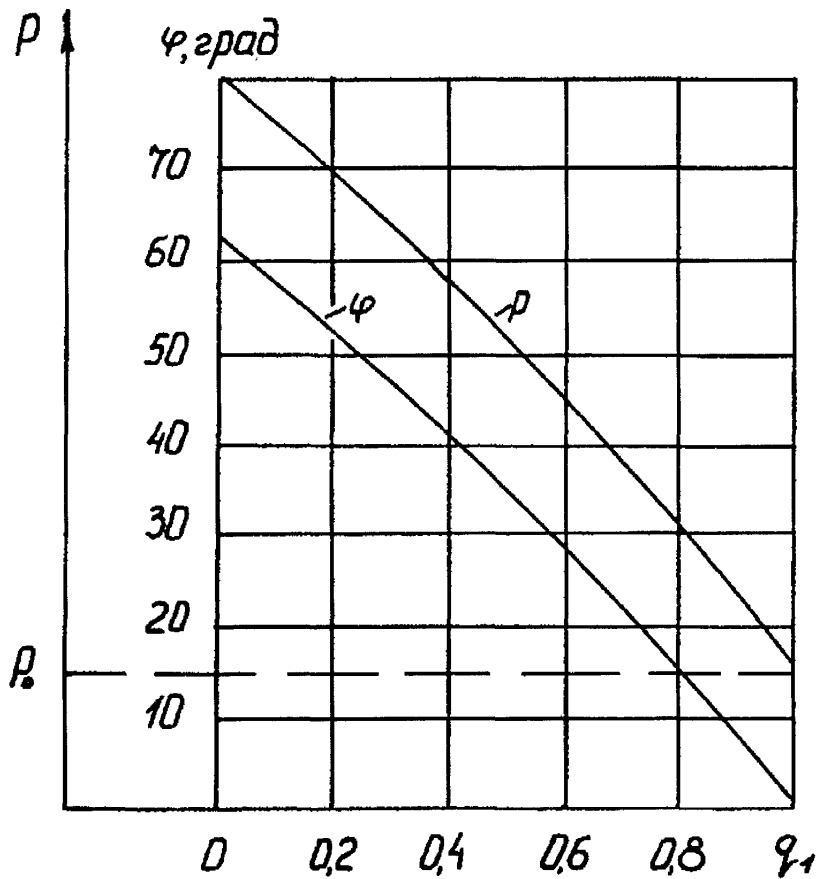


Рис.2.7. Залежність зміни натягу та кута нахилу дотичної від кривизни вісі нитки

При рішенні даної задачі враховуватимемо не тільки змінання нитки в зоні контакту, але також і її жорсткість на вигин.

Враховуючи складність отримуваних теоретичних залежностей при їх аналізі, використовуватимемо відомі чисельні методи вирішення рівнянь із застосуванням ЕОМ.



На рис. 2.8 приведена розрахункова схема. Нитка набігає на направляючу поверхню в точці А і збігає в точці В. Для визначення залежності між натягом ведучої гілки Р1 і натягом нитки в точці В, а також натягом веденої гілки нитки Р0 і натягом в точці А, з урахуванням

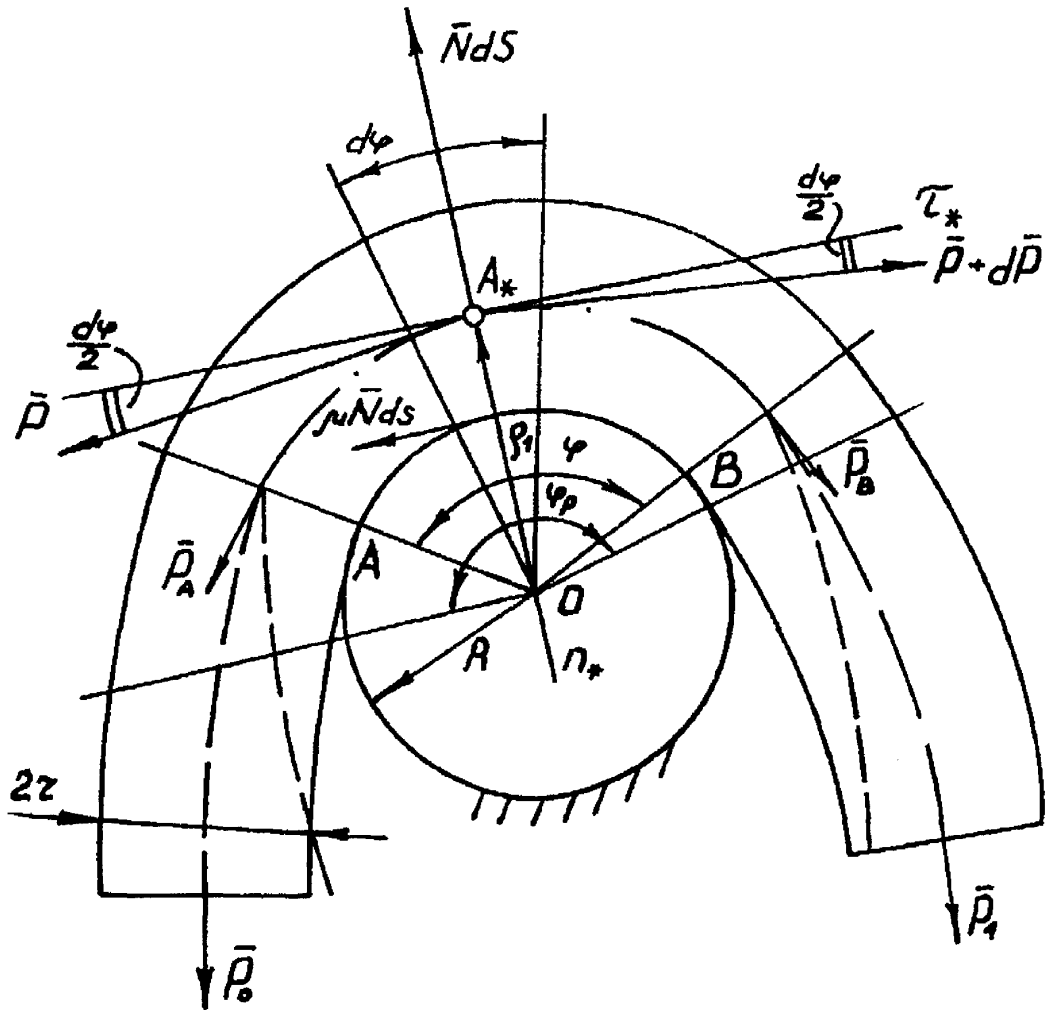


Рис.2.8. Розрахункова схема для дослідження взаємодії жорсткої на згин нитки що зминається з циліндричною напрямною великої кривизни

зминання в зоні контакту, скористаємося системою диференціальних рівнянь (1.68).(1.70) при  $Q_3=Mk=Mu^2=0$ ,  $r_1=0=p_1$ ,  $\omega e=0=V^*$ ,  $R_0=M_0=0$

(вважатимемо, що силами тяжіння елемента нитки, в порівнянні з іншими силами, що діють на нього, можна нехтувати). В результаті рішення отримаємо наступні залежності

$$\begin{aligned} P_A &= P_0 \left\{ 1 - \frac{B_0}{2P_0 [R + r(1 - \delta_0)]^2} \right\}; \\ P_B &= P_1 \left\{ 1 - \frac{B_0}{2P_1 [R + r(1 - \delta)]^2} \right\}, \end{aligned} \quad (2.33)$$

де  $R$  - радіус кривизни напрямної (в умовах нашого завдання це циліндрична поверхня);  $r$  - розрахунковий радіус поперечного перетину нитки (як об'єкт дослідження вибрана нитка-модель I модифікації циліндричної форми - див. розділ 1);  $B_0$  - коефіцієнт жорсткості нитки при вигині;  $\delta_0, \delta$  - відносна деформація поперечного перетину в точках входу і сходу нитки з напрямної до початку попереднього зсуву.

Для визначення взаємозв'язку між натягом в точці сходу нитки  $P_B$  і натягом в точці входу на направляючу  $P_A$ , необхідно розглянути рівновагу елемента  $AB$  на циліндричній напрямній з урахуванням змінання в зоні контакту.

Скористаємося основною системою диференціальних рівнянь (1.68) - (1.70) при  $Q=0$ .

Величину нормального питомого тиску визначимо по формулі (1.69) при  $b_5=0$ . У виразі для радіусу кривизни осі нитки (1.29), для простоти рішення, збережемо тільки перші три члена. Для цього скористаємося в розрахунках формулою (1.30).

З урахуванням сказаного, система диференціальних рівнянь матиме вигляд

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial S} &= \mu N; \\ \left[ \frac{1}{R+r} - \frac{\delta \lambda}{(R+r)^2} + r \frac{\partial^2 \delta}{\partial S^2} \right] P &= N; \\ N &= bE_1 \delta (1 - b_3 \delta^{b_4}) + \eta \dot{\delta}_0; \\ \delta &= \frac{r - r_x}{r}, \end{aligned} \quad (2.34)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт тертя (сила тертя підкоряється закону Амонтона);  $N$  - нормальний тиск;  $b$  - ширина сліду контакту нитки на тій, що направляє [1];  $E_1$  - модуль пружності нитки при стисненні (див. таблицю 2.2);  $b_3, b_4$  - коефіцієнти, що характеризують нелінійну залежність між навантаженням і деформацією перетину;  $\eta$  - коефіцієнт, що враховує в'язкі властивості матеріалу [3];  $\dot{\delta}_0$  - швидкість відносної деформації поперечного перетину;  $r_x$  - відстань від осі деформованої нитки до тієї, що направляє.

Вирішуючи спільно систему рівнянь (2.34), при  $b_3=b_4=0$ , нехтуючи творами і квадратами малих величин, отримаємо наступне рівняння

$$P_B = P_A \left[ 1 + \left( 1 + \frac{\eta \dot{\delta}_0}{bE_1 \delta_0} \right) \frac{(R+r)}{R+r(1-\delta_0)} (e^{\mu \varphi} - 1) - \frac{\eta \dot{\delta}_0}{P_A} \right].$$

Якщо нехтувати величиною  $\eta \dot{\delta}_0$  то отримаємо систему трьох рівнянь, які зв'язують натяг ниток в точках  $A$  і  $B$

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_0 e^{\mu \varphi}; \\ P_B &= P_A \left[ 1 + \frac{(R+r)}{R+r(1-\delta_0)} (e^{\mu \varphi} - 1) \right]; \\ \delta_0 &= \frac{P_0 (R+r)}{rP_0 + E_1 b (R+r)^2}, \end{aligned} \quad (2.35)$$

де  $\varphi$  - значення кута обхвату перед попереднім зсувом.

З урахуванням системи рівнянь (2.33) з системи (2.35) отримаємо остаточний вираз для визначення натягу ведучої гілки нитки, яка рухається по циліндричній направляючій поверхні

$$P_l = P_0 \left[ 1 + \frac{(R+r)}{R+r(l-\delta_0)} (e^{\mu\varphi} - 1) \right] + \frac{B_0}{2[R+r(l-\delta_0)]^2} - \frac{B_0}{2[R+r(l-\delta_0)]^2} \left[ 1 + \frac{(R+r)}{R+r(l-\delta_0)} (e^{\mu\varphi} - 1) \right]. \quad (2.36)$$

Для визначення коефіцієнта тертя скористаємося отриманою раніше залежністю (2.1).

Величину початкової деформації поперечного перетину  $\delta_0$  для віскозної нитки (XV), капронової комплексної нитки (XVI), бавовняної пряжі (XII), вовняної пряжі (XIII) і віскозної штапельної пряжі (XIII) визначали розрахунковим шляхом по третій формулі системи рівнянь (2.35). Результати розрахунку приведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. Результати визначення початкової деформації поперечного перетину нитки

Нитка	b мм	2r мм	EI сН/м 2	P0 сН	Початкова деформація поперечного перетину $\delta_0$								
					Радіус циліндрової направляючої R, мм								
					0,2	0,5	0,8	1,1	1,4	1,7	2,0	2,3	2,6
Віскозна	0,014	0,17	474,9	10	1	1	1	1	0,96	0,81	0,70	0,62	0,55
				20	1	1	1	1	1	1	1	1	1
				30	1	1	1	1	1	1	1	1	1
				40	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Капронова	0,012	0,20	584,4	10	1	1	1	1	0,89	0,76	0,66	0,58	0,52
				20	1	1	1	1	1	1	1	1	1
				30	1	1	1	1	1	1	1	1	1
				40	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Бавовняна	0,012	0,21	712,2	10	1	1	1	0,89	0,74	0,63	0,54	0,48	0,43
				20	1	1	1	1	1	1	1	0,93	0,84
				30	1	1	1	1	1	1	1	1	1
				40	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Вовняна	0,015	0,23	599,0	10	1	1	1	0,84	0,69	0,59	0,51	0,45	0,40
				20	1	1	1	1	1	1	0,99	0,88	0,79
				30	1	1	1	1	1	1	1	1	1
				40	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Віскозна пряжа	0,014	0,22	1254, 8	10	1	0,80	0,58	0,45	0,37	0,31	0,27	0,23	0,21
				20	1	1	1	0,87	0,72	0,61	0,53	0,46	0,41
				30	1	1	1	1	1	0,89	0,78	0,69	0,61

				40	1	1	1	1	1	1	0,95	0,90	0,79
--	--	--	--	----	---	---	---	---	---	---	------	------	------

Розрахунок проводили для різних радіусів кривизни напрямної із зміною величини початкового натягу. Аналіз даних таблиці дозволив встановити, що із збільшенням радіусу кривизни направляючої поверхні величина відносної деформації зменшується, що пояснюється зменшенням нормального тиску.

Особливе місце в даній роботі займали дослідження за визначенням дійсного кута обхвату  $\varphi$  ниткою направляючої. Як відомо, з одного боку кут обхвату зменшується за рахунок жорсткості нитки на вигин [1,10]. Величина кута, на який зменшується кут обхвату  $\varphi$ , визначається по формулі

$$\varphi_{*\Sigma} = \varphi_{*1} + \varphi_{*2} = \arccos \left[ 1 - \frac{B_0}{2P_0(R+r)^2} \right] + \arccos \left[ 1 - \frac{B_0}{2P_1(R+r)^2} \right]. \quad (2.37)$$

Але в той же час відбувається збільшення кута обхвату ниткою напрямної за рахунок зминання в зоні контакту, що відбувається на фазі попереднього зсуву. Величина кута, на який збільшується кут обхвату  $\varphi$ , визначається по формулі [1]

$$\varphi_{cm\Sigma} = \varphi_{cm1} + \varphi_{cm2} = \arccos \left[ 1 - \delta_0 \left( \frac{2r}{R} \right)^2 \right] + \arccos \left[ 1 - \delta \left( \frac{2r}{R} \right)^2 \right]. \quad (2.38)$$

Результати, отримані по формулі (2.38), порівнювали з експериментальними даними (див. розділ 3). Помилка при цьому не перевищувала 3-8%.

На рис. 2.9 приведені графічні залежності  $\varphi_{cm\Sigma}$ , від величини радіусу кривизни напрямної (**1** - віскозна нитка; **2** - капронова нитка; **3** - х/б пряжа; **4** - вовняна пряжа; **5** – віскозна штапельна пряжа). Розрахунок проводили для натягу веденої гілки нитки  $P_0=10$  сН. Аналіз даних залежностей показує, що із збільшенням  $R$  відбувається зменшення  $\varphi_{cm\Sigma}$ , який прагне до нуля.

Остаточна формула для визначення кута обхвату  $\varphi$

$$\varphi = \varphi_p + \arccos \left[ 1 - \delta_0 \left( \frac{2r}{Rr} \right)^2 \right] + \arccos \left[ 1 - \delta \left( \frac{2r}{R} \right)^2 \right] - \arccos \left[ 1 - \frac{B_0}{2P_0(R+r)^2} \right] - \arccos \left[ 1 - \frac{B_0}{2P_1(R+r)^2} \right]. \quad (2.39)$$

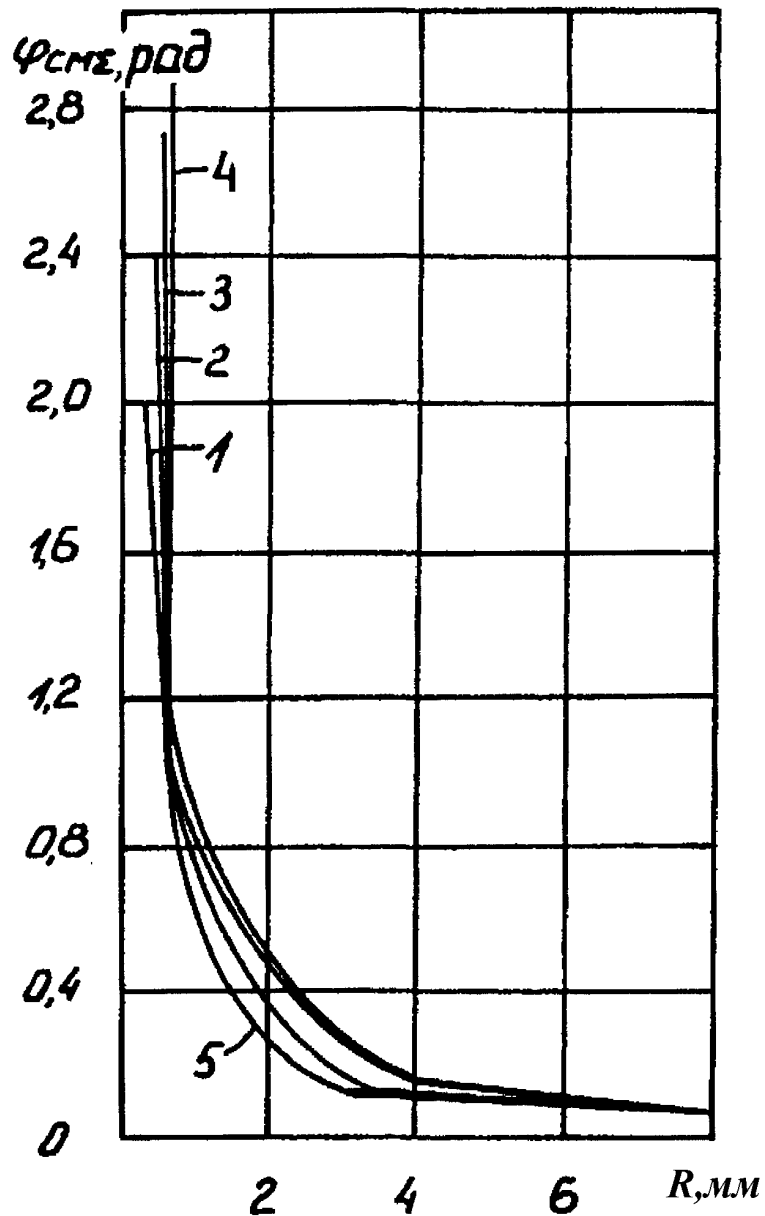


Рис.2.9. Зміна кута  $\varphi_{сн\Sigma}$  в залежності від радіусу кривизни напрямної

На рис. 2.10 приведені графічні залежності сумарного кута охоплення  $\varphi$  від величини радіусу кривизни направляючої поверхні. Криві

відповідали: 1 - для віскозної комплексної нитки; 2 - для капронової комплексної нитки; 3 - для бавовняної пряжі; 4 - для вовняної пряжі; 5 - для віскозної пряжі. Натяг веденої гілки  $P_0=10$  сН, а кут  $\varphi_r=3,14$  рад. Аналіз показує, що зі збільшенням  $R$  величини сумарного кута  $\varphi$  прагне до  $\varphi_r$ .

Для визначення натяг ведучої гілки нитки необхідно вирішити рівняння (2.36) сумісно з рівняннями (2.35) (2.1) (2.37).(2.39), тоді

$$\begin{aligned}
 P_1 + \left\{ \frac{B_0}{2[R+r(1-\delta_0)]^2} - P_0 \right\} & \left\{ I + \frac{(R+r)}{R+r(1-\delta_0)} \times \right. \\
 & \times \left\{ \exp \times \left[ \mu \left\{ \varphi_p + \arccos \left[ 1 - \delta_0 \left( \frac{2r}{R} \right)^2 \right] \right\} + \right. \right. \\
 & + \arccos \left[ 1 - \delta \left( \frac{2r}{R} \right)^2 \right] - \arccos \left[ 1 - \frac{B_0}{2P_0(R+r)^2} \right] - \\
 & \left. \left. \left. - \arccos \left[ 1 - \frac{B_0}{2P_1(R+r)^2} \right] \right] \right\} - I \right\} - \frac{B_0}{2[R+r(1-\delta)]^2} = 0.
 \end{aligned} \tag{2.40}$$

Отримана залежність є трансцендентним рівнянням  $f(P1)=0$  відносно  $P1$ . Вирішення його виконувалося методом дихотомії із застосуванням ЕОМ [1]. Результати розрахунків приведені в додатку (для ниток **XI-XV**).

Аналіз залежностей натягу ниток від радіусу кривизни показує, що на інтервалі 0,5-3 мм натяг знижується, а при подальшому збільшенні  $R$  його величина монотонно зростає, що пояснюється зменшенням питомого тиску і зміною величини коефіцієнта тертя.

Приведені на рис. 2.11, а...з криві з явно вираженими екстремальними крапками дозволяють ставити питання про оптимізацію розмірів направляючих і робочих органів трикотажних і швейних машин.

Вибір оптимальних розмірів дозволить зменшити величину натягу ведучої гілки нитки, що зменшить обривність і забезпечить нормальний перебіг технологічних процесів.

Графічні залежності дозволяють описати зміну натяг ведучій галузь нитки залежно від радіусу кривизни направляючої поверхні.

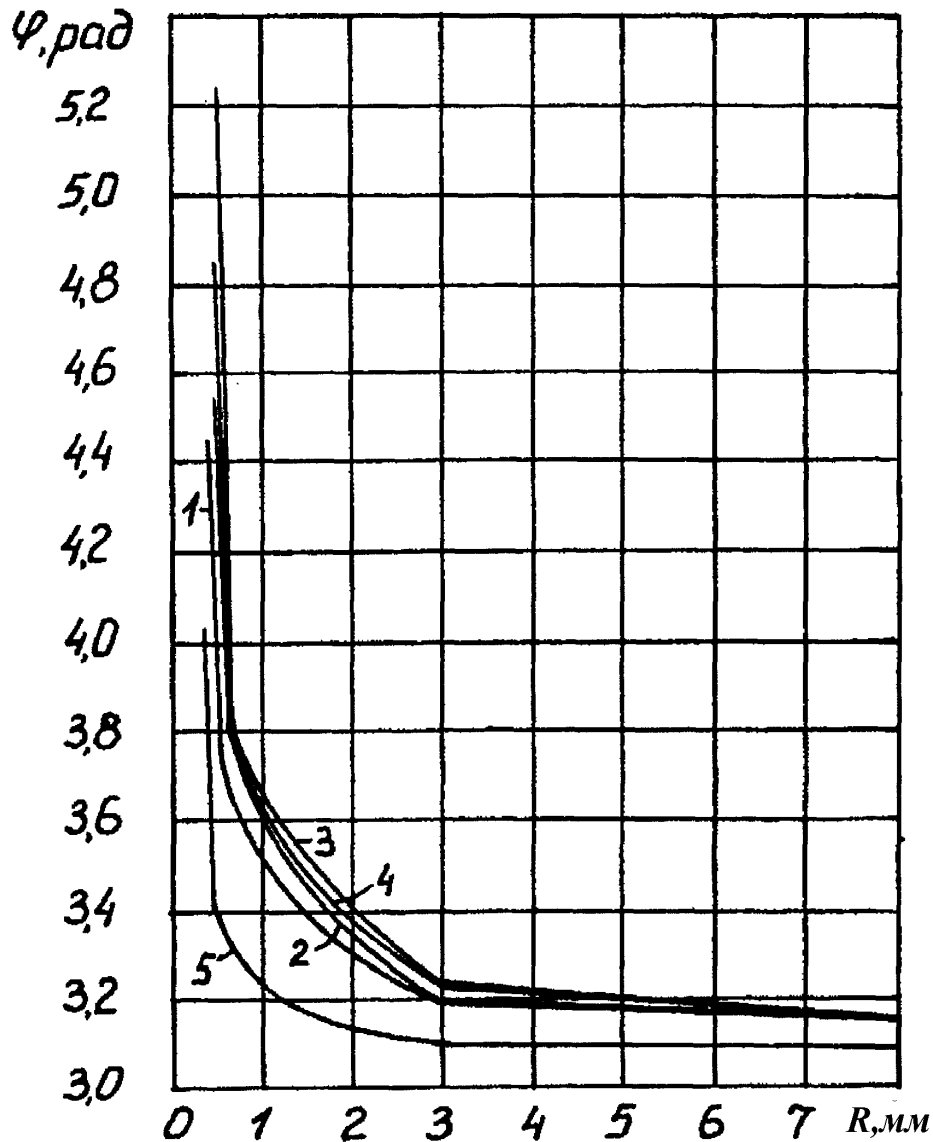


Рис.2.10. Зміна реального кута охоплення ниткою напрямної в залежності від радіусу кривизни напрямної

Крива 1 (див. рис. 2.11, а...з) побудована для капронової комплексної нитки (XV, див. главу 3) 28текс. Крива 2 відповідає віскозній комплексній нитки (XIV) 16,7текс. Крива 3 відповідає бавовняній пряжі (XI) 27,6текс. Крива 4 відповідає вовняній пряжі (XII) 29,9текс. Крива 5 відповідає віскозній штапельній пряжі (XIII) 28,8текс.



Приведені вісім графічних залежностей (рис. 2.11, а...з) побудовано для кута обхвату ниткою напрямної, рівного 3,14 рад. При цьому натяг веденої гілки нитки змінювалося від 5 сН до 40 сН з кроком 5 сН.

Криві будувалися таким чином. Заздалегідь для кожного конкретного радіусу визначалося значення натягу ведучої гілки. Розрахунки виконувалися на ЕОМ з використанням спеціального розробленого програмного забезпечення (див. додаток). Потім отримані результати апроксимувалися поліномом (характерні крапки видно на графіках). Розроблена програма апроксимації дозволяла визначати необхідні коефіцієнти полінома

$$P = a_0 + a_1 R + a_2 R^2 + \dots + a_n R^n$$

з необхідною точністю. При цьому ступінь полінома вибирався автоматично залежно від необхідної точності результатів. Значення коефіцієнтів полінома для кожної конкретної кривої приведені в таблиці 2.3.

Отримані розрахунковим шляхом результати порівнювалися з експериментальними даними (див. гл. 3). Помилка знаходилася в межах 0,1-4%.

Якщо в рівнянні (2.40) нехтувати змінанням ( $\delta = \delta\theta = 0$ ), то отримаємо відому формулу для жорсткої на вигин нитки [1]

$$P_1 = P_0 e^{\mu\varphi} + \frac{B_0}{2(R+r)^2} (1 - e^{\mu\varphi}).$$

Нехтуючи в останньому виразі жорсткістю на вигин ( $B_0 = 0$ ), отримуємо формулу Л.Ейлера

$$P_1 = P_0 e^{\mu\varphi}.$$

#### **2.4. Вплив форми поперечного перетину направляючої на величину натяг ведучої гілки**

Особливий інтерес для технології трикотажного виробництва і трикотажного машинобудування представляють дослідження за

визначенням впливу форми направляючої поверхні робочих органів на величину

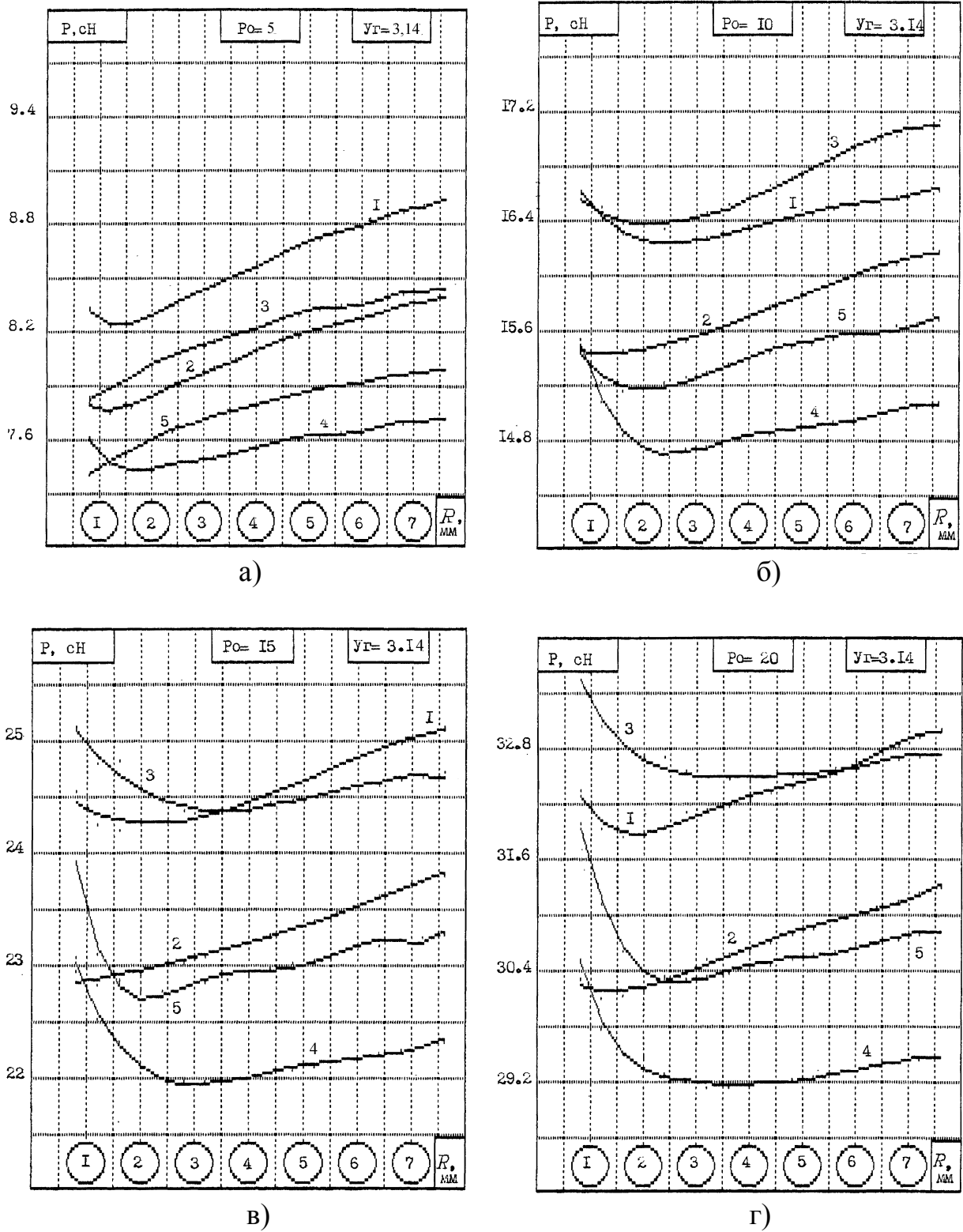
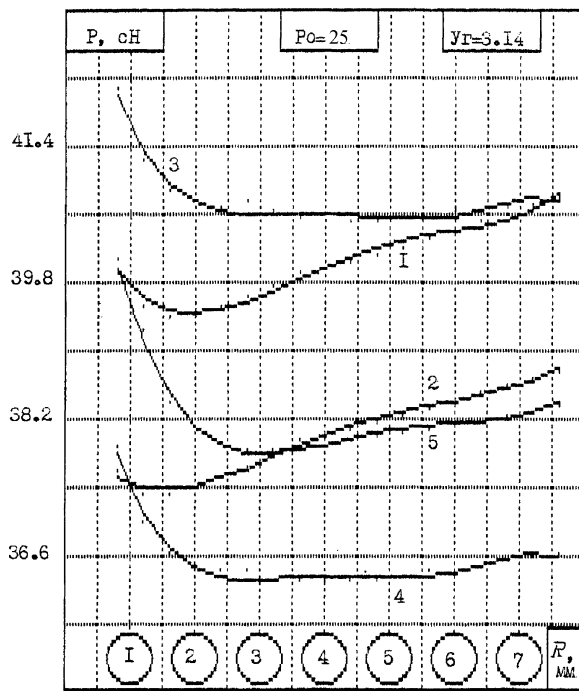
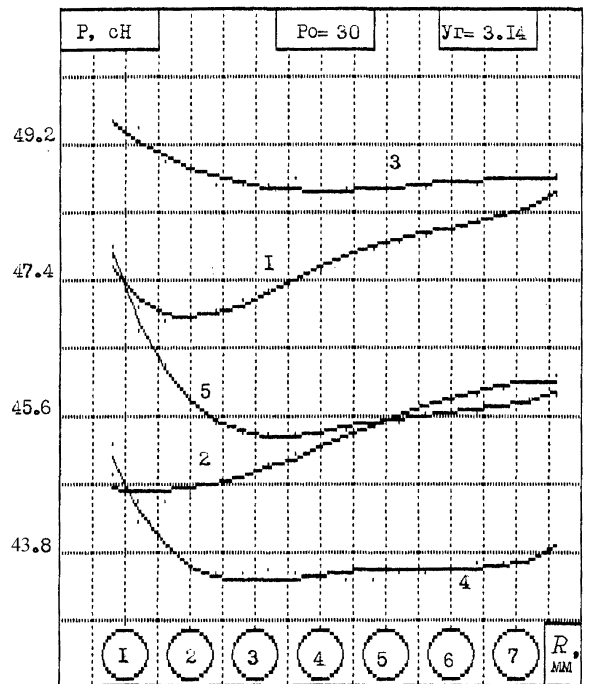


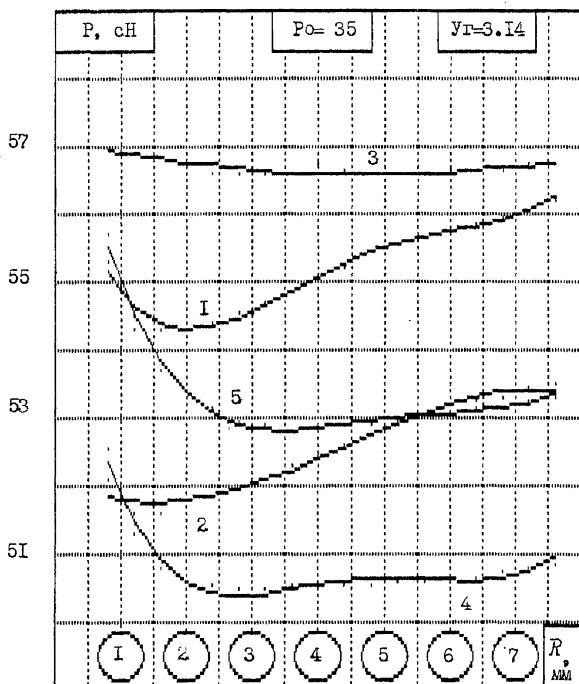
Рис.2.11.Зміна натягу ведучій галки нитки (1-капронова нитка 28Т; 2-віскозна нитка 16.7Т; 3-х/б пряжа 27.6Т; 4-вовняна пряжа 29Т; 5- віскозна пряжа 28.8Т); а –  $P_0=5$ сн, би –  $P_0=10$ , в –  $P_0=15$ сн, г-  $P_0=20$ сн.



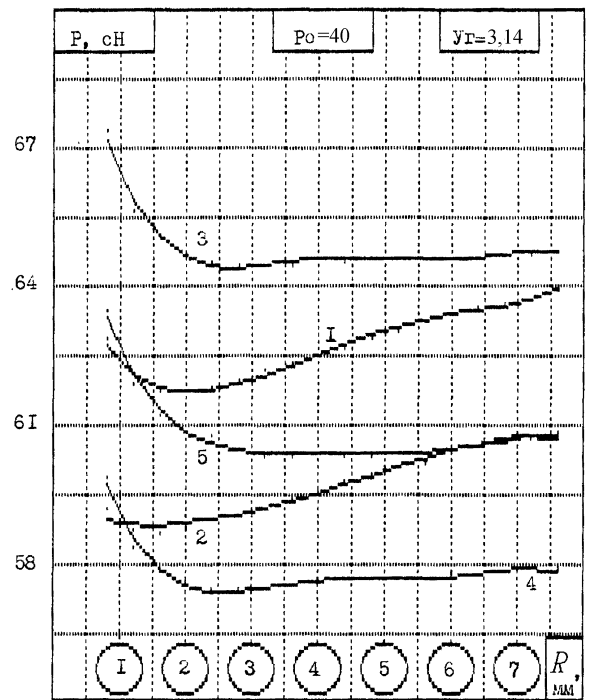
д)



е)



ж)



з)

Продовження рис.2.11.Зміна натягу ведучою галки нитки (1-капронова нитка 28Т; 2-віскозна нитка 16.7Т; 3-х/б пряжа 27.6Т; 4-вовняна пряжа 29Т; 5- віскозна пряжа 28.8Т); д –  $P_0=25$ сн, е –  $P_0=30$ , же –  $P_0=35$ сн, з-  $P_0=40$ сн.

Таблиця 2.3. Коэффициенты аппроксимирующего полинома

Натяг Веденої гілки нитки сН	Кут обхват у рад.	Значення коефіцієнтів аппроксимирующего полинома $a(1,i)$ - капронова комплексна нитка; $a(2,i)$ – віскозна комплексна нитка; $a(3,i)$ - х/б пряхивши; $a(4,i)$ - вовняна пряжа; $a(5,i)$ - віскозна штапельна пряжа
1	2	3
5	1,57	$a(1,0)=6,8$ ; $a(1,1)=-0,5$ ; $a(1,2)=0,2$ $a(2,0)=6,4$ ; $a(2,1)=-0,2$ ; $a(2,2)=0,1$ $a(3,0)=6,1$ ; $a(3,1)=0,1$ ; $a(3,2)=-0,01$ $a(4,0)=6,6$ ; $a(4,1)=-0,6$ ; $a(4,2)=0,2$ $a(5,0)=5,9$ ; $a(5,1)=0,1$ ; $a(5,2)=-0,1$
	3,14	$a(1,0)=8,9$ ; $a(1,1)=-1,1$ ; $a(1,2)=0,6$ $a(2,0)=7,9$ ; $a(2,1)=-0,3$ ; $a(2,2)=0,2$ $a(3,0)=7,7$ ; $a(3,1)=0,2$ ; $a(3,2)=-0,01$ $a(4,0)=8,2$ ; $a(4,1)=-1,0$ ; $a(4,2)=0,4$ ; $a(5,0)=7,3$ ; $a(5,1)=0,2$ ; $a(5,2)=-0,01$
10	1,57	$a(1,0)=13,9$ ; $a(1,1)=-1,0$ ; $a(1,2)=0,3$ ; $a(1,3)=-0,1$ $a(2,0)=13$ ; $a(2,1)=-0,5$ ; $a(2,2)=0,2$ ; $a(2,3)=-0,02$ $a(3,0)=13,7$ ; $a(3,1)=-0,9$ ; $a(3,2)=0,3$ ; $a(4,0)=14,2$ ; $a(4,1)=-2,1$ ; $a(4,2)=0,6$ ; $a(4,3)=0,1$ $a(5,0)=13,4$ ; $a(5,1)=-1,6$ ; $a(5,2)=0,7$ ; $a(5,3)=-0,1$
	3,14	$a(1,0)=17,1$ ; $a(1,1)=-0,9$ ; $a(1,2)=0,3$ $a(2,0)=15,7$ ; $a(2,1)=-0,3$ ; $a(2,2)=0,2$ $a(3,0)=17,3$ ; $a(3,1)=-1,1$ ; $a(3,2)=0,2$ ; $a(3,3)=0,1$ $a(4,0)=17,1$ ; $a(4,1)=-2,6$ ; $a(4,2)=0,7$ ; $a(4,3)=0,2$ $a(5,0)=16,3$ ; $a(5,1)=-1,4$ ; $a(5,2)=0,5$
15	1,57	$a(1,0)=20,2$ ; $a(1,1)=-0,7$ ; $a(1,2)=0,1$ $a(2,0)=18,9$ ; $a(2,1)=-0,1$ ; $a(2,2)=0,01$ $a(3,0)=20,3$ ; $a(3,1)=-0,8$ ; $a(3,2)=0,2$ $a(4,0)=19,9$ ; $a(4,1)=-1,2$ ; $a(4,2)=0,2$ $a(5,0)=20,6$ ; $a(5,1)=-2,2$ ; $a(5,2)=0,8$ ; $a(5,3)=-0,1$
	3,14	$a(1,0)=24,7$ ; $a(1,1)=-0,5$ ; $a(1,2)=0,1$ ; $a(1,3)=-0,01$ $a(2,0)=22,6$ ; $a(2,1)=0,2$ $a(3,0)=25,7$ ; $a(3,1)=-0,9$ ; $a(3,2)=0,2$ $a(4,0)=23,8$ ; $a(4,1)=-1,3$ ; $a(4,2)=0,3$ $a(5,0)=26,0$ ; $a(5,1)=-3,7$ ; $a(5,2)=1,3$ ; $a(5,3)=-0,1$
20	1,57	$a(1,0)=27,2$ ; $a(1,1)=-1,6$ ; $a(1,2)=0,5$ ; $a(1,3)=-0,1$ $a(2,0)=25,1$ ; $a(2,1)=-0,2$ ; $a(2,2)=0,02$ $a(3,0)=27,2$ ; $a(3,1)=-1,0$ ; $a(3,2)=0,2$ $a(4,0)=26,9$ ; $a(4,1)=-2,2$ ; $a(4,2)=0,7$ $a(5,0)=28,0$ ; $a(5,1)=-3,2$ ; $a(5,2)=1,1$ ; $a(5,3)=-0,2$
	3,14	$a(1,0)=33,4$ ; $a(1,1)=-1,9$ ; $a(1,2)=0,8$ ; $a(1,3)=-0,1$ $a(2,0)=30,2$ ; $a(2,1)=-0,1$ ; $a(2,2)=0,1$ $a(3,0)=34,7$ ; $a(3,1)=-1,8$ ; $a(3,2)=0,6$ ; $a(3,3)=-0,1$ $a(4,0)=32,0$ ; $a(4,1)=-2,6$ ; $a(4,2)=0,8$ $a(5,0)=34,3$ ; $a(5,1)=-3,9$ ; $a(5,2)=1,4$ ; $a(5,3)=-0,2$

Продовження таблиці 2.3

1	2	3
25	1,57	a(1,0)=34,1; a(1,1)=-2,3; a(1,2)=0,8; a(1,3)=-0,1 a(2,0)=32,2; a(2,1)=-1,4; a(2,2)=0,5; a(2,3)=-0,1 a(3,0)=34,8; a(3,1)=-2,4; a(3,2)=0,7; a(3,3)=-0,1 a(4,0)=33,9; a(4,1)=-3,4; a(4,2)=1,1; a(4,3)=-0,1 a(5,0)=34,9; a(5,1)=-3,6; a(5,2)=1,1; a(5,3)=-0,2
	3,14	a(1,0)=41,7; a(1,1)=-3,1; a(1,2)=1,3; a(1,3)=-0,1 a(2,0)=38,2; a(2,1)=-1,2; a(2,2)=0,6; a(2,3)=-0,1 a(3,0)=45,3; a(3,1)=-5,7; a(3,2)=2,2; a(3,3)=-0,2 a(4,0)=41,1; a(4,1)=-5,6; a(4,2)=2,1; a(4,3)=-0,2 a(5,0)=42,7; a(5,1)=-4,4; a(5,2)=1,4; a(5,3)=-0,2
30	1,57	a(1,0)=40,9; a(1,1)=-2,9; a(1,2)=1,0; a(1,3)=-0,2 a(2,0)=37,9; a(2,1)=-0,8; a(2,2)=0,2 a(3,0)=42,2; a(3,1)=-3,3; a(3,2)=1,1; a(3,3)=-0,2 a(4,0)=40,4; a(4,1)=-3,5; a(4,2)=1,1; a(4,3)=-0,2 a(5,0)=40,6; a(5,1)=-2,3; a(5,2)=0,5
	3,14	a(1,0)=49,3; a(1,1)=-2,9; a(1,2)=1,2; a(1,3)=-0,1 a(2,0)=44,8; a(2,1)=-0,4; a(2,2)=0,2 a(3,0)=50,1; a(3,1)=-0,9; a(3,2)=0,2 a(4,0)=47,4; a(4,1)=-3,8; a(4,2)=1,3; a(4,3)=-0,2 a(5,0)=50,5; a(5,1)=-4,5; a(5,2)=1,4; a(5,3)=-0,2
35	1,57	a(1,0)=47,6; a(1,1)=-3,5; a(1,2)=1,2; a(1,3)=-0,2 a(2,0)=44,2; a(2,1)=-1,0; a(2,2)=0,2 a(3,0)=39,6; a(3,1)=-4,5; a(3,2)=1,5; a(3,3)=-0,2 a(4,0)=47,1; a(4,1)=-4,3; a(4,2)=1,4; a(4,3)=-0,2 a(5,0)=38,3; a(5,1)=-4,2; a(5,2)=1,3; a(5,3)=-0,2
	3,14	a(1,0)=57,1; a(1,1)=-3,5; a(1,2)=1,4; a(1,3)=-0,2 a(2,0)=52,2; a(2,1)=-0,6; a(2,2)=0,2 a(3,0)=57,1; a(3,1)=-0,2; a(3,2)=0,02 a(4,0)=55,2; a(4,1)=-4,8; a(4,2)=1,7; a(4,3)=-0,3 a(5,0)=58,4; a(5,1)=-4,7; a(5,2)=1,4; a(5,3)=-0,2
40	1,57	a(1,0)=54,2; a(1,1)=-3,8; a(1,2)=1,3; a(1,3)=-0,2 a(2,0)=50,5; a(2,1)=-1,2; a(2,2)=0,3 a(3,0)=56,7; a(3,1)=-5,1; a(3,2)=1,7; a(3,3)=-0,2 a(4,0)=53,9; a(4,1)=-5,2; a(4,2)=1,7; a(4,3)=-0,3 a(5,0)=54,9; a(5,1)=-4,6; a(5,2)=1,4; a(5,3)=-0,2
	3,14	a(1,0)=64,8; a(1,1)=-3,8; a(1,2)=1,5; a(1,3)=-0,2 a(2,0)=60,3; a(2,1)=-2,1; a(2,2)=0,9; a(2,3)=-0,1 a(3,0)=71,5; a(3,1)=-7,3; a(3,2)=2,4; a(3,3)=-0,2 a(4,0)=63,7; a(4,1)=-6,8; a(4,2)=2,3; a(4,3)=-0,2 a(5,0)=68,4; a(5,1)=-8,4; a(5,2)=2,8; a(5,3)=-0,1

натяг нитки. Іншими словами, необхідно вивчити взаємодію ниток з направляючими великої кривизни змінного радіусу [1,10].

При рішенні задачі вважатимемо нитку нерозтяжною, що зминається в зоні контакту. Великою жорсткістю на вигин нитки нехтуватимемо. Сила тертя підкоряється закону Амонтона [1]. Правомірність таких допущень детально доводиться в роботі [1, 10,12] .

Виберемо направляючі поверхні, які наближаються формою до реальних поверхонь голок, платин: коло радіусу  $R$  (рис. 2.12, а; штриховою лінією показана нитка до зминання, а суцільною – після); спіраль Архімеда, рівняння якої в полярних координатах має вид  $rI=\lambda\alpha$ ,  $\lambda=0,207R$  (рис. 2.12, б, в, де стрілкою вказаний напрям руху нитки); логарифмічну спіраль, рівняння якої в полярних координатах має вид  $rI=\beta e^{a\alpha}$ ,  $a= 0,03$ ,  $\beta=0,944R$  (рис. 2.12, г, д, де стрілкою вказаний напрям руху нитки).

Визначимо для кожної направляючої вираз для довжини дуги нитки. Для цього скористаємося відомим співвідношенням

$$dS = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx, \quad (2.41)$$

тоді для спіралі Архімеда

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\sin \alpha + a \cos \alpha}{\cos \alpha - a \sin \alpha},$$

а для логарифмічної спіралі

$$\frac{dy}{dx} = \frac{a \sin \alpha + \cos \alpha}{a \cos \alpha - \sin \alpha}.$$

Після інтегрування виразу (3.41), отримаємо для спіралі Архімеда

$$S = \lambda \left[ \frac{\alpha_k \sqrt{1 + \alpha_k^2}}{2} + \frac{1}{2} \ln |\alpha_k + \sqrt{1 + \alpha_k^2}| - \frac{\alpha_n \sqrt{1 + \alpha_n^2}}{2} - \frac{1}{2} \ln |\alpha_n + \sqrt{1 + \alpha_n^2}| \right], \quad (2.42)$$

а для логарифмічної спіралі

$$S = \frac{\sqrt{a^2 + 1} \beta}{a} (e^{a\alpha} - 1). \quad (2.43)$$

При виконанні розрахунків було поставлено умову, при якій кут охоплення ниткою кожної направляючої поверхні був рівний  $\pi$ . Довжина дуги охоплення в усіх випадках  $S = \pi R$ . Ці твердження використовувалися

для визначення постійних коефіцієнтів  $\lambda$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$ , що входять в рівняння  $r_1=f(\alpha)$ . Вище приведені значення коефіцієнтів, які визначалися з

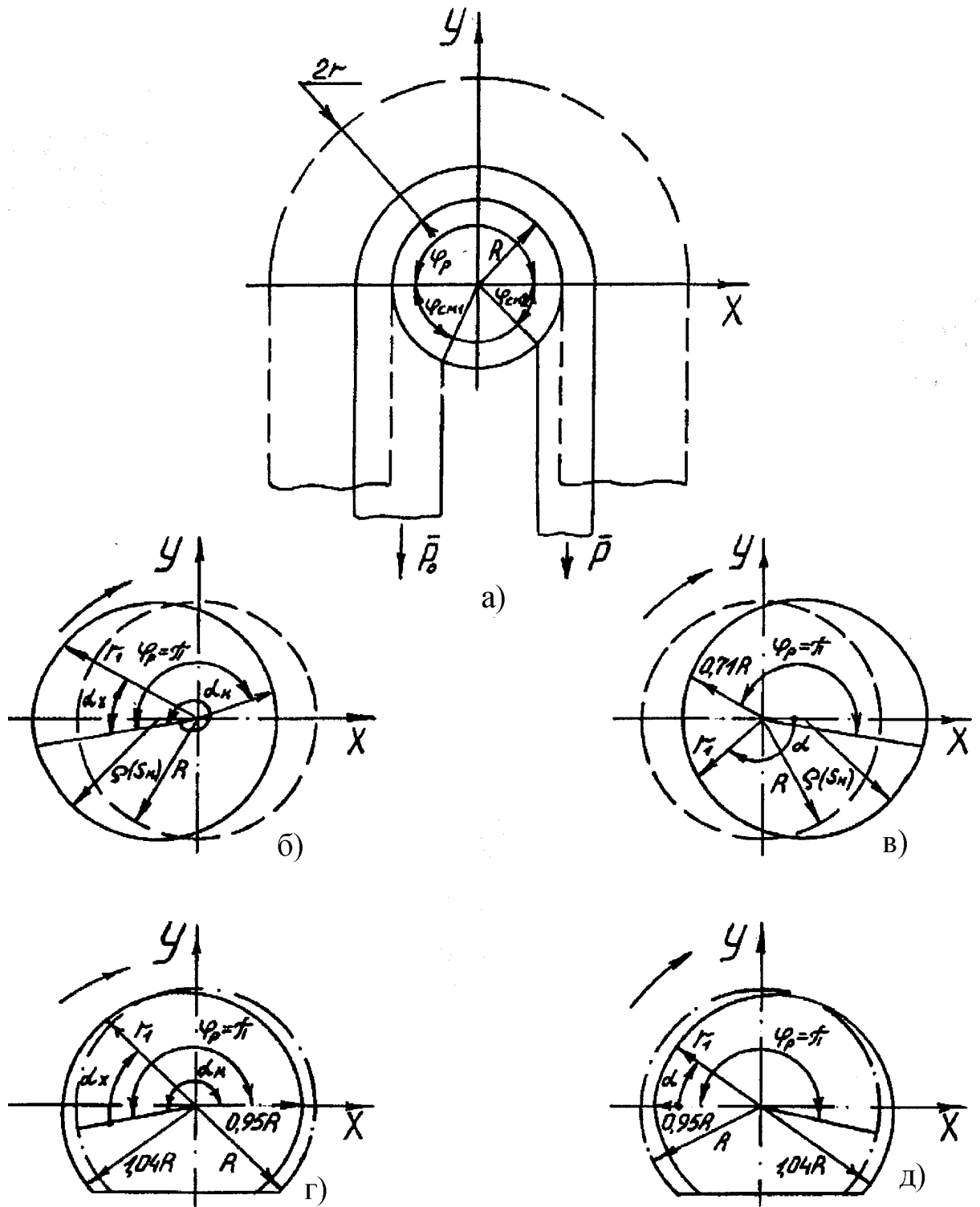


Рис.2.12. Розрахункові схеми для визначення впливу форми напрямної поверхні на натяг нитки

використанням рівнянь (2.42) і (2.43). Щоб отримати в кожному з випадків кут охоплення рівний  $180^\circ$  криві досліджувалися на екстремум, і визначався інтервал зміни кута  $\alpha$ .

В результаті для спіралі Архімеда  $\alpha k = 6,44$  радий (кінцеве значення),  $\alpha n = 3,43$  радий (початкове значення), а для логарифмічної спіралі  $\alpha k = 3,17$  радий,  $\alpha n = 0$ .

Для визначення натягу нитки скористаємося системою рівнянь (2.34). Вирішуючи спільно перші три рівняння системи (2.34), отримаємо

$$\delta = \delta_0 \frac{[\rho(S_0) + r_0]}{[\rho(S) + r_x]} e^{\mu \varphi_p}, \quad (2.44)$$

де  $\delta_0$  - відносна деформація поперечного перетину нитки в точці входу на напрямну;  $\rho(S_0) + r_0$  - радіус кривизни осі нитки в точці входу на напрямну;  $\rho(S) + r_x$  - поточний радіус кривизни осі нитки;  $\varphi_p$  - значення кута обхвату до початку попереднього зсуву (в умовах нашого завдання -  $180^\circ$ ).

Якщо в рівнянні (2.44) вважати, що радіус кривизни буде постійним, то отримаємо відому формулу для визначення відносної деформації перетину нитки.

Натяг нитки визначалося шляхом сумісного вирішення рівнянь (2.34) і (2.44)

$$P = P_0 \left[ 1 + \frac{1}{1+B} (e^{\mu \varphi} - 1) \right]; B = \frac{P_0 r}{BE_1 [\rho(S_0) + r]^2}, \quad (2.45)$$

де  $\varphi$  - реальний кут обхвату. В умовах нашого завдання

$$\varphi = \varphi_p + \varphi_{cm1} + \varphi_{cm2} = \varphi_p + \arccos \left[ 1 - \delta_0 \left( \frac{2r}{\rho(S_0)} \right)^2 \right] + \arccos \left[ 1 - \delta \left( \frac{2r}{\rho(S)} \right)^2 \right]. \quad (2.46)$$

Для визначення радіусів кривизни  $\rho(S)$  скористаємося відомою формулою

$$\rho(S) = \frac{(r_1^2 + r_1'^2)^{\frac{3}{2}}}{|r_1^2 + 2r_1'^2 + r_1 r_1''|}.$$

Для спіралі Архімеда:



- випадок збільшення кривизни із зростанням  $S$  (рис. 2.12, б)

$$\rho(S) = \frac{[\lambda^2(\alpha_k - \alpha_x)^2 + \lambda^2]^{\frac{3}{2}}}{[\lambda^2(\alpha_k - \alpha_x)^2 + 2\lambda^2]}, \quad (2.47)$$

- для випадку зменшення кривизни із зростанням  $S$  (рис. 2.12, в)

$$\rho(S) = \frac{[\lambda^2\alpha^2 + \lambda^2]^{\frac{3}{2}}}{[\lambda^2\alpha^2 + 2\lambda^2]}. \quad (2.48)$$

Логарифмічна спіраль:

- для випадку збільшення кривизни із зростанням  $S$  (рис. 2.12, г)

$$\rho(S) = \beta e^{a(\alpha_k - \alpha_x)} \sqrt{1 + a^2}, \quad (2.49)$$

- для випадку зменшення кривизни із зростанням  $S$  (рис. 2.12, д)

$$\rho(S) = \beta e^{a\alpha} \sqrt{1 + a^2}. \quad (2.50)$$

Був проведений розрахунок для капронової комплексної нитки (XV) (при значеннях  $EI=584,4$  сН/мм<sup>2</sup>,  $b=0,012$  мм,  $r=0,1$  мм,  $\mu=0,2$ ,  $R=1,1$  мм,  $P0 = 10$  сН).

По формулах (2.45), з урахуванням (2.44), (2.46) - (2.50) було визначено натяг ведучої гілки нитки: для кола  $P=19,6$  сН; спіралі Архімеда (випадок збільшення кривизни)  $P=20,4$  сН; спіралі Архімеда (випадок зменшення кривизни)  $P=19,2$  сН; логарифмічної спіралі (випадок збільшення кривизни)  $P=19,8$  сН; логарифмічної спіралі (випадок зменшення кривизни)  $P = 19,7$  сН.

Аналізуючи набутих значень натягу, приходимо до висновку, що мінімальне значення буде при використанні напрямної у формі спіралі Архімеда з кривизною, що зменшується.

Менший натяг завжди буває там, де кривизна направляючої поверхні зменшується від точки входу нитки до точки сходу. Це пояснюється тим, що при такій формі направляючої поверхні зминання нитки на вході йде інтенсивніше при не дуже високому натягу нитки. При цьому, форма направляючої поверхні впливає на величину повного кута обхвату.

Цілком очевидно, що забезпечити нормальні умови руху нитки по напрямній великої кривизни можна шляхом підбору форми поверхні, при якій деформація перетину в будь-якій точці нитки буде мінімальною, рівною її початковому значенню. Для цього необхідно, щоб нормальний тиск  $N$  на дузі контакту зберігав постійне значення.

З системи рівнянь (2.34), з обліком (2.44), можна отримати при  $\delta = \delta_0 = \text{const}$  і  $d^2\delta/dS^2 = 0$

$$\left\{ \frac{l}{\rho(S) + r} - \frac{\delta r}{[\rho(S) + r]^2} \right\} P = bE_l \delta. \quad (2.51)$$

З виразу (2.44), враховуючи умову постійності деформації, визначимо

$$\rho(S) = \rho(S_0)e^{\mu\varphi_p} + r(e^{\mu\varphi_p} - 1). \quad (2.52)$$

Закон зміни натягу ведучій гілці нитки прийме вигляд

$$P = \frac{bE_l e^{\mu\varphi_p} [\rho(S_0) + r]}{\left\{ \frac{l}{\delta_0} - \frac{r}{e^{\mu\varphi_p} [\rho(S_0) + r]} \right\}}. \quad (2.53)$$

Аналіз залежності (2.53) показує, що найбільший натяг мають нитки, коефіцієнт тертя яких об напрямну більше при невисокому значенні модуля пружності на стиснення.

## 2.5. Критерії вибору розмірів спрямовувачів нитки

Вибір оптимальних розмірів спрямовувачів нитки повинен проводитися на підставі багатьох критеріїв. Тут будуть розглянуті два основні технологічні критерії: мінімальне натяг ведучої гілки нитки після спрямовувача нитки і виключення можливості збільшення кута обхвату більше  $360^\circ$  за рахунок зминання в зоні контакту.

Перейдемо до математичної формалізації даних критеріїв. Для цього скористаємося системою рівнянь, що описують рух гнучкої на вигин нитки

що зминається по циліндричній направляючій (2.34).(2.40)

$$\begin{aligned}
 P_1 &= P_0 \left[ 1 + \frac{R+r}{R+r(1-\delta_0)} (e^{\mu\varphi} - 1) \right]; \delta = \delta_0 e^{\mu\varphi_p}; \\
 \delta_0 &= \frac{P_0(R+r)}{[rP_0 + Eb_1(R+r)^2]}; \mu = \frac{aR^{b_1}}{P_0^{b_1}}; \\
 \varphi &= \varphi_p + \arccos \left[ 1 - \delta_0 \left( \frac{2r}{R} \right)^2 \right] + \arccos \left[ 1 - \delta \left( \frac{2r}{R} \right)^2 \right],
 \end{aligned} \tag{2.54}$$

де  $P_1, P_0$  - натяг провідної і веденої гілки нитки;  $r, R$  - радіус нитки і що циліндровою направляє;  $\delta, \delta_0$  - відносна деформація поперечного перетину в точках сходу і входу нитки на напрямну;  $\mu$  - коефіцієнт тертя;  $\varphi$  - реальний кут обхвату;  $\varphi_p$  - початковий кут обхвату (до зминання);  $EI$  - модуль пружності нитки при стисненні;  $b$  - ширина сліду контакту нитки на тій, що направляє;  $a, b_1$  - досвідчені коефіцієнти, вибрані для кожної нитки окремо.

Введемо три нові функції

$$L_1 = R + r; L_2 = r\delta_0; L_3 = e^{\mu\varphi} - 1. \tag{2.55}$$

Тоді

$$P_1 = P_0 \left( 1 + \frac{L_1 L_3}{L_1 - L_2} \right).$$

Диференціюючи останнє рівняння по  $R$ , в остаточному вигляді отримаємо

$$\begin{aligned}
 L_3' L_1^2 - L_1' L_3 L_2 - L_1 L_3' L_2 + L_2' L_1 L_3 &= 0; \\
 L_1' &= \frac{\partial L_1}{\partial R} = 1; \\
 L_2' &= \frac{\partial L_2}{\partial R} = r P_0 \left\{ \frac{[rP_0 + E_1 b(R+r)^2] - 2E_1 b(R+r)^2}{[rP_0 + E_1 b(R+r)^2]^2} \right\}; \\
 L_3' &= \frac{\partial L_3}{\partial R} = e^{\mu\varphi} (\mu' \varphi + \mu \varphi'),
 \end{aligned} \tag{2.56}$$

де

$$\mu' = \frac{\partial \mu}{\partial R} = \frac{ab_1 R^{b_1-1}}{P_0^{b_1}};$$

$$\varphi' = \frac{\partial \varphi}{\partial R} = \frac{4r}{R^2} \left\{ \frac{L'_2 - L_2 \frac{2}{R}}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{4L_2 r}{R^2}\right)^2}} + e^{\mu \varphi_p} \frac{\left[ L'_2 + L_2 \left( e^{\mu \varphi_p} - \frac{2}{R} \right) \right]}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{4L_2 e^{\mu \varphi_p} r}{R^2}\right)^2}} \right\}.$$

Перше рівняння системи (2.56) є математичним записом першого критерію. Математичний запис другого критерію можна виразити

$$\pi - \varphi_p \geq \arccos\left(1 - L_2 \frac{4r}{R^2}\right) + \arccos\left(1 - e^{\mu \varphi_p} L_2 \frac{4r}{R^2}\right),$$

де  $\pi$  - максимально можливий кут обхвату однією гілкою циліндричної направляючої поверхні.

Система рівнянь (2.56) є трансцендентною. Для її вирішення було розроблено спеціальне програмне забезпечення. Рішення виконувалося на ЕОМ. На рис. 2.13 показані графічні залежності зміни невідомої величини  $R$  (для вказаних ниток) від натягу веденої гілки  $P_0$ . Розрахунки проводилися для кута охоплення  $\varphi_p = 3,14$  рад. Аналіз отриманих залежностей показав, що найбільші коливання ми бачимо для капронової комплексної нитки (ХУ) 28 Т і віскозній комплексної нитки (XIV) 16,7 Т. Так для першої максимальне значення радіусу має при  $P_0 = 15$  сН  $R = 2,5$  мм, а мінімальне при  $P_0 = 5$  сН  $R = 1,3$  мм. Для другої - максимальне при  $P_0 = 10$  сН  $R = 1,9$  мм, а мінімальне при  $P_0 = 5$  сН  $R = 1,2$  мм. Тут же представлені відповідні експериментальні дані (див. главу 3). Для інших трьох ниток залежності носять явно виражений характер. Максимальне значення радіусу маємо для бавовняної пряжі (XI) 27,6 Т. Така поведінка ниток пояснюється їх фізико - механічними властивостями. Так нитки XIV і XV володіють, в порівнянні з іншими, мінімальною величиною жорсткості на вигин, відповідно до 0,2 і 0,22 сН·мм. Крім того, необхідно враховувати і величину діаметру поперечного перетину ниток.

$R_{min}, мм$

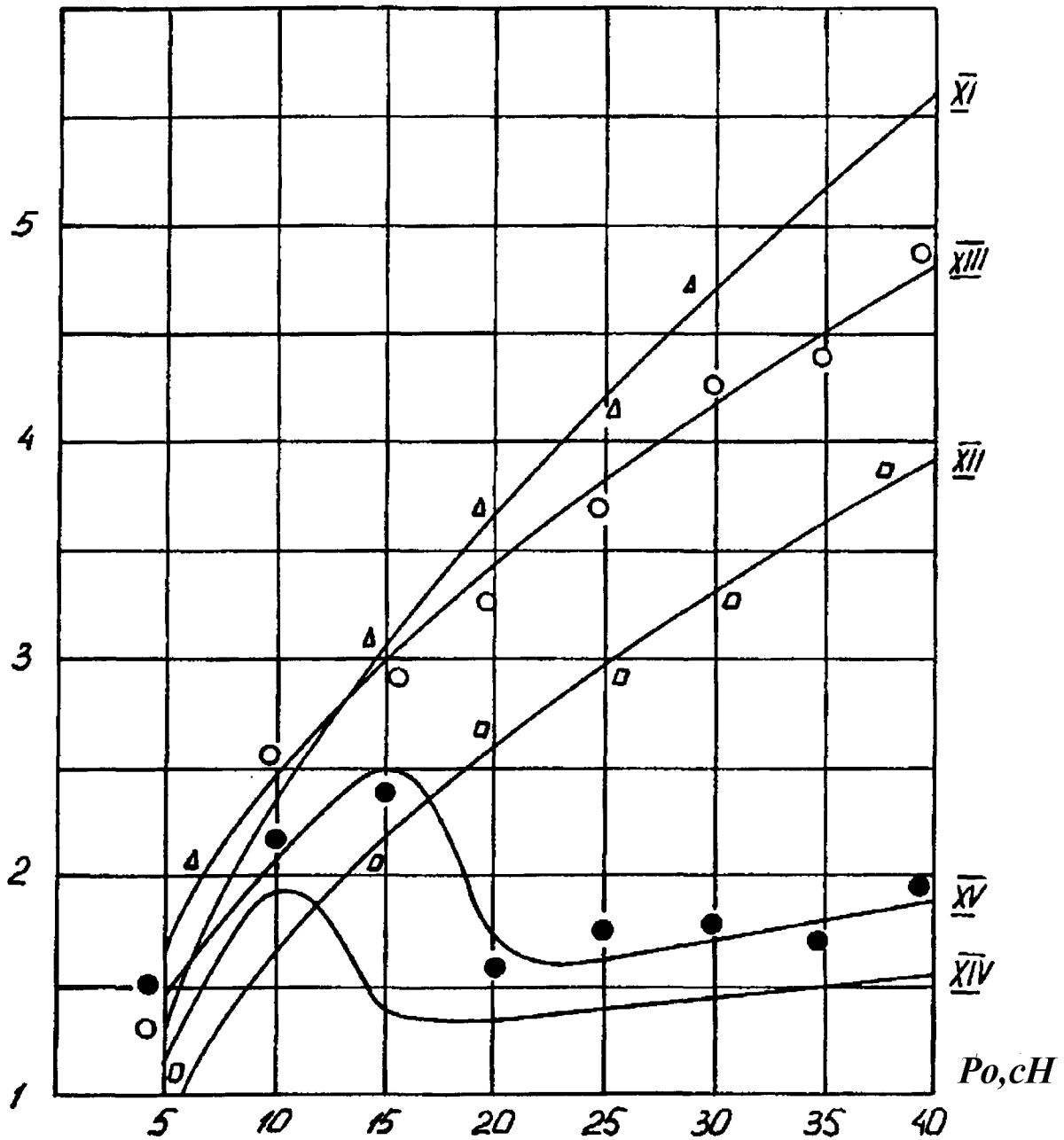


Рис.2.13. Визначення значення радіусу кривизни напрямної для екстремального значення натягу ведучої гілки

Отримані результати створюють передумови для оптимізації розмірів спрямовувачів нитки трикотажних машин. По попередніх розрахунках економія металу на виготовлення відповідних спрямовувачів

нитки для автоматів рукавичок ПА-8 складе до 30%.

Отримані залежності (2.56) є теоретичною основою для САПР спрямовувачів нитки різних трикотажних машин. Очевидно, що будова і властивості ниток є визначальним чинником при розробці форми і розмірів спрямовувачів нитки.

### Основні висновки по розділу

1. Проведено теоретичне дослідження процесу взаємодії нитки з направляючими поверхнями малої кривизни при її подовжньому і поперечному ковзанні. При цьому:

- визначено натяг ведучої гілки нитки у разі змінного радіусу кривизни

$$P = P_0 \exp \left\{ \frac{aa_1 b_1 c_1}{P_0^b (b + c_1 - 1)} \left[ \rho^{(b+c_1-1)} - \rho_0^{(b+c_1-1)} \right] \right\};$$

- встановлено, що істотний вплив на натяг нитки дає зміна коефіцієнта тертя;

- виявлені основні закони зміни натягу від дугової координати і отримана залежність радіусу кривизни направляючої поверхні від дугової координати, яка дозволяє реалізувати той або інший закон

$$\rho = \left[ \frac{P_0^b a_1 a_{22} s^{(a_{22}-1)}}{a(I + a_1 s^{a_{22}})} \right]^{\frac{1}{b-1}};$$

- отримані вирази для визначення кута обхвату ниткою напрямної з урахуванням жорсткості на вигін у разі постійного радіусу кривизни для різних силових схем вантаження

$$\frac{Bq_*^2}{2P_0} - I + \frac{R}{P_0} \cos(\beta + \alpha) = \cos(\gamma + \alpha) - \frac{R}{P_0} \cos(\gamma - \beta);$$

- досліджено поперечне ковзання нитки по напрямній постійного радіусу кривизни, визначені залежності для форми осі і натягу з урахуванням сили тяжкості

$$Z = \frac{kR\varphi^2}{2} + \frac{\mu_0 g (\cos \lambda k - \sin \lambda) R \varphi}{2P_B \cos \gamma_b} \left( \varphi - \frac{\pi}{2} \right) + R \operatorname{tg} \gamma_b \varphi - kR \frac{\pi}{2} \varphi;$$

$$P = P_B \cos \gamma_b \sqrt{1 + \left[ k\varphi + \frac{\mu_0 g (\cos \lambda k - \sin \lambda)}{P_B \cos \gamma_b} \left( \varphi - \frac{\pi}{2} \right) + \operatorname{tg} \gamma_b - k \frac{\pi}{2} \right]^2}.$$

2. Досліджена рівновага жорсткої на вигин нитки в полі сили тяжіння.

Отримані виразу для визначення форми осі нитки і її натягу

$$P = P_0 + \mu_0 g y + \frac{B}{2} (q_{i0}^2 - q_1^2); \cos \varphi = \sqrt{\frac{q_1}{q_{i0}} e^{\frac{B}{3\mu_0 g} (q_{i0}^3 - q_1^3)}}.$$

3. Для випадку направляючої поверхні постійної кривизни з урахуванням змінання, жорсткості на вигин визначені вирази для кута обхвату, натягу нитки

$$\begin{aligned} \varphi = \varphi_p + \arccos \left[ 1 - \delta_0 \left( \frac{2r}{R} \right)^2 \right] + \arccos \left[ 1 - \delta \left( \frac{2r}{R} \right)^2 \right] - \\ - \arccos \left[ 1 - \frac{B_0}{2P_0(R+r)^2} \right] - \arccos \left[ 1 - \frac{B_0}{2P_1(R+r)^2} \right], \\ P_1 + \left\{ \frac{B_0}{2[R+r(1-\delta_0)]^2} - P_0 \right\} \left\langle 1 + \frac{(R+r)}{R+r(1-\delta_0)} \left\{ \exp \left[ \mu \left\{ \varphi_p + \arccos \left[ 1 - \delta_0 \left( \frac{2r}{R} \right)^2 \right] + \right. \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \left. + \arccos \left[ 1 - \delta \left( \frac{2r}{R} \right)^2 \right] - \arccos \left[ 1 - \frac{B_0}{2P_0(R+r)^2} \right] - \arccos \left[ 1 - \frac{B_0}{2P_1(R+r)^2} \right] \right\} - 1 \right\} \right\rangle - \\ - \frac{B_0}{2[R+r(1-\delta)]^2} = 0. \end{aligned}$$

4. Визначений вплив форми поперечного перетину напрямної на величину натягу ведучої гілки нитки. Встановлено, що менший натяг завжди буває там, де кривизна направляючої поверхні зменшується від точки входу нитки до точки сходу. Це пояснюється тим, що змінання нитки на вході йде інтенсивніше при не дуже високому натязі нитки. Встановлено, що форма направляючої поверхні, за інших рівних умов, впливає на величину повного кута обхвату.

5. Вибір оптимальних розмірів спрямовувачів нитки може проводитися на підставі двох основних технологічних критеріях: мінімального натягу ведучої гілки нитки після спрямовувачів нитки і

виключення можливості збільшення кута обхвату більше  $360^\circ$  за рахунок зминання в зоні контакту.

6. Отримані основні системи рівнянь, які дозволяють здійснити математичну формалізацію вказаних критеріїв

$$\begin{aligned}
 L_3' L_1^2 - L_1' L_3 L_2 - L_1 L_3' L_2 + L_2' L_1 L_3 &= 0; \\
 L_1' &= \frac{\partial L_1}{\partial R} = 1; \\
 L_2' &= \frac{\partial L_2}{\partial R} = r P_0 \left\{ \frac{[r P_0 + E_1 b (R+r)^2] - 2 E_1 b (R+r)^2}{[r P_0 + E_1 b (R+r)^2]^2} \right\}; \\
 L_3' &= \frac{\partial L_3}{\partial R} = e^{\mu \varphi} (\mu' \varphi + \mu \varphi'), \\
 \mu' &= \frac{\partial \mu}{\partial R} = \frac{a b_1 R^{b_1-1}}{P_0^{b_1}}; \\
 \varphi' &= \frac{\partial \varphi}{\partial R} = \frac{4r}{R^2} \left\{ \frac{L_2' - L_2 \frac{2}{R}}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{4L_2 r}{R^2}\right)^2}} + e^{\mu \varphi} \frac{\left[ L_2' + L_2 \left( e^{\mu \varphi} - \frac{2}{R} \right) \right]}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{4L_2 e^{\mu \varphi} r}{R^2}\right)^2}} \right\}.
 \end{aligned}$$

7. Отримані залежності можуть бути використані як теоретична основа для САПР спрямовувачів нитки різних трикотажних машин.



### **3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ВЗАЄМОДІЇ НИТОК З НАПРАВЛЯЮЧИМИ**

У цьому розділі наводяться результати досліджень за визначенням впливу різних чинників на зміну натягу ведучої гілки нитки при її взаємодії з направляючою поверхнею. Наводяться результати експериментальних досліджень впливу умов взаємодії ниток з напрямними на величину розривного навантаження і розривного подовження.

Дослідження процесу взаємодії ниток з направляючими поверхнями вимагає проведення цілої серії дослідів для підтвердження коректності зроблених допущень при виведенні теоретичних залежностей в розділі 2 і визначення меж використання останніх.

Проведення експериментальних досліджень необхідно починати з вибору об'єкту дослідження і побудови плану експерименту.

Проведення даних експериментальних досліджень пояснювалося і тим, що до теперішнього часу накопичилися достатньо теоретичних розробок [1,10,12], результати яких вимагали експериментального підтвердження.

Дослідження анізотропії фізико-механических властивостей текстильних ниток дозволяє оцінити умови переробки ниток на технологічному устаткуванні, коли має місце подовжній і поперечний рух нитки щодо робочих органів.

Активне планування експерименту, використання методів математичної статистики дозволяє отримати регресійні залежності, які описують процес з необхідною точністю, при цьому число чинників може досягати значної величини. Застосування ЕОМ дозволяє легко визначати величину коефіцієнтів в рівняннях регресії, їх значущість. Отримані залежності, після відповідних перетворень, можна використовувати для оптимізації процесу взаємодії нитки з направляючою поверхнею.

### **3.1. Чинники, що впливають на зміну натягу нитки при її взаємодії з напрямною. Обґрунтування вибору ниток і пряжі.**

#### **План проведення експерименту**

Визначення основних чинників, які впливають на зміну натягу нитки, яка рухається по направляючій поверхні, має значення при виборі стратегії проведення експерименту, при розробці схеми експериментальної установки.

При числі чинників, що не перевищує 7, на стадії попереднього вивчення об'єкту, цілком коректне проведення психологічного експерименту або методу апріорного ранжирування чинників, який заснований на відомих методах рангової кореляції.

Наукова інформація, що накопичилася до теперішнього часу, з даної проблеми дозволяє побудувати середню апріорну діаграму рангів. По одній осі відкладаються чинники, а по іншій суми рангів. До даних чинників були віднесені: радіус кривизни направляючої поверхні, натяг веденої гілки нитки, кут обхвату ниткою напрямної, швидкість руху нитки, температура навколишнього середовища, вологість повітря, коефіцієнт тертя між ниткою і напрямною, шорсткість направляючої поверхні, матеріал і структура нитки.

Аналіз середньої апріорної діаграми рангів дозволив встановити, що для радіусу кривизни напрямної, натягу веденої гілки, кута обхвату, швидкості руху нитки, коефіцієнта тертя між ниткою і напрямною, шорсткості направляючої поверхні і матеріалу і структури нитки розподіл відповідних сум рангів рівномірний. Для температури навколишнього середовища і вологості повітря розподіл нерівномірний, такий, що експоненціальну убиваючий характер. Виходячи з цього, дані два чинники були виключені з подальшого розгляду.

Таким чином, при проведенні експериментальних досліджень, нами було поставлено завдання за визначенням впливу радіусу кривизни

направляючої поверхні  $R$ , натяг веденої гілки  $P_0$ , кута обхвату  $\varphi$  і швидкості руху нитки  $v$  на натяг ведучої гілки  $P$  нитки.

Шорсткість направляючої поверхні  $Ra(Rz)$  в експерименті була рівній шорсткості поверхні направляючих і робочих органів машин легкої промисловості, що контактують з ниткою. Детально про це буде сказано нижче.

Коефіцієнт тертя, як це було раніше встановлено, є синтезованою величиною, залежною від радіусу кривизни напрямної, натягу веденої гілки, матеріалу і структури нитки, шорсткості направляючої поверхні. Враховуючи, що перераховані чинники вже були відібрані для подальшого дослідження, при проведенні експерименту вплив коефіцієнта тертя спеціально не враховувався.

Надалі, при вивченні анізотропії тертя текстильних ниток, нами була проведена ціла серія дослідів (як змінюється величина коефіцієнта тертя при русі нитки в подовжньому і поперечному напрямках).

Вивчення впливу матеріалу і структури ниток на величину натягу ведучої гілки зажадало вибору широкого асортименту ниток, як по структурі, так і по хімічному складу. По структурі (див. розділ 1) нитки можна класифікувати на мононитки, комплексні нитки і пряжу. За походженням всі волокна діляться на натуральних і хімічних. Хімічні, у свою чергу, підрозділяються на штучні і синтетичні. Вельми характерно, що випуск хімічних волокон неухильно зростає. Так в 1980 р. їх частка в загальній кількості складала 55%. У групі синтетичних волокон основним виглядом є поліамідные волокна (капрон) - до 80%. Останнім часом намітився випереджаючий випуск поліэфірних волокон (лавсан).

При виборі ниток нами враховувалися і геометричні розміри поперечного перетину (розрахунковий діаметр) [1,12]. Найширше, при виробленні технічних тканин, використовуються нитки, діаметр яких коливається в межах від 0,2 до 0,7 мм. У трикотажній промисловості, при

виробництві полотен, різного асортименту верхнього і нижнього трикотажу, використовують нитки з розрахунковим діаметром від 0,1 до 0,25 мм.

При виборі ниток для експериментальних досліджень, необхідно зі всього різноманіття останніх зупинитися на найтипівіших, найбільш використовуваних в промисловості, які по структурі і геометричним розмірам придатні для переробки на дуже широкому колі технологічного устаткування. Виходячи з сказаного, нами було вибрано 15 ниток (основні характеристики приведені в таблиці 3.1).

Капронова комплексна нитка (**III** в табл. 3.1), лінійній щільності 93,5 х 3, використовується як основа наповнювач для багатошарових технічних тканин. Її кручення в три складання проводиться на крутильній машині К-176-2 з скручуванням  $100 \pm 20$  кр/м.

Капронова комплексна нитка (**IV**), лінійній щільності 29 текс х 3 х 2, модифікації А і Б, використовується у якості основних і утокових ниток при виготовленні багатошарових технічних тканин. При її першому скручуванні дві капронові комплексні нитки лінійної щільності 29 текс сполучають і скручують на 300 кр/м в лівому напрямі. При другому скручуванні три нитки першого скручування сполучають і скручують в напрямі, протилежному першому скручуванню, -  $180 \pm 20$  кр/м.

Лавсанова комплексна нитка 27,7 текс (**V**), в чотири складання (27,7 х 4), використовується як основа і уток для виготовлення технічних тканин, вживаних в цукровій промисловості. Для лавсанової комплексної нитки 29 текс (**VI** в табл. 3.1), в два складання підвищеного скручування (29 х 2), основним застосуванням є використання як основа і уток при виготовленні фільтрів для цукрової промисловості.

Поліпропіленова нитка 93,5 текс (**VIII**), що складається з 160 філаментарних одиночних ниток, (ПР-6925), застосовується для виготовлення технічних тканин, робочих несучих елементів, у вантажних

конструкціях.

Натуральна сировина, бавовняна (*IX* і *XI*) і вовняна (*X* і *XII*) пряжа, обиралися різної структури. Відповідно: 25 текс х 4 і 27,6 текс; 29,9 текс х 3 і 29,9 текс.

Віскозні пряжа і комплексна нитка, для проведення експерименту, були вибрані наступної структури: 6,7 текс х 7 х 2 середні сукання (*VII*); 28,8 текс (*XIII*); 16,7 текс (*XIV*).

Перераховані вище нитки і пряжа використовуються для виготовлення тканин і трикотажу побутового і технічного призначення.

На підставі набутих значень фактичного тексту розрахунковий діаметр  $d$  нитки визначався по формулі

$$d = k_{00} \sqrt{T},$$

де  $k_{00}$  - експериментальний коефіцієнт (для бавовняної невивіленої пряжи - 0,0395; для вовни - 0,0427; для натурального шовку - 0,0411; для віскозних ниток - 0,0411; для ацетатних ниток - 0,0411; для капронових моноволокон - 0,0332; капрон фіаментарний підвищеного скручування - 0,0370; пологого скручування - 0,0386; для лавсану - 0,0411; для нітрону - 0,0386), який для кожного конкретного виду ниток має певне значення;  $T$  - сумарний фактичний текс.

Для визначення коефіцієнтів жорсткості на вигин  $B$  (див. табл. 3.1) ниток використовувалися відомі методики і прилади.

Відбір проб і лабораторні випробування за визначенням фізико - механічних властивостей (питомого розривного навантаження, відносного розривного подовження) ниток *I*...*XV* проводилися на розривній машині *PM-30-1*. Швидкість розтягування нитки, відповідно до вимог, для одиночної і крученої пряжі зі всіх видів волокон рівна  $10 \pm 1$  мм/с, для всіх хімічних ниток  $20 \pm 2$  мм/с. Відстань між затисками розривної машини була рівна  $500 \pm 1$  мм.

Перед випробуваннями з пакувань відмотувалося 5 м нитки, між

випробуваннями - 1м. Нитка заправлялася в затиски з попереднім натягом.

Таблиця 3.1. Фізико - механічні властивості ниток

№ п/п	Нитка	Характеристика	Структура	Фактичний текс, Т	Розрахунковий діаметр, мм	Коефіцієнт вигинистої жорсткості, В, сН <sup>2</sup> /мм <sup>2</sup>	Питоме розривне навантаження, сН/Т	Відносне розривне подовження %
I	Капронова	Хімічна органічна синтетична гетероланцюгова полиамидная	Мононитка	52	0,24	53,7	45,8	24,0
II	Капронова		Мононитка	36	0,20	21,9	45,0	20,0
III	Капронова		Компл.нитка	280,5	0,64	6,2	58,8	23,0
IV	Капронова		Компл.нитка	174	0,48	1,3	54,0	22,0
XV	Капронова		Компл.нитка	28	0,20	0,22	51,1	23,0
V	Лавсанова	Хімічна органічна синтетична гетероланцюгова полиэфирная	Компл.нитка	110,8	0,40	0,8	39,9	21,0
VI	Лавсанова		Компл.нитка	58	0,30	0,5	40,4	20,0
VII	Віскозна	Хімічна органічна штучна гидратцеллюлозная	Пряжа	93,5	0,39	1,2	14,9	23,0
XIII	Віскозна		Штапел. пряжа	28,8	0,22	0,4	14,9	24,0
XV	Віскозна		Компл.ніть	16,7	0,17	0,2	14,9	24,0
IX	Х/б	Натуральна органічна рослинна целюлозна	Пряжа	100	0,41	2,5	28,0	8,5
XI	Х/б		Пряжа	27,6	0,22	0,7	28,9	9,0
X	Вовна	Натуральна органічна тваринна білкова	Пряжа	89,7	0,40	0,4	10,8	16,5
XII	Вовна		Пряжа	29,9	0,23	0,1	10,7	18,0
VIII	Поліпропіл еновая	Хімічна органічна синтетична карболанцюгова поліолефінова	Компл.нитка	93,5	0,4	1,1	25,1	21,0

Питому розривне навантаження і відносне розривне подовження брали як середній показник 10 розривів нитки. Середнє арифметичне повинно укладатися в необхідні допуски.

Результати визначення величин питомого розривного навантаження і

відносного розривного подовження представлені в таблиці 3.1.

Після визначення чинників, що впливають на збільшення натягу ведучої гілки нитки, обґрунтування і вибору сировини для випробувань, необхідно скласти план (або плани), проведення експерименту. Це дозволить виробити певну стратегію в пошуку оптимального поєднання чинників, що впливають на даний процес.

У таблиці 3.2 приведений план проведення експерименту за визначенням впливу радіусу кривизни направляючої поверхні  $R_i$ , натяг веденої гілки нитки  $P_{oi}$ , кута обхвату ниткою направляючої  $\phi_i$  і швидкості руху нитки  $v_i$  на натяг ведучої гілки  $P_i$ .

При плануванні експерименту, при побудові моделей другого порядку нами було використано ортогональне планування другого порядку. Хоча існують інші оптимальні плани, ортогональне планування використовувалося із-за достатньої простоти і можливості застосування вже розроблених пакетів програм на ЕОМ при обробці отриманих експериментальних даних.

Для кожної з ниток  $i = I-XV$  даним планом передбачається 25 дослідів. По кожному з дослідів передбачалося 3 повторних.

Для капронової комплексної нитки 93,5 Т х 3 (III)  $R_i=0,6\text{мм}$ ,  $h1=0,1\text{мм}$ . Для капронової комплексної нитки 29 Т х 2 х 3 (IV)  $R_i= 1\text{ мм}$ ,  $h1= 0,5\text{ мм}$ . Для капронової мононитки 52 Т (I) і капронової мононитки 36 Т (II)  $R_i= 4\text{ мм}$ ,  $h1= 1\text{ мм}$ . Для капронової мононитки (I) натяг ведучої гілки  $P_{oi}$  (см таблицю 3.2) дорівнювало 10 сН,  $h2=1\text{ сН}$ . По решті ниток  $R_i= 1,7\text{мм}$ ,  $h1=1,1\text{ мм}$ ;  $P_{oi}=9\text{ сН}$ ,  $h2=2\text{сН}$ ;  $\phi_i=2,79\text{ радий}$ ,  $h3=0,35\text{ радий}$ ;  $v_i=1,8\text{ м/с}$ ,  $h4= 0,9\text{ м/с}$ .

Вибір розмірів направляючої поверхні при проведенні експерименту, в пропонованому діапазоні від 0,5 мм до 5 мм, пояснюється тим, що даний інтервал охоплює до 80% всього асортименту голково-платинових виробів спрямовувачів нитки, робочих органів текстильних і трикотажних машин.

Таблиця 3.2. План проведення експерименту

№ варіанту	Досліджувані чинники								Характерні зони матриці
	$x1$	$R$	$x2$	$Po$	$x3$	$\varphi$	$x4$	$\nu$	
<i>1-i-1</i>	+	Ri+h1	+	Poi+ h2	+	$\varphi_i+ h3$	+	vi+ h4	Точки ядра
<i>1-i-2</i>	-	Ri-h1	+	Poi+ h2	+	$\varphi_i+ h3$	+	vi+ h4	
<i>1-i-3</i>	+	Ri+h1	-	Poi- h2	+	$\varphi_i+ h3$	+	vi+ h4	
<i>1-i-4</i>	-	Ri-h1	-	Poi- h2	+	$\varphi_i+ h3$	+	vi+ h4	
<i>1-i-5</i>	+	Ri+h1	+	Poi+ h2	-	$\varphi_i- h3$	+	vi+ h4	
<i>1-i-6</i>	-	Ri-h1	+	Poi+ h2	-	$\varphi_i- h3$	+	vi+ h4	
<i>1-i-7</i>	+	Ri+h1	-	Poi- h2	-	$\varphi_i- h3$	+	vi+ h4	
<i>1-i-8</i>	-	Ri-h1	-	Poi- h2	-	$\varphi_i- h3$	+	vi+ h4	
<i>1-i-9</i>	+	Ri+h1	+	Poi+ h2	+	$\varphi_i+ h3$	-	vi- h4	
<i>1-i-10</i>	-	Ri-h1	+	Poi+ h2	+	$\varphi_i+ h3$	-	vi- h4	
<i>1-i-11</i>	+	Ri+h1	-	Poi- h2	+	$\varphi_i+ h3$	-	vi- h4	
<i>1-i-12</i>	-	Ri-h1	-	Poi- h2	+	$\varphi_i+ h3$	-	vi- h4	
<i>1-i-13</i>	+	Ri+h1	+	Poi+ h2	-	$\varphi_i- h3$	-	vi- h4	
<i>1-i-14</i>	-	Ri-h1	+	Poi+ h2	-	$\varphi_i- h3$	-	vi- h4	
<i>1-i-15</i>	+	Ri+h1	-	Poi- h2	-	$\varphi_i- h3$	-	vi- h4	
<i>1-i-16</i>	-	Ri-h1	-	Poi- h2	-	$\varphi_i- h3$	-	vi- h4	
<i>1-i-17</i>	-1,414	Ri-*	0	Poi	0	$\varphi_i$	0	vi	Зоряні точки
<i>1-i-18</i>	+1,414	Ri+*	0	Poi	0	$\varphi_i$	0	vi	
<i>1-i-19</i>	0	Ri	-1,414	Poi-*	0	$\varphi_i$	0	vi	
<i>1-i-20</i>	0	Ri	+1,414	Poi+*	0	$\varphi_i$	0	vi	
<i>1-i-21</i>	0	Ri	0	Poi	-1,414	$\varphi_i-*$	0	vi	
<i>1-i-22</i>	0	Ri	0	Poi	+1,414	$\varphi_i+*$	0	vi	
<i>1-i-23</i>	0	Ri	0	Poi	0	$\varphi_i$	-1,414	vi-*	
<i>1-i-24</i>	0	Ri	0	Poi	0	$\varphi_i$	+1,414	vi+*	
<i>1-i-25</i>	0	Ri	0	Poi	0	$\varphi_i$	0	vi	Нульова точка

Інтервали зміни величини натягу веденої гілки нитки (від 7 до 11 сН) були вибрані виходячи з умов переробки ниток на ткацьких верстатах і в'язальних машинах, підготовчому устаткуванні.



Кут обхвату направляючої поверхні, для кожного конкретного випадку, є величиною змінною. Зважаючи на специфіку переробки ниток на трикотажному устаткуванні, де мають місце великі перегини ниток при взаємодії з робочими органами, нами був вибраний інтервал зміни від  $140^\circ$  до  $180^\circ$ .

Швидкість руху нитки в експерименті змінювалася від 0,53 м/с до 3,1 м/с. Такий інтервал варіювання пояснюється появою високошвидкісних в'язальних машин і ткацьких верстатів.

Для визначення впливу умов взаємодії різних ниток з направляючою поверхнею на питоме розривне навантаження і відносне розривне подовження, був розроблений план експерименту, приведений в таблиці 3.3.

Для кожної з 15 ниток варіювався радіус кривизни направляючої поверхні від 0,6мм до 2,6мм з кроком 1мм для ниток *V-XV*. Решта трьох чинників обиралася відповідними нульовій крапці в кожній серії (табл. 3.2) експериментальних досліджень. Для капронових монониток радіус кривизни направляючої поверхні змінювався від 3 до 5мм з кроком 1мм. Для капронових комплексних ниток (*III-IV*) - від 0,5 до 0,7мм з кроком 0,1мм.

Швидкість зміни деформації варіювалася в межах від 80 мм/мін до 800 мм/мін з кроком 360 мм/мін. Проведення даної серії експериментальних досліджень ставило своєю за мету визначення впливу кривизни направляючої поверхні і швидкості розтягування нитки на її фізико - механічні властивості.

Для досягнення поставленого завдання був реалізований повний факторний експеримент для двох чинників: радіусу кривизни напрямної і швидкості розтягування нитки. Необхідно відзначити, що вибір лінійної моделі для опису даного процесу обумовлений наявністю наукової інформації з досліджуваної проблеми.

Таблиця 3.3. План проведення експерименту

№ варіанту	Чинники					
	$x_1$	$R$	$x_2$	$V_g$	$x_1 x_2$	$R \cdot V_g$
Для питомого розривного навантаження, $P_p$						
<b>2-i-1</b>	+	$R_i+h_i$	+	$v_{g_i+h_j}$	+	$(R_i+h_i)(v_{g_i+h_j})$
<b>2-i-2</b>	-	$R_i-h_i$	+	$v_{g_i+h_j}$	-	$(R_i-h_i)(v_{g_i+h_j})$
<b>2-i-3</b>	+	$R_i+h_i$	-	$v_{g_i-h_j}$	-	$(R_i+h_i)(v_{g_i-h_j})$
<b>2-i-4</b>	-	$R_i-h_i$	-	$v_{g_i-h_j}$	+	$(R_i-h_i)(v_{g_i-h_j})$
Для відносного розривного подовження, $\epsilon_p$						
<b>3-i-1</b>	+	$R_i+h_i$	+	$v_{g_i+h_j}$	+	$(R_i+h_i)(v_{g_i+h_j})$
<b>3-i-2</b>	-	$R_i-h_i$	+	$v_{g_i+h_j}$	-	$(R_i-h_i)(v_{g_i+h_j})$
<b>3-i-3</b>	+	$R_i+h_i$	-	$v_{g_i-h_j}$	-	$(R_i+h_i)(v_{g_i-h_j})$
<b>3-i-4</b>	-	$R_i-h_i$	-	$v_{g_i-h_j}$	+	$(R_i-h_i)(v_{g_i-h_j})$

Реальні текстильні нитки володіють анізотропією властивостей в подовжньому і поперечному напрямках. Коефіцієнт тертя, величина якого визначає натяг нитки при її проходженні по напрямній, також має різне значення для однієї і тієї ж нитки.

У даній роботі була проведена серія експериментальних досліджень за визначенням анізотропії фрикційних властивостей різних ниток і пражі. План експерименту приведений в таблиці 3.4.

Величину коефіцієнта тертя в подовжньому і поперечному напрямках визначали для різних радіусів  $R_i$  кривизни направляючої поверхні. При цьому величина радіусу кривизни повинна мати таке значення, при якому виключається змінання (або її вплив практично не позначається на результатах досвіду). Експериментальні дослідження проводилися для **IV-U**, **VII-X** ниток. Натяг веденої гілки нитки  $P_0$  відповідно нульовій точці дорівнював 9 сН, кут обхвату був рівний 1,57 радий.

У таблиці 3.4 приведений також план експериментальних досліджень за визначенням впливу форми направляючої поверхні на натяг ведучої

гілки нитки. Для порівняння було заплановано проведення серії експериментів, коли поверхня напрямної мала постійну кривизну. У якості направляючої поверхні змінної кривизни використовували параболічну напрямну. Про її геометричні розміри буде сказано нижче, при описі експериментальної установки.

Таблиця 3.4. План проведення експерименту для визначення анізотропії фрикційних властивостей ниток

№ варіанту	Радіус кривизни напрямної	Для $i$ -ої нитки			
		Коефіцієнт тертя в подовжньому напрямі	Коефіцієнт тертя в поперечном у напрямі	Натяг ведучої гілки нитки при $R=const$	Натяг ведучої галки нитки при $R \neq const$
<b>4-i- 1</b>	$R_i$	$\mu_{pi}$	$\mu_{\theta i}$	$P_i$	$P_i^*$
<b>4-i- 2</b>	$R_i - h_i$	$\mu_{pi}(-S)$	$\mu_{\theta i}(-S)$	$P_i(-S)$	$P_i^*(-S)$
<b>4-i- 3</b>	$R_i - h_i$	$\mu_{pi}(-1)$	$\mu_{\theta i}(-1)$	$P_i(-1)$	$P_i^*(-1)$
<b>4-i- 4</b>	$R_i + h_i$	$\mu_{pi}(S)$	$\mu_{\theta i}(S)$	$P_i(S)$	$P_i^*(S)$
<b>4-i- 5</b>	$R_i + h_i$	$\mu_{pi}(1)$	$\mu_{\theta i}(1)$	$P_i(1)$	$P_i^*(1)$

Тут же необхідно відзначити, що радіус кривизни направляючої  $R_i$ , у разі змінної кривизни, представляв середнє арифметичне від максимального і мінімального радіусів кривизни на дузі обхвату параболі. Величина кроку  $h_i$  варіювання радіусу кривизни направляючої поверхні складала 1 мм. Натяг веденої гілки нитки, як і у попередньому випадку, складала 9 сН, а кут обхвату дорівнював  $\varphi = 1,57$  рад.

### 3.2. Розробка установок для проведення експерименту.

#### Обґрунтування вибору реєструючої та вимірювальної апаратури

Для реалізації приведенного вище плану експериментальних досліджень потрібно було розробити спеціальні установки. Велике

значення має обґрунтування і вибір реєструючої та вимірювальної апаратури, яка є невід'ємною частиною будь-якої експериментальної установки.

Глибше вивчення процесу взаємодії ниток з направляючими поверхнями і нитками, виступаючими у якості напрямної, коли кривизна поверхні сорозмірна з радіусом поперечного перетину нитки, привело до необхідності імітації даного виду взаємодії в експериментальних установках.

На думку авторів, подальший розвиток питання по експериментальному дослідженню процесу взаємодії ниток з напрямними повинен йти по шляху розробки універсальних, багатофункціональних установок, що дозволяють проводити комплексні дослідження процесу взаємодії ниток з напрямними, імітувати реальні умови, що виникають при переробці ниток на технологічному устаткуванні.

Для здійснення плану експериментальних досліджень нами були розроблені прилади для визначення натягу ведучої гілки нитки; для визначення анізотропії фрикційних властивостей ниток; для визначення фрикційних властивостей ниток в умовах, наближених до реальних, таких, що виникають на технологічному устаткуванні. Дві з цих установок захищені авторськими свідоцтвами.

Розглянемо конструкцію приладу для визначення анізотропії тертя. Схема приладу показана на рис. 3.1. У пропонованому авторами приладі шків I змонтовано з можливістю горизонтального переміщення відносно осі обертання, причому одна торцева сторона має нахил в  $15^\circ$  і упирається в нерухомо укріплений ролик 6, а інша контактує з пружиною 10. Гнучка стрічка 3 з високою жорсткістю в подовжньому і поперечному напрямі, сполучена з вантажем 4 з одного боку, балкою з тензометричним датчиком 5 з іншого боку, має на нижній поверхні з боку шківа прикріплений зразок випробовуваної нитки 2, і розташовується між трьома парами роликів 7,

укріплених на двох кронштейнах 8. Кронштейни роликів сполучені з балкою з тензометричним датчиком 9.

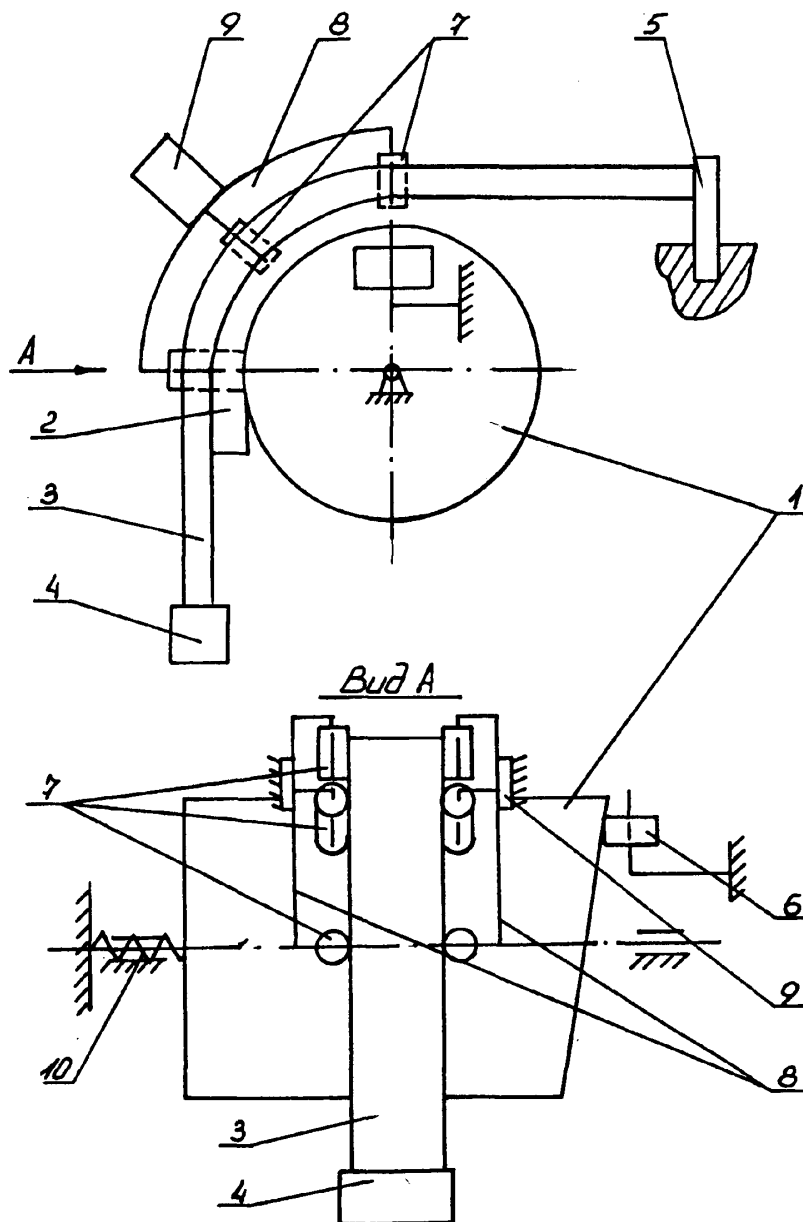


Рис.3.1. Прилад для визначення коефіцієнта тертя (А.с. СРСР №1805341)

Прилад працює таким чином. Шків I приводять в обертання, він захоплює за собою зразок 2 випробовувані матеріали разом з жорстко пов'язаною з ним гнучкою стрічкою 3. При цьому на шків з одного торцевого боку впливає пружина 10, упираючи його в ролик 6 з іншого торцевого боку. При обертанні шківа ролик контактує з його похилою торцевою поверхнею. В результаті цього шків переміщається уздовж осі обертання. Сила тертя, що виникає при цьому, в поперечному напрямі через ролики 7, укріплені на кронштейнах 8, викликає вигин балок з тензометричними датчиками 9.

Швидкість обертання шківа I вибиралася такою, при якій забезпечувався діапазон зміни лінійній швидкості на ободі від 0,9 до 2,8 м/с (див. табл. 3.2, 3.4). Вага вантажу 4 підбиралася таким, при якому забезпечувалася зміна натягу веденій гіки стрічки 3 і випробовуваних ниток від 7 сН до 11 сН. Кут обхвату нитками шківа складав 1,57 радий (див. табл. 3.4.).

Для оцінки фрикційних властивостей ниток, що взаємодіють з направляючими поверхнями великої кривизни, нами був розроблений прилад, що дозволяє імітувати умови переробки ниток на технологічному устаткуванні. Схема приладу показана на мал. 3.2.

Даний прилад є механічним механізмом, при градуюванні якого використовувалися відомі методи подібності і розмірності в механіці. У корпусі I розміщений утримувач бобіни 2, спрямовувач нитки 3, натягував нитки 4, вимірювальний вузол у вигляді каретки 5 з трьома закріпленими на ній спрямовувачами нитки 6. Каретка 5 встановлена в тій, що направляє 7 корпусів I і містить індикаторну стрілку 8 і фігурний кронштейн 9. Нитку отримує рух від приводу II. Індикаторна лінійка 10 була розмічена в одиницях, що характеризують фрикційні властивості нитки.

На корпусі приладу змонтовані рухливі ролики 12, 13, 14 для переміщення нитки. Напрямна 7 встановлена з можливістю подовжнього

переміщення за допомогою механізму для переміщення 15 відносно нерухомо змонтованих підшипників ковзання 16. Знизу направляючої 7 на корпусі 1 змонтовані два шківів 17 і 18 з нескінченною гнучкою металевою стрічкою 19, на якій закріплена металева пластинка 20 з контактом 21 і пружиною 22.

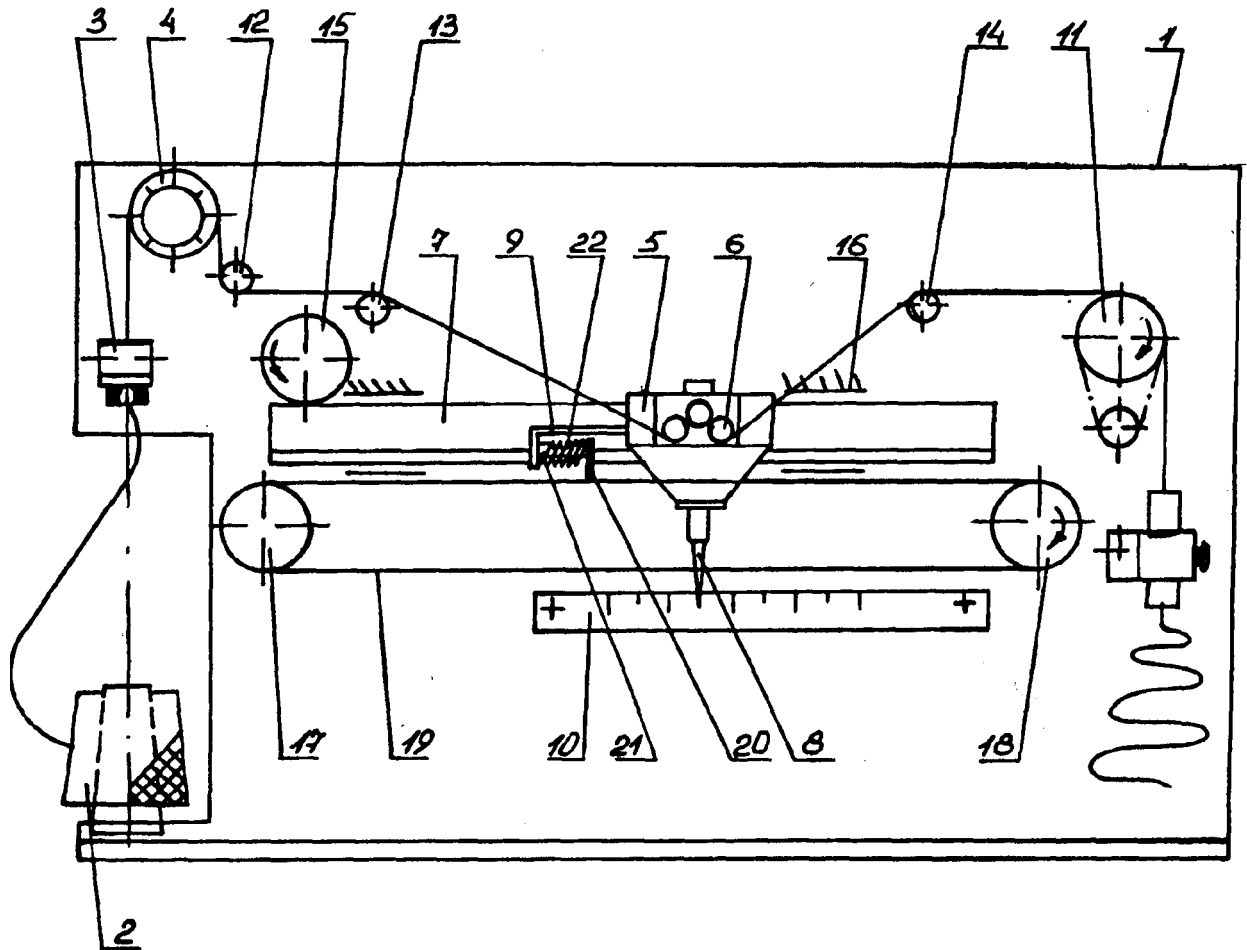


Рис.3.2. Прилад для визначення фрикційних властивостей ниток (А.с. СРСР №17305584)

Характеризувати умови взаємодії нитки з напрямними великої кривизни 6 можна, використовуючи відомий метод оберненого руху.

Прилад працює таким чином. Переміщенням каретки 5 встановлюють індикаторну стрілку 8 на нульове положення індикаторної лінійки 10. Обертаючи шків 18 проти годинникової стрілки, встановлюють пластину 20 з силовим контактом 21 з правого боку від робочої грані фігурного

кронштейна 9. Нитку з бобіни заправляють в ролик 3, магнітний натягувач нитки 4, ролики 12, 13, циліндричні штифти 6, ролик 14 і приводний пристрій II для переміщення нитки. Включаючи привід 11, переміщаємо нитку. При цьому каретка 5 починає рухатися, а кронштейн 9 деформує пружину 22 і замикає контакт 21 електричного ланцюга пристосування 15 для переміщення напрямної. У цей момент включається двигун, що приводить в обертання з постійною кутовою швидкістю шківів 18.

Лінійна швидкість руху нескінченної стрічки 19 підбирається такою, як у напрямній 7 і на порядок менше мінімальної швидкості переміщення каретки. В цьому випадку, із-за різниці швидкостей, каретка 5 переміщатиметься разом з напрямною 7 з постійною швидкістю, рівній лінійній швидкості нескінченної стрічки 19.

Різниця проекцій векторів натягу ведучої і веденої гілок нитки на горизонтальну вісь забезпечуватиме силове замикання пружини 22, жорсткість якої вибирається так, щоб вона могла змістити каретку 5 щодо нерухомої напрямної 7 і розімкнути контакт 21 тоді, коли проекції натяг гілок нитки на горизонталь стануть рівними.

Коли в результаті переміщення каретки 5 і зміни кутів нахилу нитки до і після каретки стануть рівними проекції натягу ведучої і веденої гілок нитки, то під дією пружини 22 відбудеться розмикання контакту 21, що приведе до зупинки пристосування для переміщення напрямної 15 і каретка 5 зупиниться разом з напрямною 7. По індикаторній лінійці 10 визначають величину коефіцієнта, що характеризує фрикційні властивості ниток.

Швидкість руху нитки в приладі пристосуванням 11 варіювалася в межах від 0,9 до 2,7 м/с. Магнітний натягувач нитки 4 створював натяг веденої гілки в межах від 7 до 11 сН.

Для експериментального визначення сумісного впливу радіусу кривизни, швидкості, кута обхвату на натяг ведучої гілки нитки нами була



розроблена установка, представлена на рис.3.3.

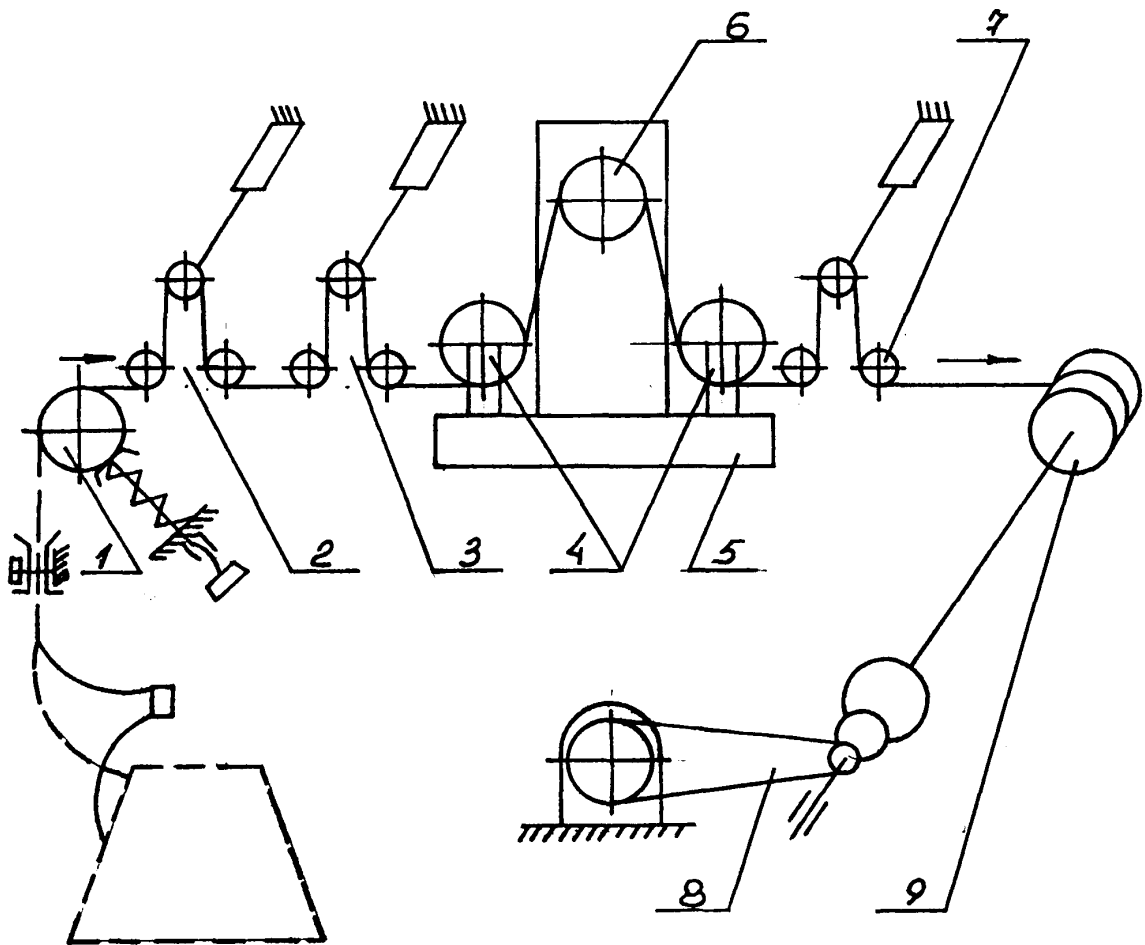


Рис.3.3. Прилад для визначення натягу ведучої гілки нитки

Установка включає третій вимірювальний вузол 3. Це було зроблено для того, щоб можна було одночасно з експериментальним дослідженням умов взаємодії нитки з напрямною 6, встановленою нерухомо в корпусі 5, проводити експеримент за визначенням умов роботи різних пристроїв для натягування нитки, які встановлювалися між 2 і 3 вимірювальними вузлами.

Крім того, для варіювання швидкості руху нитки був встановлений ступінчастий привід 8, який повідомляв необхідну швидкість обертання приймальному барабану 9.

Зміна кута обхвату ниткою що направляє б здійснювалося за допомогою двох рухомих роликів 4, встановлених в корпусі 5 з можливістю горизонтального переміщення. Нитка на вимірювальний вузол 2 подавалася з циліндричної бобіни 1 з певним попереднім натягом, яке створювалося шляхом пригальмовування бобіни І.

У приладі передбачалася подача нитки безпосередньо з конічної бобіни, для чого в його конструкцію були введені спрямовувачі нитки і шайбовий пристрій для натягування нитки. Натяг веденої гілки нитки перед напрямною б реєструвалося вимірювальним вузлом 3. Натяг ведучої гілки нитки - вимірювальним вузлом 7.

У приладі була передбачена можливість заміни напрямної б з метою визначення впливу радіусу кривизни нитки, що направляє на умови взаємодії, з останньою.

Даний прилад використовувався і для проведення серії експериментальних досліджень за визначенням впливу форми направляючої поверхні на натяг ведучої гілки нитки. З цією метою використовувалися стрижні відповідним чином оброблені, у яких форма поперечного перетину представляла параболу. Для експерименту був підготовлений комплект стрижнів різних геометричних розмірів.

Приведена установка дозволяла варіювати: швидкість руху нитки від 0,9 до 2,7 м/с; натяг веденої гілки нитки від 7 до 11 сН; кут обхвату напрямної від 1,57 до 3,14 радий; радіус кривизни направляючої поверхні від 0,2 до 8 мм.

Складовою частиною приладів (рис.3.1 і 3.3) була електрична тензометрична апаратура. Її вибір не був випадковим. Висока точність у вимірюванні величин, можливість реєструвати швидко протікаючі процеси, хороша наочність - ось далеко не повний перелік цих переваг.

При проведенні експериментальних досліджень нами використовувався дванадцяти каналний осцилограф К12-22, підсилювач

8АНЧ-7М.

При виборі гальванометрів осцилографа визначальними чинниками були: частотна характеристика процесу, що вивчається, і вихідний струм з відповідного каналу підсилювача на осцилограф.

Зразки запису осцилограм натяг ведучої гілки нитки приведені на рис.3.4, а, б. Для кожного варіанту з плану експерименту знімалися три повторні осцилограми. У таблиці 3.5 приводяться характеристики гальванометрів, використовуваних в осцилографі.

Аналіз даної таблиці в сукупності з даними про частоту досліджуваного процесу дозволив зробити вивід про те, що найбільш відповідними для експерименту є гальванометри I і II типу. Їх використання дозволяє уникнути резонансних явищ, що виникають при записі натяг провідної і веденої гілок нитки.

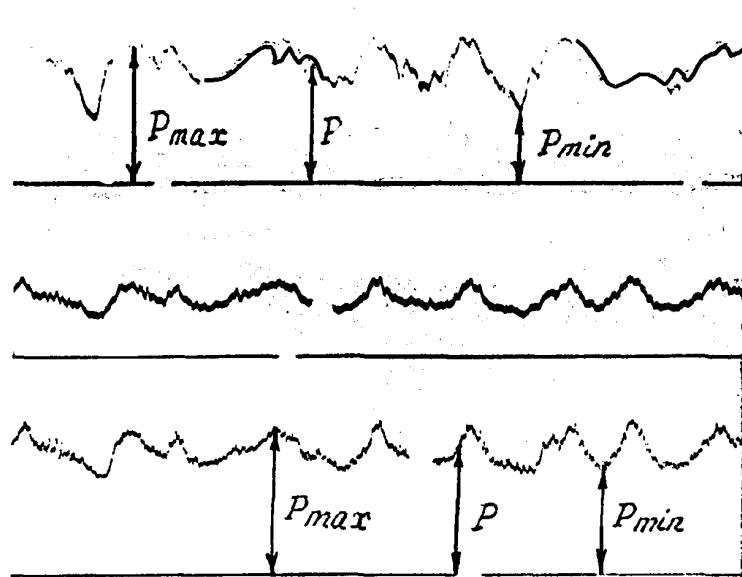
Таблиця 3.5. Характеристики гальванометрів

Характеристика гальванометрів	Типи гальванометрів				
	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IIIa</i>	<i>IV</i>
Чутливість, мм/мА, не менше	0,21	0,57	2,37	9,5	32,2
Електричний опір, Ом	16±3	36±7	8±1,5	17±4,5	22±3,5
Максимально можливе значення постійного струму, мА	30	30	15	3,5	2
Діапазон реєстрації змінних процесів, Гц	Від 0 до 500	Від 0 до 300	Від 0 до 150	Від 0 до 100	Від 0 до 30

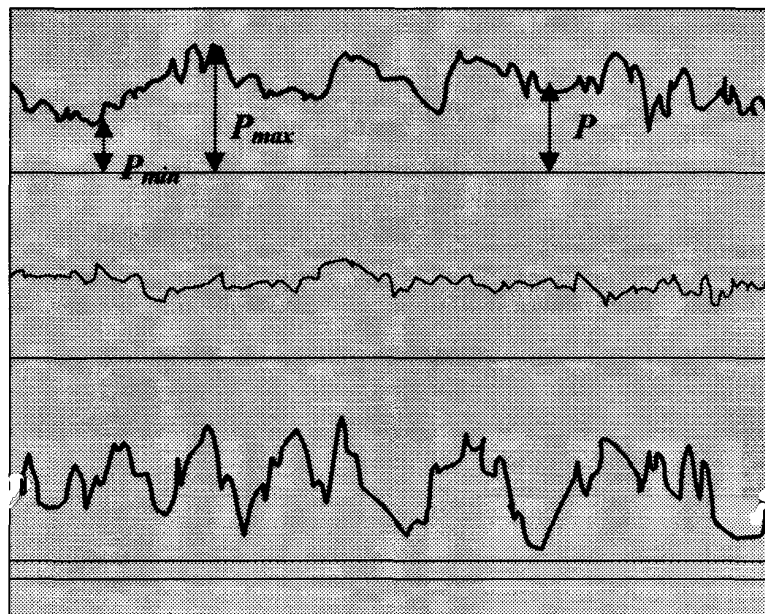
Необхідно відзначити, що осцилограф К12-22, 8-ми каналний підсилювач 8АНЧ-7М і відповідні блоки живлення до них проходили спеціальну тестову перевірку на предмет своєї функціональної придатності і надійності в роботі.

При визначенні залежності питомого розривного навантаження і відносного розривного подовження ниток від умов взаємодії ниток з

напрямною нами використовувалися універсальна розривна машина РМ-30-1 Івановського заводу "Точприбор". Максимальне розривне навантаження у цієї машини - 300 Н. Міняючи величину важелів, можна створювати три діапазони розривного навантаження : 1-й - від 10 до 50 Н; 2-ою - від 20 до 100 Н; 2-ий - від 60 до 300 Н. Діапазон виміру деформації ниток - від 0 до 300 мм або від 0 до 60%.



а)



б)

Рис.3.4. Зразки осцилограм

Швидкість руху нижнього затиску могла змінюватися в межах від 80 до 800 мм/мін. Попередній натяг нитки при випробуваннях складав  $0,10,01\text{H}\pm$

### **3.3. Сумісний вплив радіусу кривизни напрямної, натягу веденої гілки, кута обхвату і швидкості руху нитки на натяг ведучій гілки**

Реалізуюючи план експериментальних досліджень (табл.3.2) за визначенням впливу радіусу кривизни направляючої поверхні, натяг веденої гілки нитки, кута обхвату і швидкості руху нитки на натяг ведучої гілки, для різних ниток (табл.3.1), нами були отримані цілий ряд експериментальних даних.

Отримані експериментальні дані оброблялися методами математичної статистики в наступній послідовності: визначалося середньоарифметичне значення величини натягу ведучої гілки  $y_{ij}$ , знаходили відхилення від середнього значення для кожного результату ( $y_{ij} - \bar{y}_{ij}$ ); визначали величину дисперсії  $S^2\{y_{ij}\}$ ; стандартне відхилення окремого вимірювання і стандартного відхилення середнього результату  $S\{y_{ij}\}$ ; перевірку надійності отриманого результату проводили по критерію Стюдента  $t_{\alpha}$  для проведеного числа дослідів  $n=3$  при вибраній довірчій вірогідності  $\alpha=0,95$ ; визначали помилку отриманого середнього результату  $\varepsilon\{y_{ij}\}$  і визначали інтервал, в якому з довірчою вірогідністю  $\alpha$  знаходиться середній результат; обчислювали відносну помилку.

Вище ми зупинялися на тих міркуваннях, які привели до вибору ортогонального плану. Останні вимоги застосування того або іншого плану, що пред'являються до оцінки ефективності, привели до того, що основними критеріями почали вважати: максимальну величину дисперсії передбачених значень критерію оптимізації в області експерименту; об'єм еліпсоїда розсіяння оцінок параметрів і ін.

Наприклад, для чотирьох чинників, при побудові моделі процесу,

заслужує уваги варіант В4 (виконується 24 опити – в ортогональному 25). При ротатабельному плануванні потрібно 31 опит, Кифера – 72 опити, Коно – 49 опитів. Враховуючи ці дані, можна стверджувати, що з погляду скорочення часу на проведення експерименту, враховуючи його великі об'єми (15 різних ліній), ортогональне планування є найбільш прийнятним.

Перейдемо до аналізу отриманих залежностей, які представлені нижче в іменованих значеннях. Тут необхідно тільки відзначити, що радіус кривизни направляючої  $R$  необхідно підставляти в мм, натяг веденої гілки  $P_0$  - в сН, кут обхвату  $\varphi$  - в радіанах, швидкість руху нитки  $v$  - в м/с.

Таким чином, залежності натягу ведучої гілки  $P$  ниток від перерахованих вище чинників, мають вигляд:

капронова монопітка 52Т – **I**

$$P = 0,82R + 1,36P_0 + 1,66\varphi - 9,00; \quad (3.1)$$

капронова монопітка 36т – **II**

$$P = 0,61R + 1,41P_0 + 1,86\varphi - 8,05; \quad (3.2)$$

капронова комплексна нитка 280,5Т - **III**

$$P = 57,80R^2 - 35,19R + 4,89P_0 + 2,74\varphi - 2,08v - 4,59RP_0 + 0,45P_0v - 11,05; \quad (3.3)$$

капронова комплексна нитка 174Т – **IV**

$$P = 4,16R^2 - 5,54R + 2,95P_0 + 3,34\varphi + 1,77v - 0,79RP_0 - 12,53; \quad (3.4)$$

лавсанова комплексна нитка 110,8Т - **V**

$$P = 0,86R^2 - 4,16R + 1,95P_0 + 3,20\varphi + 1,53v - 8,08; \quad (3.5)$$

лавсанова комплексна нитка 58Т – **VI**

$$P = 0,75R^2 - 3,26R + 1,35P_0 + 3,09\varphi + 1,38v - 3,21; \quad (3.6)$$

віскозна пряжа 93,8Т – **VII**

$$P = 1,93R^2 + 2,89\varphi + 1,34v - 0,87R - 9,84; \quad (3.7)$$

поліпропіленова комплексна нитка 93,5Т - **VIII**

$$P = 0,96R + 2,38P_0 + 3,37\varphi + 1,54v - 0,21RP_0 - 15,41; \quad (3.8)$$

бавовняна пряжа 100Т – **IX**

$$P = 3,46R - 1,02R^2 + 2,09P_0 + 3,24\varphi + 1,40v - 18,35; \quad (3.9)$$

вовняна пряжа 89,7Т – **X**

$$P = 1,41R^2 - 6,48R + 1,79P_0 + 2,49\varphi + 1,29\nu - 2,55; \quad (3.10)$$

бавовняна пряжа 27,6Т – **XI**

$$P = 1,90P_0 - 0,32R + 3,26\varphi + 1,38\nu - 11,96; \quad (3.11)$$

вовняна пряжа 29,9Т – **XII**

$$P = 1,33R^2 - 5,46R + 1,65P_0 + 2,31\varphi + 1,10\nu - 2,29; \quad (3.12)$$

віскозна штапельна пряжа 28,8Т – **XIII**

$$P = 0,59R^2 - 2,51R + 1,77P_0 + 2,71\varphi + 1,17\nu - 7,19; \quad (3.13)$$

віскозна комплексна нитка 16,7Т - **XIV**

$$P = 0,63R^2 - 2,11R + 1,66P_0 + 2,57\varphi + 1,10\nu - 6,39; \quad (3.14)$$

капронова комплексна нитка 28Т - **XV**

$$P = 0,83R^2 - 3,21R + 1,77P_0 + 3,06\varphi + 1,31\nu - 6,73. \quad (3.15)$$

У роботі нами для аналізу геометричної форми поверхні відгуку використовувалися інваріанти поверхонь другого порядку. Їх використання дозволяє досягти поставленої мети без приведення рівнянь до канонічного вигляду.

Суть методу полягає в тому, що для безлічі точок тривимірного простору, координати яких в декартовій системі задовольняють рівнянню алгебри 2-го ступеня

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}xz + 2a_{23}yz + 2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + a_{44} = 0, \quad (3.16)$$

визначають основні інваріанти **S**, **T**, **τ**, **Δ** і на пів інваріанти (семи інваріанти) **Δ'**, **Δ''**. Потім по таблиці 3.6 визначають, який геометричний образ має поверхню відгуку для тієї або іншої регресійної залежності (3.1..3.15).

Основні інваріанти і на пів інваріанти визначаються як визначники і їх суми відповідних матриць коефіцієнтів многочлена у вигляді рівняння алгебри. Формули для розрахунку приведені у вигляді системи (3.17). Перетворимо регресійні залежності (3.1).(3.15) до вигляду (3.16), для чого підставимо в останні значення кута обхвату і швидкості руху нитки, які

відповідатимуть своїм мінімальним значенням (див. план проведення експерименту табл. 3.2).

$$\begin{aligned}
 S &= a_{11} + a_{22} + a_{33}; \\
 \delta &= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{vmatrix}; \\
 T &= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{13} & a_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{23} & a_{33} \end{vmatrix}; \\
 \Delta &= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} & a_{34} \\ a_{14} & a_{24} & a_{34} & a_{44} \end{vmatrix}; \\
 \Delta' &= \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{23} & a_{33} & a_{34} \\ a_{24} & a_{34} & a_{44} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & a_{13} & a_{14} \\ a_{13} & a_{33} & a_{34} \\ a_{14} & a_{34} & a_{44} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{14} \\ a_{12} & a_{22} & a_{24} \\ a_{14} & a_{24} & a_{44} \end{vmatrix}; \\
 \Delta'' &= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{14} \\ a_{14} & a_{44} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{22} & a_{24} \\ a_{24} & a_{44} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{33} & a_{34} \\ a_{34} & a_{44} \end{vmatrix}.
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

При підстановці  $\varphi=2,44$  радіан швидкість  $v=0,9$  м/с. Такі значення даних величин вибрані нами виходячи з умови найменшої величини натягу ведучої гілки нитки при варіюванні цих чинників.

Виконуючи перетворення залежностей (3.1)-(3.15) до (3.16), вважали, що  $x=R$ ,  $y=P0$ ,  $z=P$ . Відповідним чином були розподілені і коефіцієнти при конкретних величинах.

Результати розрахунку по формулах (3.17) інваріантів і на пів інваріантів також приведені в таблиці 3.7.

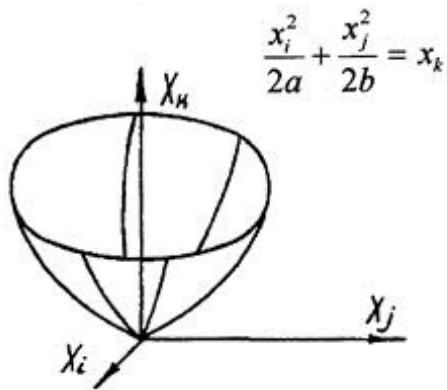
Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що всі геометричні образи поверхонь відгуку зводяться до еліптичного параболоїда, параболічного циліндра і пари паралельних площин (див. рис. 3.5).

З цього можна зробити висновок - при перерізі поверхонь відгуку площинами у нас виходитимуть параболи і прямі лінії. Ця обставина

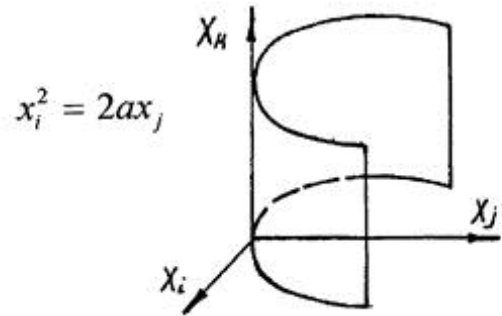


враховувалася нижче при дослідженні впливу радіуса кривизни напрямної, швидкості руху нитки, натягу веденої гілки на натяг ведучої гілки.

Варіанти III, IV, VII



Варіанти V-VII, IX, X, XII-XV



Варіанти I, II, VII, XI

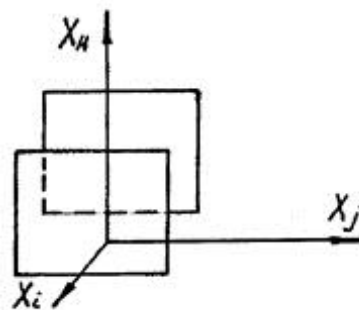


Рис.3.5. Геометричні образи поверхні відгуку

Такий диференційований підхід до вивчення регресійних залежностей (3.1) -(3.15) необхідний, оскільки велике число чинників утрудняє процес аналізу.

Визначені вище геометричні образи (окрім пари паралельних площин) дозволяють судити про наявність екстремальних точок для ниток **III-VI**, **VIII-X**, **XII-XV**. Завдання по їх пошуку буде вирішено нижче.

### 3.4. Залежність зміни натягу від радіуса кривизни направляючої поверхні

Велике значення для практики має вплив кривизни направляючої

поверхні на величину натягу ведучої гілки нитки. Дослідження даного питання дозволить оптимізувати геометричні розміри робочих органів і спрямовувачів нитки технологічних машин легкої і текстильної галузі.

Таблиця 3.6. Форма поверхні відгуку залежно від значення інваріантів і на пів інваріантів

		Невироджені поверхні		Вироджені поверхні
Центральні поверхні, $\delta \neq 0$	$\Delta S > 0$ $T > 0$	Уявний еліпсоїд	Еліпсоїд	Уявний конус
	$\Delta S \leq 0$ $T \leq 0$	Однопорожнинний і гіперболоїд	Двуполостний гіперболоїд	Дійсний конус
Нецентральні поверхні, $\delta = 0$		Гіперболічний параболоїд	Еліптичний параболоїд	Циліндрові поверхні, що розпадаються
Циліндрові поверхні, що розпадаються $\Delta = 0, \delta = 0$				
$T > 0$	Циліндрові поверхні $\Delta' \neq 0$		Поверхні, що розпадаються $\Delta' \neq 0$	
	Еліптичний циліндр		Пара уявних пересічних площин	
	Уявний $\Delta'S > 0$	Дійсний $\Delta'S < 0$		
$T < 0$	Гіперболічний циліндр		Пара пересічних площин	
$T = 0$	Параболічний циліндр		Пара уявних паралельних площин $\Delta'' > 0$	Пара співпадаючих площин $\Delta'' = 0$
			Пара паралельних площин $\Delta'' < 0$	

На рис. 3.6 представлені залежності зміни натягу ведучої гілки від радіусу кривизни напрямної.

Дані криві були побудовані на основі обробки регресійних залежностей (3.1)...(3.15), при наступних постійних величинах  $v = 1,8$  м/с,  $\varphi = 2,79$  радіан,  $P_0 = 9$  сН - для варіантів V-XV. Для варіанту I  $P_0 = 10$  сН, а значення радіусу кривизни для варіантів I, II змінювалося в межах від 3 до 5 мм.

Результати розрахунку по рівняннях (3.1)...(3.15) зведені в таблицю 3.8.

При виборі постійних значенні варійованих чинників керувалися тим, щоб вони відповідали нульовій точці плану експериментальних досліджень (див. табл. 3.2).

Проаналізуємо отримані залежності (див. рис. 3.6) на підставі даних таблиці 3.8 і регресійних залежностей (3.1)...(3.15).

Таблиця 3.7.Результати розрахунку інваріантів і на пів інваріантів

Нитка	Значення коефіцієнтів в рівнянні (4.16)	Інваріанти і на пів інвар.	Геометричний образ
<b>I</b>	$a_{11}=0, a_{22}=0, a_{33}=0, a_{12}=0, a_{13}=0, a_{14}=0,41, a_{23}=0, a_{24}=0,68, a_{34}=-0,5, a_{44}=-4,95$	$S=T=\delta=\Delta=\Delta'=0$ $\Delta''=-0,88$	Пара паралельних площин
<b>II</b>	$a_{11}=a_{22}=a_{33}=a_{12}=a_{13}=a_{23}=0, a_{14}=0,31, a_{24}=0,71, a_{34}=-0,5, a_{44}=-3,51$	$S=T=\delta=\Delta=\Delta'=0$ $\Delta''=-0,85$	Пара паралельних площин
<b>III</b>	$a_{11}=57,8, a_{22}=a_{33}=a_{13}=a_{23}=0, a_{12}=-2,29, a_{14}=-1,76, a_{24}=2,65, a_{34}=-0,5, a_{44}=-6,24$	$S=57,8, T=-5,24$ $\delta=0, \Delta=-1,31$	Еліптичний параболоїд
<b>IV</b>	$a_{11}=4,16, a_{22}=a_{33}=a_{13}=a_{23}=0, a_{12}=-0,39, a_{14}=-2,77, a_{24}=1,48, a_{34}=-0,5, a_{44}=-2,79$	$S=4,16, T=-5,24$ $\delta=0, \Delta=-1,31$	Еліптичний параболоїд
<b>V</b>	$a_{11}=0,86, a_{22}=a_{33}=a_{12}=a_{13}=a_{23}=0, a_{14}=-2,08, a_{24}=0,99, a_{34}=-0,5, a_{44}=1,11$	$S=0,86, T=\delta=\Delta=0$ $\Delta'=-1,06, \Delta''=-4,6$	Параболічний циліндр
<b>VI</b>	$a_{11}=0,75, a_{22}=a_{33}=a_{12}=a_{13}=a_{23}=0, a_{14}=-1,63, a_{24}=0,68, a_{34}=-0,5, a_{44}=5,57$	$S=0,75, T=\delta=S=0$ $\Delta'=-0,53, \Delta''=0,81$	Параболічний циліндр
<b>VI I</b>	$a_{11}=a_{22}=a_{33}=a_{12}=a_{13}=a_{23}=0, a_{14}=-0,44, a_{24}=0,97, a_{34}=-0,5, a_{44}=-1,58$	$S=T=\delta=\Delta=\Delta'=0$ $\Delta''=-1,38$	Пара паралельних площин
<b>VI II</b>	$a_{11}=a_{22}=a_{33}=a_{13}=a_{23}=0, a_{12}=-0,11, a_{14}=0,48, a_{24}=1,19, a_{34}=-0,5, a_{44}=-5,8$	$S=\delta=0, T=-0,012$ $\Delta=-0,003$	Еліптичний параболоїд
<b>IX</b>	$a_{11}=-1,02, a_{22}=a_{33}=a_{12}=a_{13}=a_{23}=0, a_{14}=1,73, a_{24}=1,05, a_{34}=-0,5, a_{44}=-9,21$	$S=-1,02, T=\delta=\Delta=0$ $\Delta'=1,38, \Delta''=5,05$	Параболічний циліндр
<b>X</b>	$a_{11}=1,41, a_{22}=a_{33}=a_{24}=a_{13}=a_{23}=0, a_{14}=-3,24, a_{24}=0,89, a_{34}=-0,5, a_{44}=4,69$	$S=1,41, T=\delta=\Delta=0$ $\Delta'=-1,47, \Delta''=-4,93$	Параболічний циліндр
<b>XI</b>	$a_{11}=a_{22}=a_{33}=a_{12}=a_{13}=a_{23}=0, a_{14}=0,95, a_{24}=1,19, a_{34}=-0,5, a_{44}=-2,76$	$S=T=\delta=\Delta=\Delta'=0$ $\Delta''=-1,38$	Пара паралельних площин
<b>XI I</b>	$a_{11}=1,33, a_{22}=a_{33}=a_{24}=a_{13}=a_{23}=0, a_{14}=-3,24, a_{24}=0,89, a_{34}=-0,5, a_{44}=4,69$	$S=1,33, T=\delta=\Delta=0$ $\Delta'=-1,25, \Delta''=-2,62$	Параболічний циліндр
<b>XI II</b>	$a_{11}=0,59, a_{22}=a_{33}=a_{12}=a_{13}=a_{23}=0, a_{14}=-1,26, a_{24}=0,89, a_{34}=-0,5, a_{44}=0,48$	$S=0,59, T=\delta=\Delta=0$ $\Delta'=-0,61, \Delta''=-2,35$	Параболічний циліндр
<b>XI V</b>	$a_{11}=0,63, a_{22}=a_{33}=a_{12}=a_{13}=a_{23}=0, a_{14}=-1,06, a_{24}=0,83, a_{34}=-0,5, a_{44}=0,87$	$S=0,63, T=\delta=\Delta=0$ $\Delta'=-0,59, \Delta''=-1,51$	Параболічний циліндр
<b>X</b>	$a_{11}=0,83, a_{22}=a_{33}=a_{12}=a_{13}=a_{23}=0$	$S=0,83, T=\delta=\Delta=0$	Параболічний

V	$a_{14}=-1,61, a_{24}=0,89, a_{34}=-0,5, a_{44}=1,92$	$\Delta'=-0,87, \Delta''=-2,04$	циліндр
---	---	---------------------------------	---------

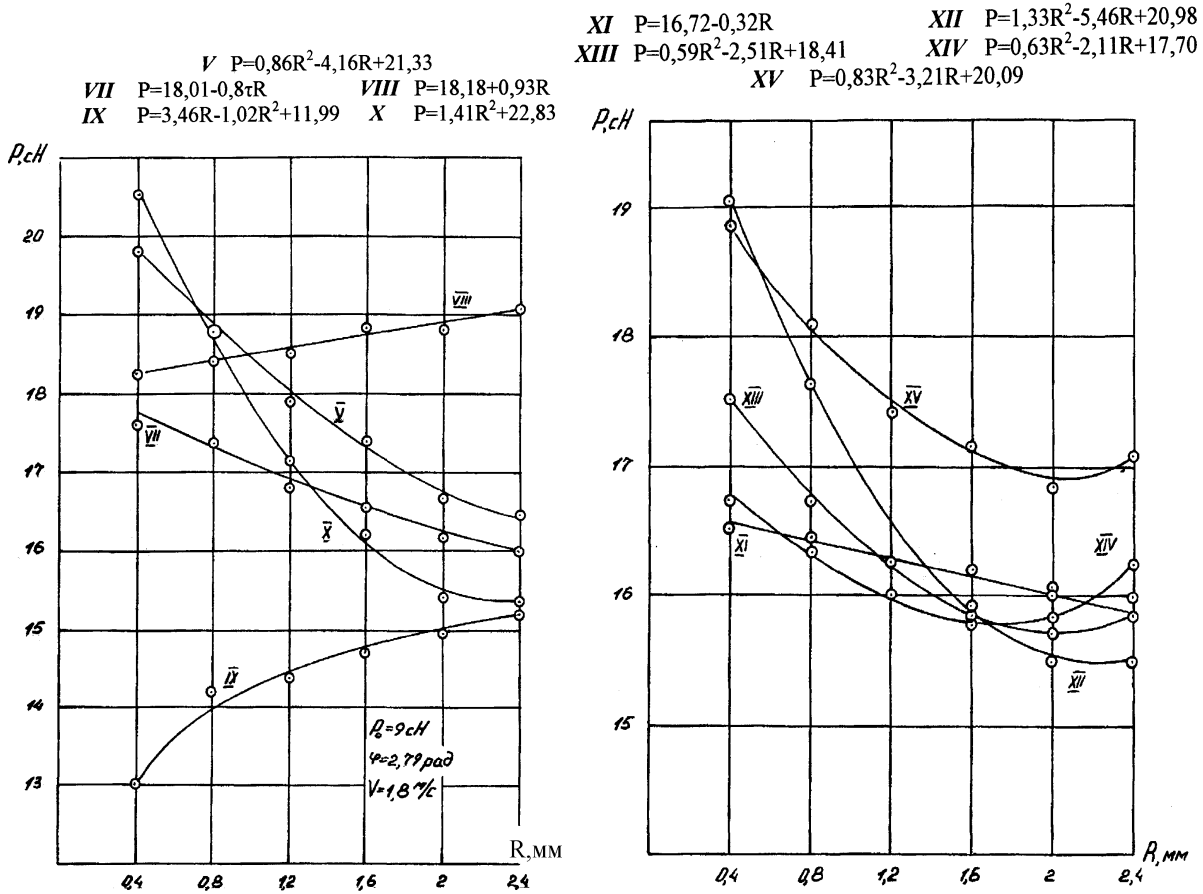


Рис.3.6.Залежність натягу ведучої гілки нитки від кривизни напрямної

Таблиця 3.8.Залежність натягу  $P$  від радіусу кривизни напрямної

Нитка	Постійні чинники	Натяг ведучої гілки $P$ , сН					
		Радіус кривизни напрямляючої $R$ , мм					
		0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4
V	$P_0 = 9 \text{ сН}, \varphi = 2,79$ рад., $v = 1,8 \text{ м/с}$	19,8	18,6	17,6	16,9	16,5	16,3
VII	$P_0 = 9 \text{ сН}, \varphi = 2,79$ рад., $v = 1,8 \text{ м/с}$	17,7	17,3	16,9	16,6	16,3	15,9
VIII	$P_0 = 9 \text{ сН}, \varphi = 2,79$ рад., $v = 1,8 \text{ м/с}$	18,3	18,5	18,6	18,8	18,9	19,1
IX	$P_0 = 9 \text{ сН}, \varphi = 2,79$	13,2	14,1	14,7	14,9	15,0	15,1

	рад., $v = 1,8$ м/с						
<b>X</b>	$P_0 = 9$ сН, $\varphi = 2,79$ рад., $v = 1,8$ м/с	20,5	18,6	17,1	16,1	15,5	15,4
<b>XI</b>	$P_0 = 9$ сН, $\varphi = 2,79$ рад., $v = 1,8$ м/с	16,6	16,5	16,3	16,2	16,1	15,9
<b>XII</b>	$P_0 = 9$ сН, $\varphi = 2,79$ рад., $v = 1,8$ м/с	19,0	17,5	16,3	15,7	15,4	15,5
<b>XIII</b>	$P_0 = 9$ сН, $\varphi = 2,79$ рад., $v = 1,8$ м/с	17,5	16,8	16,3	16,0	15,9	16,0
<b>XIV</b>	$P_0 = 9$ сН, $\varphi = 2,79$ рад., $v = 1,8$ м/с	16,9	16,4	16,1	15,9	16,0	16,3
<b>XV</b>	$P_0 = 9$ сН, $\varphi = 2,79$ рад., $v = 1,8$ м/с	18,9	18,1	17,4	17,1	16,9	17,1
<b>Нитка</b>	<b>Постійні чинники</b>	<b>R=3</b>	<b>R=3,5</b>	<b>R=4</b>	<b>R=4,5</b>	<b>R=5</b>	
<b>I</b>	$P_0 = 10$ сН, $\varphi = 2,79$ рад., $v = 1,8$ м/с	10,7	11,1	11,5	11,9	12,3	
<b>II</b>	$P_0 = 9$ сН, $\varphi = 2,79$ рад., $v = 1,8$ м/с	13,1	13,4	13,7	13,9	14,3	

Із збільшенням радіусу кривизни направляючої поверхні значення натягу ведучої гілки: для поліпропіленової нитки (VIII) зростає від 18,3 сН до 19,1 сН; для бавовняної (IX) зростає з 13,2 сН до 15,1 сН; для лавсанової нитки (V) падає з 19,8 сН до 16,3 сН; для віскозної (VII) пряжі падіння натяг складає 1,8 сН, а для вовняної пряжі (X) це зменшення складає 5,1 сН (24,9%).

Перераховані п'ять ниток близькі по своєму розрахунковому діаметру (близько 0,4 мм). Отже, на таку зміну натягу впливають : структура самої нитки, хімічна природа матеріалу окремих філаментів, їх фізичний стан.

Як наголошувалося нами раніше, збільшення скручування ниток веде до підвищення жорсткості на вигин ниток і, як наслідок, за інших рівних умов, зменшенню реального кута обхвату ниткою напрямної. В даному

випадку (VIII, IX) поліпропіленова і бавовняні нитки поводяться як мононитки. Не останню роль грають і фізико-механічні властивості окремих філаментів. З таблиці 3.1 видно, що коефіцієнт жорсткості на вигин бавовняної нитки IX рівний 2,5 сН·мм<sup>2</sup>, а поліпропіленовій VIII -1,1 сН·мм<sup>2</sup>. Для порівняння, коефіцієнт вигинистої жорсткості шерстяної пряжі того ж діаметру рівний 0,4 сН·мм<sup>2</sup>, а лавсановою - 0,8 сН·мм<sup>2</sup>, тобто в 6 і в 3 рази відповідно менше, ніж для бавовняної нитки.

Отже, можна зробити висновок про те, що при взаємодії хімічних (V, VII, VIII) і натуральних ниток (IX, X) з направляючою поверхнею великої кривизни, нитки, що володіють підвищеною жорсткістю на вигин, поводяться як моноволокна. Їх натяг підвищується із зростанням радіусу кривизни (див. розділ 2). Нитки і пряжа середнього і низького скручування, що володіють низькою жорсткістю на вигин, більше схильні до зминання в зоні контакту. Їх натяг спочатку зменшується до деякого рівня (це пояснюється зменшенням питомого тиску в зоні контакту за рахунок збільшення площі контакту і, як наслідок, зниженням ефекту зростання натягу за рахунок зминання), а потім починає зростати.

В зв'язку з цим представляє інтерес зміна натягу ведучій гілці від радіусу кривизни для ниток (XI – XV) (див. рис.3.6). Аналіз регресійних залежностей (3.12)...(3.15) дозволив встановити (див. табл. 3.8), що для вовняної пряжі (XII) мінімальне натяг буде при радіусі кривизни напрямної 2,05 мм, для віскозної штапельної пряжі - 2,13 мм, для віскозної комплексної нитки - 1,68 мм і для капронової комплексної нитки - 1,93 мм. Цілком очевидно, що аналогічні результати для варіантів V-X можна було отримати при розширенні меж інтервалу зміни радіусу кривизни напрямної. Це підтверджується тим, що для ниток з однієї і тієї ж сировини, наприклад, варіанти (IV і XV), (VII і XIII), (IX і XI), (X і XII), більший натяг (див. табл. 3.8) мають нитки, у яких розрахунковий діаметр більший. Шляхом пропорційного перерахунку можна переконатися в

справедливості сказаного для кожної з приведених пар.

Таким чином, у вибраному інтервалі зміни радіусу кривизни направляючої поверхні у більшості ниток *V*, *VII*, *X*, *XI...XV* спостерігається зменшення натягу, причому натуральні нитки, за інших рівних умов, поводяться прийнятніше з погляду їх переробки.

Великий інтерес представляють дані експерименту за визначенням натяг ведучої гілки монопнитки, що взаємодіє з направляючою поверхнею. Використовуючи регресійні залежності (3.1),(3.2) і дані таблиці 3.8, були побудовані прямі на рис. 3.7. Для порівняння з прямими I і II була побудована пряма для капронової комплексної нитки (*XV*), що має однаковий розрахунковий діаметр з капроною монопниткою (II).

Аналіз залежностей дозволив встановити, що натяг капронової монопнитки (I) зростає з 10,7 сН до 12,3 сН, а монопнитки (II) - з 13,1 сН до 14,3. Як наголошувалося вище, в розділі 2, асимптотою для даних кривих буде залежність, що відображає собою основну формулу Ейлера для ниток. На рис. 3.7. це лінія *W*. При подальшому збільшенні радіусу кривизни дані чотири лінії *I*, *II*, *XV* і *W* повинні нескінченно близько розташуватися.

Такий характер поведінки монопниток пояснюється відсутністю зминання в зоні контакту і їх великою жорсткістю на вигин. Слід сказати, що вибір такого інтервалу варіювання радіусу кривизни визначався необхідністю отримати достатню дугу обхвату ниткою напрямної.

На закінчення необхідно відзначити, що порівняння розрахункових значень (див. розділ 2) з приведеними експериментальними даними в поточному розділі дозволило встановити величину помилки - 2-8,5%.

### **3.5. Вплив натягу веденої гілки, швидкості руху нитки на зміну її натягу після напрямної**

Розробка і створення нового вигляду технологічного устаткування будується на збільшенні швидкості переробки ниток, підвищення продуктивності за рахунок зменшення простоїв, поліпшення якості

продукції, що випускається. В зв'язку з цим експериментальні дослідження за визначенням впливу натягу веденої гілки нитки, швидкістю її руху на натяг ведучої гілки, дозволяє отримати інформацію, необхідну для конструкторів і технологів, намітити шляхи мінімізації натягу ниток при їх переробці, вибрати швидкісний оптимальний режим роботи устаткування.

$$P_I = 0,82R + 9,23; \quad P_{II} = 0,61R + 11,24$$

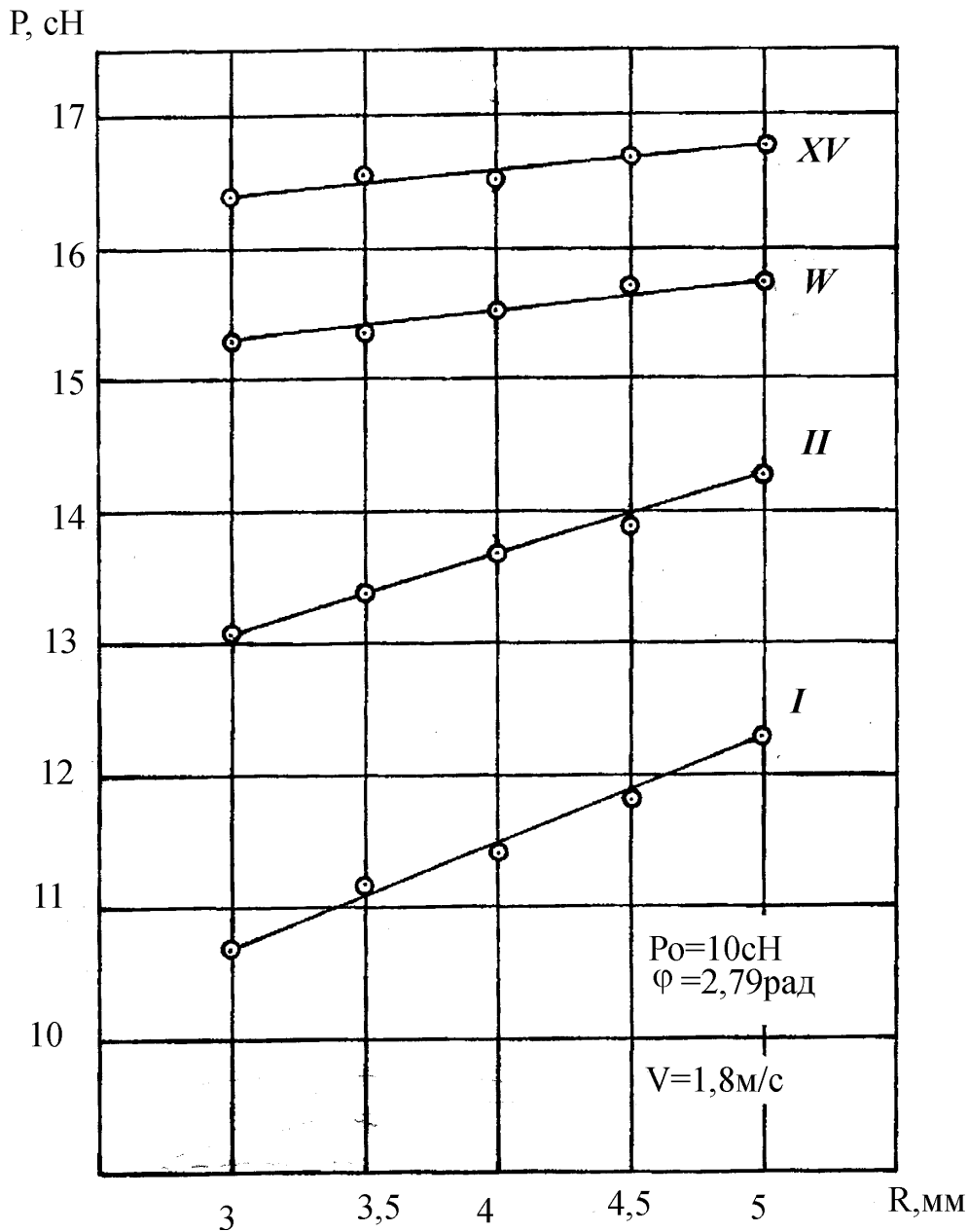


Рис.3.7. Залежність натягу ведучої гілки монониток від радіусу кривизни напрямної



Відповідно до плану експериментальних досліджень (таблиця 3.2) були проведені відповідні серії дослідів. Результати використовувалися для побудови регресійних залежностей (3.1)...(3.15). Для аналізу впливу натягу  $P_0$  і швидкості  $v$  на умови взаємодії ниток з напрямними отримані залежності відповідним чином спрощувалися. Для цього ряд чинників зберігали своє значення постійним впродовж всієї серії. При дослідженні впливу натягу  $P_0$  на натяг ведучої гілки кут обхвату направляючої  $\varphi$ , швидкість  $v$ , радіус кривизни  $R$  знаходилися на рівні «нульової точки» плану експерименту. При дослідженні впливу швидкості  $v$  на величину натяг окрім перерахованих чинників (виключаючи  $v$ ) додавався натяг  $P_0$ .

Проведення подібних експериментальних досліджень було необхідне ще і для того, щоб перевірити правильність і коректність зроблених допущень при виведенні теоретичних залежностей в розділі 2. Таке порівняння експериментальних і теоретичних залежностей дозволить зробити висновок про придатність останніх не тільки для якісної, але і для кількісної оцінки процесів, що вивчаються.

Результати експерименту представлені в таблиці 3.9. Для кожної з п'ятнадцяти ниток (**I-XV**) натяг  $P_0$  змінювалося від 7,0 сН до 11,0 сН з кроком 1 сН (виняток становили мононитки **I** і **II**, для яких нижня межа склала 9 сН, що пояснювалося необхідністю створення відповідного кута обхвату напрямної). Швидкість  $v$  руху ниток змінювалася від 1 м/с до 2,5 м/с з кроком 0,5 м/с.

Результати з таблиці 3.9 використовувалися при побудові графічних залежностей 3.8, які були апроксимуючими лініями сукупності експериментальних точок. Рівняння апроксимуючих ліній приведені на відповідних рисунках.

На рис. 3.8,а показане як змінюється натяг ведучої гілки  $P$  від натягу веденої  $P_0$ .

Як видно, для 5 ниток (приблизно рівного розрахункового діаметру

рівного 0,4 мм) найбільшу зміну натяг має поліпропіленова комплексна нитка (**VIII**) - від 14,1 сН до 23,6 сН, а найменше - бавовняна (**IX**) - від 10,8 сН до 19,1 сН. Лавсанова (**V**) і віскозна (**VII**) нитки мають близьку по характеру зміну натягу від 12,8 (12,7) сН

Таблиця 3.9. Результати впливу на натяг  $P$  величини  $P_0$  і швидкості руху нитки

Нитка	Натяг ведучої гілки $P$ , сН									
	Значення незмінних чинників: $\varphi=2,79$ рад.; $v=1,8$ м/с; $R$ – відповідні нульовій точці в плані					Значення незмінних чинників: $\varphi=2,79$ рад.; $P_0$ ; $R$ – відповідні нульовій точці в плані				
	Натяг веденої гілки $P_0$ , сН					Швидкість руху нитки $v$ , м/с				
	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	1,0	1,5	2,0	2,5	
<b>I</b>	-	-	10,2	11,5	12,9	11,5	11,5	11,6	11,5	
<b>II</b>	-	-	12,3	13,7	15,1	13,7	13,8	13,7	13,8	
<b>III</b>	13,2	16,1	19,1	22,0	24,9	17,5	18,5	19,5	20,4	
<b>IV</b>	13,7	15,9	18,0	20,2	22,4	16,6	17,5	18,4	19,3	
<b>V</b>	12,8	14,8	16,8	18,7	20,7	15,5	16,3	17,1	17,8	
<b>VI</b>	13,9	15,3	16,6	18,0	19,4	15,6	16,3	16,9	17,6	
<b>VII</b>	12,7	14,6	16,6	18,5	20,4	15,5	16,1	16,8	17,5	
<b>VIII</b>	14,1	16,4	18,8	21,2	23,6	17,6	18,4	19,1	19,9	
<b>IX</b>	10,8	12,8	14,9	17,0	19,1	13,8	14,5	15,2	15,9	
<b>X</b>	12,3	14,1	15,9	17,7	19,5	14,9	15,5	16,1	16,8	
<b>XI</b>	12,4	14,3	16,2	18,1	19,9	15,1	15,8	16,5	17,1	
<b>XII</b>	12,3	13,9	15,6	17,2	18,8	14,7	15,2	15,8	16,3	
<b>XIII</b>	12,4	14,2	15,9	17,17	19,5	15,0	15,6	16,2	16,8	
<b>XIV</b>	12,6	14,3	15,9	17,6	19,3	15,1	15,6	16,2	16,7	
<b>XV</b>	13,5	15,3	17,0	18,8	20,6	15,9	16,6	17,3	17,9	

до 20,7 (20,4) сН.

Аналіз отриманих даних дозволяє зробити висновок про те, що фізико-механічні властивості і структура ниток (див. табл. 3.1) визначають умови їх взаємодії з напрямною. Нитки низького скручування (**VIII**, **V**,

*VII*), з меншим коефіцієнтом тертя між окремими філаментами і більшою їх розтяжністю при взаємодії з напрямною більше зминаються в зоні контакту, при збільшенні натягу  $P_0$ , чим натуральні нитки (*IX*, *X*).

На рис. 3.8,а представлені графічні залежності для ниток *XI-XV*. І тут найбільша зміна натягу спостерігається у синтетичної нитки (капронова комплексна нитка *XV*) - від 13,5 сН до 20,6 сН. Найменша зміна натягу буде у натуральних ниток. Так для вовняної пряжі (*XII*) зміна складе від 12,3 сН до 18,8 сН. Практично однаковий характер зміни натягу мають віскозна штапельна пряжа (*XIII*) і віскозна комплексна нитка (*XIV*). Зміна тут складає від 12,4 (12,6) сН до 19,5 (19,3) сН. Цілком очевидно, що така поведінка ниток при взаємодії з напрямною має пояснення по тих же причинах, що і у першої групи.

На рис. 3.8, а представлені розрахункові залежності *VIII*, *IXT*, *XIIT* впливу натягу веденої гілки на збільшення натягу ведучої гілки, отримані на основі теоретичних досліджень даного процесу в розділі 2. Порівняння розрахункових залежностей з експериментальними даними показало, що помилка знаходиться в межах від 3% до 9%. Це дозволяє використовувати розрахункові залежності для кількісного аналізу досліджуваного процесу.

Представляє інтерес порівняння умов взаємодії з напрямною ниток з однакової сировини, але різного діаметру. Так віскозна пряжа (*VII*) більшого діаметру, чим віскозна штапельна пряжа (*XIII*) має, в середньому для кожного з інтервалів, на 5% більше значення натягу ведучої гілки. Для бавовняної пряжі (*IX*), в порівнянні з бавовняною пряжею (*XI*), натяг ведучої гілки, в середньому, на 6,8% менше. Це пояснюється більшою жорсткістю на вигин пряжі більшого розрахункового діаметру. Для вовняної пряжі, що має невисоку жорсткість на вигин, натяг більшої (*X*) по розрахунковому діаметру нитки перевищує натяг меншою (*XII*), в середньому, на 3%.

На рис. 3.8, би представлені результати експерименту за визначенням

зміни натягу ведучій гілці для синтетичних ниток, використовуваних для виробництва різних технічних тканин.

Аналіз залежностей показав, що найбільшу зміну натягу має капронова комплексна нитка (III) найбільшого діаметру - від 13,2 сН до 24,9 сН.

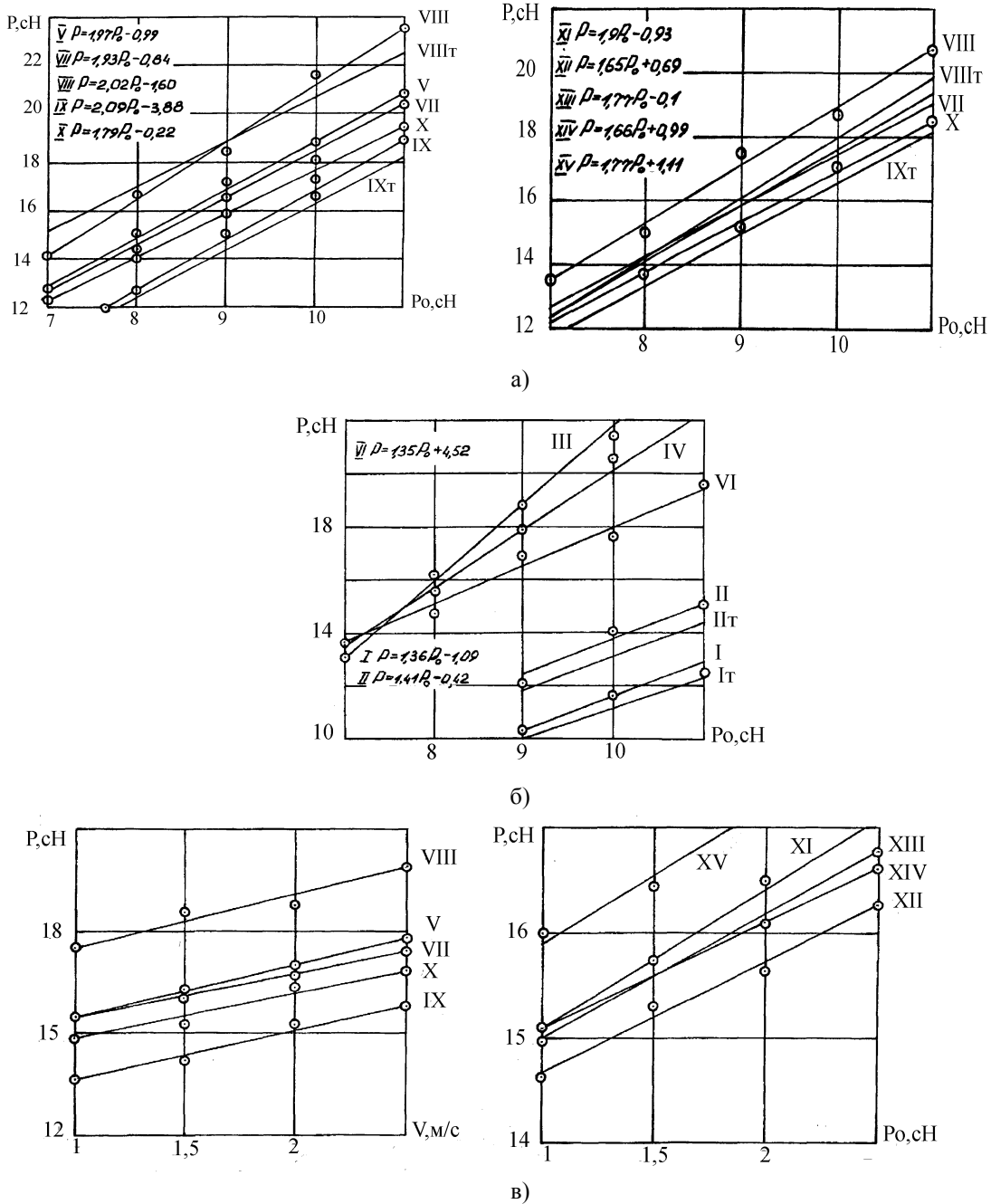


Рис.3.8. Вплив натягу веденої гілки та швидкості руху нитки на натяг її ведучої гілки

Капронова монопнитка (**II**), при збільшенні натяг  $P_0$  від 9 до 11 сН, має, в середньому, на 14% більше натяг, чим капронова монопнитка (**I**) відповідно від 12,3 сН до 15,1 сН і від 10,2 сН до 12,9 сН. Тут же представлені і розрахункові залежності.

Окрему серію склали експериментальні дослідження за визначенням впливу швидкості  $v$  руху нитки на натяг ведучої гілки.

На рис. 3.8, в представлені відповідні графічні залежності, побудовані на підставі експериментальних даних.

Для першої групи з п'яти ниток найбільша зміна натягу від швидкості має поліпропиленовая нитка (**VIII**) - від 17,6 до 19,9 сН. Далі розташовуються лавсанова (**V**) і віскозна (**VII**). Для них зміна натягу складає, відповідно: від 15,5 до 17,8 сН і від 15,5 до 17,5 сН. Найменшу зміну натягу при зміні швидкості мають натуральні нитки і пряжа. Так у вовняної (**X**) ця зміна склала 1,9 сН, а у бавовняної (**IX**) - 2,1 сН.

Основними причинами, на нашу думку, такої поведінки ниток є: зминання в зоні контакту з напрямною; характер взаємодії окремих філаментів між собою при русі в зоні зминання; фізико-механічні характеристики матеріалу окремих філаментів.

На рис. 3.8, в показано як змінюється натяг ведучої гілки від швидкості для групи ниток **XI-XV**. Аналіз показує, що знову синтетична капронова нитка (**XV**) має найбільшу зміну натягу при зміні швидкості - від 15,9 до 17,9 сН. Віскозна штапельна пряжа (**XIII**) і віскозна комплексна нитка (**XIV**) мають приблизно однаковий і по характеру і по величині приріст натягу. Він складає 1,7...1,8 сН.

Порівняння приросту натягу для ниток більшого діаметру з приростом натягу для ниток меншого діаметру показало, що для вовняної пряджі (варіанти **X** і **XII**) він на 15,8% більше, для віскозної пряджі (варіанти **VII** і **XIII**) він на 10% більше, для бавовняної пряджі (варіанти **IX** і **XI**) він на 4,8% більше. Це пояснюється тим, що нитки більшого діаметру, при

незмінному радіусі кривизни напрямної, інтенсивніше піддаються зминанню в зоні контакту за рахунок збільшення питомого тиску.

Представляє інтерес проведення досліджень за визначенням сумісного впливу натягу веденої гілки і швидкості руху нитки на зміну натягу ведучої гілки. Використовуючи регресійну залежність (3.14) для віскозної комплексної нитки (XIV), нами були побудовані перетини поверхні відгуку для різних значень натягу ведучої гілки нитки: 15; 17; 19 сН.

Як наголошувалося вище, при перетині поверхні відгуку нашого геометричного образу (див. 3.3) ми отримуватимемо прямі. Їх аналіз показує, що із зменшенням значення швидкості величина натяг веденої гілки повинна зростати (за умови постійного натяг ведучої гілки).

### **3.6. Залежність питомого розривного навантаження і відносного розривного подовження ниток від умов взаємодії з напрямною**

Основною причиною, гальмуючою підвищення продуктивності технологічного устаткування, є простої устаткування із-за ліквідації обривів нитки. Про причини обривності мовилося вище (див. розділ I). Основними з них є: низька якість сировини, руйнування окремих філаментів і самої нитки при взаємодії з робочими органами технологічного устаткування.

Переробка ниток на сучасному високошвидкісному устаткуванні приводить до того, що умови їх вантаження різко відрізняються від умов, при яких відбувається випробування їх фізико-механических властивостей.

Для визначення впливу умов взаємодії ниток напрями на їх фізико-механічні характеристики і швидкість деформації нитки на зміну її натягу і була проведена дана серія експериментів.

Випробування проводилися на розривній машині *PM-30-1*. Перед розривом кожна з 15 ниток 20 разів пропускалася через установку для

визначення натягу (рис.3.3). Таке число проходжень нитки по направляючій поверхні близько до числа, відповідному числу взаємодій елементу нитки з направляючими і робочими органами технологічного устаткування текстильної і трикотажної промисловості при його заробітку в тканину або трикотаж.

Відповідно до плану проведення експерименту був реалізований повний факторний експеримент для радіусу кривизни направляючої  $R$  і швидкості розтягування нитки  $V_g$ . При визначенні впливу вказаних чинників на величину питомого розривного навантаження  $P_p$  і відносного розривного подовження  $\epsilon_p$ , були передбачені наступні інтервали їх варіювання: радіус кривизни направляючої поверхні - від 0,6 до 2,6 мм з кроком 1 мм (для ниток  $V-XV$ ), від 3 до 5 мм з кроком 1 мм (для ниток  $I, II$ ), від 0,5 до 0,7 мм з кроком 0,1 мм (для ниток  $III, IV$ ), швидкість розтягування нитки - від 80 мм/мін до 800 мм/мін з кроком 360 мм/мін. Інтервали варіювання радіусу кривизни напрямної були близькі до значень, відповідних інтервалів при проведенні серії експериментів.

У таблиці 3.10 приведені результати по експериментальному дослідженню розриву п'ятнадцяти різних ниток ( $I-XV$ ).

При проведенні даної серії експериментальних досліджень був реалізований повний факторний експеримент для двох чинників. Для переходу від кодованих до іменованих величин користувалися співвідношеннями

$$X1 = \frac{R - R_i}{h_i}; \quad X2 = \frac{V_g - V_{gi}}{h_i}.$$

У рівняннях регресії для питомого розривного навантаження  $P_p$  і відносного розривного подовження  $\epsilon_p$  радіус кривизни направляючої поверхні необхідно підставляти в мм, а швидкість деформації зразка в мм/мін.

Аналіз отриманих рівнянь регресії вигляду

$$P_p = a_0 + a_1R + a_2Vg + a_3RVg;$$

$$\varepsilon_p = b_0 + b_1R + b_2Vg + b_3RVg$$

Таблиця 3.10. Вплив швидкості руху нитки і радіусу кривизни напрямної на  $P_p$  і  $\varepsilon_p$

Нитка	Питоме розривне навантаження $P_p$ , сН/текс				Відносне розривне подовження $\varepsilon_p$ %			
	2-i-1	2-i-2	2-i-3	2-i-4	3-i-1	3-i-2	3-i-3	3-i-4
<b>I</b>	54,2	40,4	46,3	45,4	20,0	18,0	23,0	23,0
<b>II</b>	49,0	41,2	46,1	44,3	18,0	17,0	20,0-	19,5
<b>III</b>	62,3	56,4	59,5	57,1	19,0	18,0	21,0	22,0
<b>IV</b>	57,4	51,4	55,0	53,1	19,0	17,0	20,0	21,0
<b>V</b>	42,5	36,8	40,1	38,0	18,0	17,5	19,5	20,0
<b>VI</b>	44,3	37,8	41,5	39,5	18,0	17,5	18,5	19,0
<b>VII</b>	18,5	9,5	15,0	14,5	18,0	17,6	18,8	19,0
<b>VIII</b>	28,0	18,5	24,5	24,0	19,0	16,5	20,0	20,5
<b>IX</b>	31,0	28,5	27,0	26,5	6,5	6,0	7,5	8,0
<b>X</b>	14,3	8,5	9,0	9,0	14,0	13,5	15,5	15,5
<b>XI</b>	30,5	26,0	27,0	27,5	7,0	6,5	7,5	8,0
<b>XII</b>	12,5	8,0	10,0	9,5	16,0	15,5	17,0	17,5
<b>XIII</b>	17,2	14,0	14,0	13,5	20,5	19,5	22,0	22,0
<b>XIV</b>	16,5	14,3	11,9	12,5	20,0	19,5	22,0	23,0
<b>XV</b>	54,5	52,0	50,5	50,0	19,5	19,0	21,0	22,5



коефіцієнти яких для кожної з п'ятнадцяти ниток (**I-XV**) приведені в таблиці 3.11. Вони необхідні для визначення геометричного образу форми поверхні відгуку. Для цього скористаємося, як і у випадку з визначенням натягу ведучої гілки, інваріантами  $S, \delta, T, \Delta$  і на пів інваріантами  $\Delta', \Delta'$  поверхонь другого порядку. Значення цих величин були визначені раніше. У таблиці 3.11 вказується, яку форму має поверхню відгуку для кожної конкретної регресійної залежності.

Аналіз показує, що основними формами є: еліптичний параболоїд, пара паралельних площин. Отже, в перетинах поверхонь відгуку площинами отримуватимемо прямі лінії і параболи.

На рис.3.9 а, б представлені графічні залежності питомого розривного навантаження для ниток **V, VII-X**. Для лавсанової нитки (**V**) із збільшенням радіусу кривизни від 0,6 до 2,6 мм  $Pp$  зростає з 37,5 до 41,9 сН/текс, для віскозної пряжі (**VII**) - зростає з 12,3 до 17 сН/текс, для поліпропіленової нитки (**VIII**) - зростає з 21,8 до 26,6 сН/текс, для х/б пряжі (**IX**) - зростає з 27,4 до 28,6 сН/текс, для вовняної пряжі (**X**) - зростає з 8,8 до 11,7 сН/текс.

Це пояснюється, на нашу думку, зменшенням питомого тиску в зоні контакту нитки з напрямною, що, у свою чергу, зменшує обривність окремих філаментів і підвищує міцність на розрив нитки в цілому. Крім того, нитки, що мають велике скручування, володіють більшою стійкістю до стираючих дій. Аналіз приведених результатів показує, що міцність на розрив залежить від матеріалу самої нитки - хімічні нитки (**V, VII, VIII**) володіють кращими прочностними показниками.

При збільшенні швидкості деформації з 200 до 800 мм/мін зростає і питоме розривне навантаження: для лавсанової (**V**) - на 0,4 сН/текс, для бавовняної (**IX**) - на 1,7 сН/текс, для вовняної (**X**) - на 2 сН/текс. Збільшення швидкості деформації приводить до того, що ще не встигають

розвинулися пластичні і частково еластичні її складові це і визначає таку поведінку ниток.

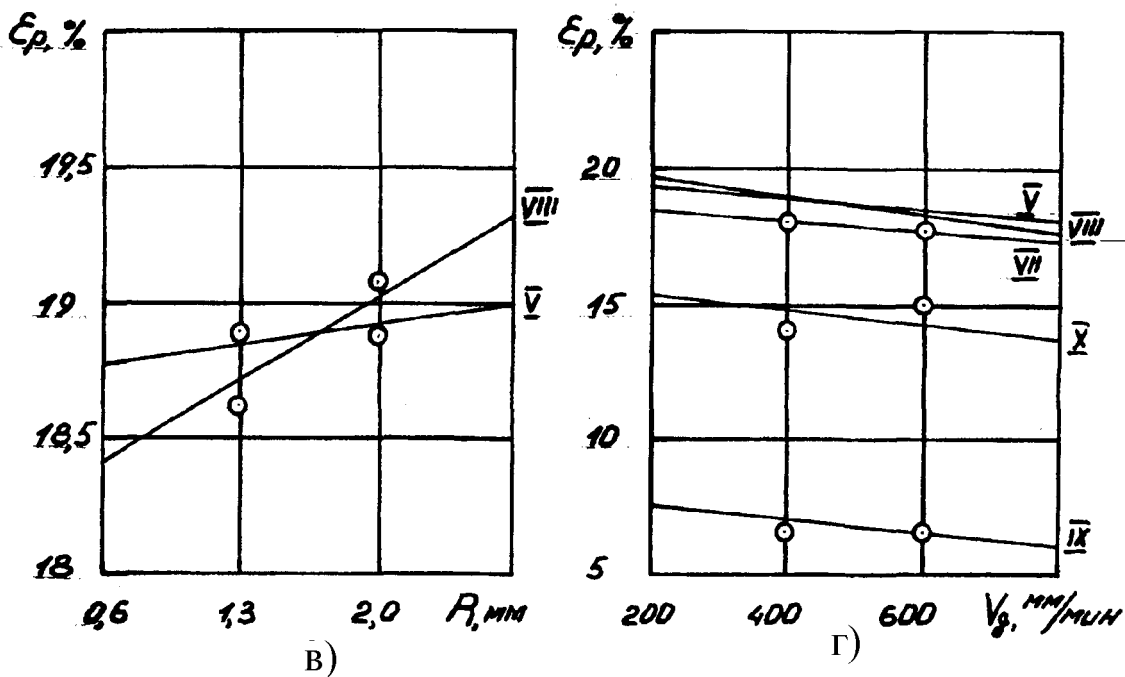
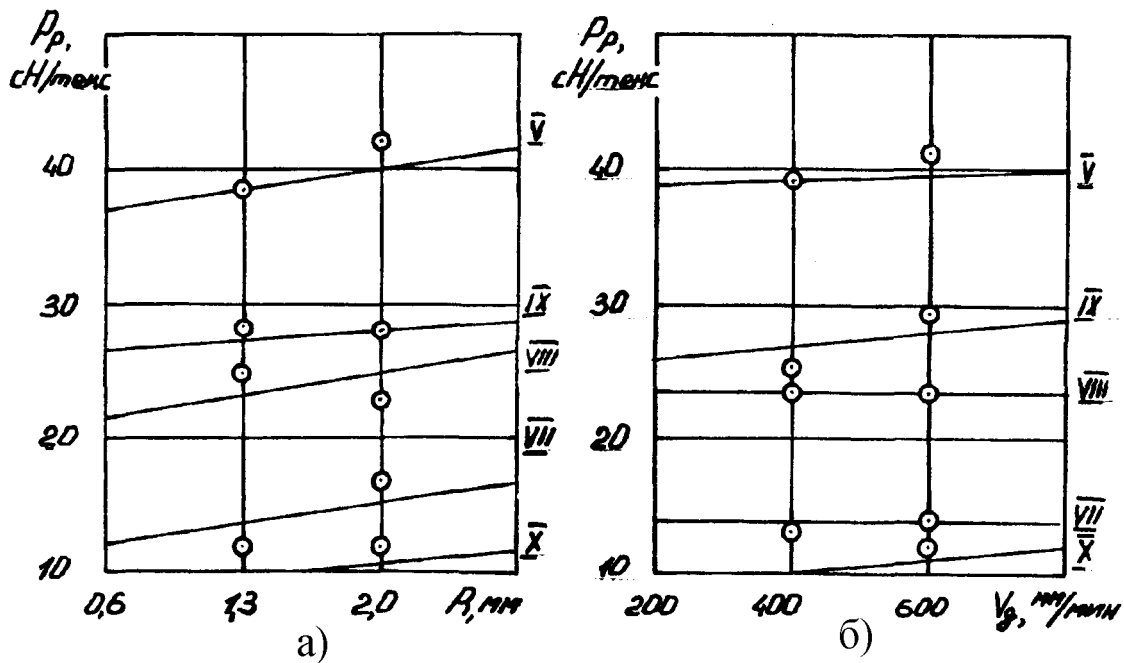


Рис.3.9. Залежність питомої розривного навантаження та відносного розривного подовження від швидкості деформації та радіуса кривизни напрямної

Таблиця 3.11. Значення коефіцієнтів в рівнянні регресії і тип образу функції відгуку для ниток (**I-XV**)

Нитка	Значення коефіцієнтів в рівнянні регресії для $Pp$				Тип образу функції відгуку	Значення коефіцієнтів в рівнянні регресії для $\epsilon p$				Тип образу функції відгуку
	$a0$	$a1$	$a2$	$a3$		$b0$	$b1$	$b2$	$b3$	
<b>I</b>	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>I</b>	36,77	2,46	-0,01	0,003	Еліптичний параболоїд	21,44	0,5	-0,006	-	Пара паралельних площин
<b>II</b>	42,88	0,57	-0,02	0,004	Еліптичний параболоїд	18,49	0,38	-0,003	-	Пара паралельних площин
<b>III</b>	52,15	10,04	-0,02	0,02	Еліптичний параболоїд	25,5	-6,11	-0,01	0,01	Еліптич. параболоїд
<b>IV</b>	49,90	7,21	-0,02	0,03	Еліптичний параболоїд	24,77	-6,67	-0,01	0,02	Еліптич. параболоїд
<b>V</b>	37,99	0,85	-0,004	0,003	Еліптичний параболоїд	20,46	-0,31	-0,004	0,001	Еліптич. параболоїд
<b>VI</b>	39,58	0,75	-0,005	0,003	Еліптичний параболоїд	19,34	-0,31	-0,002	0,001	Еліптич. параболоїд

продовження таблиці 3.11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>У11</b>	15,20	-0,22	-0,01	0,006	Еліптичний параболоїд	19,02	-	-0,002	-	Пара паралельних площин
<b>УШ</b>	24,76	-0,25	-0,01	0,006	Еліптичний параболоїд	21,20	-0,42	-0,007	0,002	Еліптич. параболоїд
<b>ІХ</b>	26,20	0,14	0,002	0,001	Еліптичний параболоїд	7,92	-	-0,002	-	Пара паралельних площин
<b>Х</b>	9,25	0,32	0,003	0,004	Еліптичний параболоїд	15,71	-	-0,002	-	Пара паралельних площин
<b>ХІ</b>	27,98	-0,53	-0,005	0,004	Еліптичний параболоїд	7,86	-	-0,001	-	Пара паралельних площин
<b>ХІІ</b>	9,96	0,03	-0,004	0,003	Еліптичний параболоїд	17,42	-	-0,002	-	Пара паралельних площин
<b>ХІІІ</b>	13,38	0,10	-	0,002	Еліптичний параболоїд	22,22	-	-0,003	-	Пара паралельних площин
<b>Х1у</b>	12,57	-0,46	0,001	0,002	Еліптичний параболоїд	23,56	-0,46	-0,006	0,001	Еліптич. параболоїд
<b>Ху</b>	49,69	0,14	0,002	0,001	Еліптичний параболоїд	23,01	-0,61	-0,006	0,001	Еліптич. параболоїд

При збільшенні радіусу кривизни направляючої поверхні (див. рис. 3.9, в) відносне розривне подовження зростає; для лавсанової нитки (V) - на 0,22%, для поліпропіленової нитки (VIII) - на 1%. Це, як і у випадку з питомим розривним навантаженням, пояснюється зменшенням питомого тиску в зоні контакту, що приводить до скорочення обривів окремих філаментів.

При зростанні швидкості деформації відносне розривне подовження зменшується: для лавсанової нитки (V) (див. рис.3.9, г) - на 1,4%, для віскозної пряжі (VII) - на 1,2%, для поліпропіленової нитки (VIII) - на 2,2%, для х/б пряжі (IX) - на 1,2%, для вовняної пряжі (X) - на 1,1%. Пояснення цьому було дано вище - не встигають розвинути пластична і частково еластична складова деформації.

Для ниток XI-XV спостерігається аналогічна картина. При збільшенні радіусу кривизни напрямної питоме розривне навантаження зростає: для х/б пряжі (XI) на 2,4 сН/текс, для вовняної пряжі (XII) на 2,7 сН/текс, для віскозної штапельної пряжі (XIII) на 2 сН/текс, для віскозної комплексної нитки (XIV) на 0,9 сН/текс, для капронової комплексної нитки (XV) на 1,1 сН/текс. При цьому відносне розривне подовження, при збільшенні швидкості деформації від 200 до 800 мм/мін, зменшується: для х/б пряжі (XI) на 0,6%, для вовняної пряжі (XII) на 1,2%, для віскозної штапельної пряжі (XIII) на 0,8%, для віскозної комплексної нитки (XIV) на 2,6%, для капронової комплексної нитки (XV) на 2,7%.

При збільшенні швидкості деформації питоме розривне навантаження, при незмінному значенні радіусу кривизни при проведенні експерименту - 1,6 мм, зростало: для бавовняної пряжі (XI) з 27,4 до 28,3 сН/текс; для вовняної пряжі (XII) з 10,2 до 10,7 сН/текс, для віскозної штапельної пряжі (XIII) з 14,2 до 16,1 сН/текс; для віскозної комплексної нитки (XIV) з 12,7 до 15,2 сН/текс, для капронової комплексної нитки (XV) з 50,6 до 52,8 сН/текс.

Поведінка даної групи ниток (*XI...XV*), при проведенні експерименту, пояснюється тими ж причинами, що і в першому випадку - для групи ниток (*V, VII...X*).

### 3.7. Анізотропія тертя ниток

При переробці на технологічному устаткуванні нитки здійснюють складний рух. Так, при формуванні тканини або в'язанні трикотажу вони здійснюють як подовжнє, так і поперечне ковзання. В цьому випадку, виявляється анізотропія їх фізико-механичних властивостей, зокрема, анізотропія тертя.

Дослідження характеру поведінки ниток в умовах анізотропії дозволить глибше вивчити різні технологічні процеси, намітити шляхи їх оптимізації. Як показали попередні дослідження, коефіцієнт тертя нитки при її подовжньому русі менший, ніж при русі в поперечному напрямі. Цю обставину необхідно враховувати при визначенні технологічних зусиль, що виникають в нитки при її переробці на технологічному устаткуванні.

Для оцінки анізотропії тертя була проведена серія експериментальних досліджень. Відповідно до плану експерименту нами визначалися значення коефіцієнтів тертя ниток при їх подовжньому і поперечному ковзанні. Отримані дані приведені в таблиці 3.12.

Отримані експериментальні дані використовувалися для побудови регресійних залежностей коефіцієнта тертя ниток в подовжньому і поперечному напрямках від величини радіусу кривизни направляючої поверхні вигляду

$$\mu_{\text{пр.поп.}} = b_0 + b_1 R.$$

Крок зміни радіусу кривизни напрямної, відповідно до плану експерименту, дорівнював  $h_i = 1$  мм.

Значення коефіцієнтів  $b_0$ ,  $b_1$  і величина середньоквадратического відхилення окремого результату  $\sigma^2$  приведені для кожного варіанту в

таблиці 3.12. При проведенні експерименту натяг веденої гілки нитки дорівнювало  $P_0 = 9$  сН, кут обхвату направляючою ниткою складав  $\varphi = 1,57$  радий. Кутова швидкість обертання барабана була такою, що лінійна швидкість точок бічної поверхні дорівнювала 1,8 м/с.

Для капронової комплексної нитки (IV), в подовжньому напрямі, коефіцієнт тертя збільшується на 15,8% з 0,133 до 0,154. У поперечному напрямі, при збільшенні радіусу кривизни з 0,8 до 2,8 мм, коефіцієнт тертя зростає на 8,9% з 0,224 до 0,244. Порівняння між собою коефіцієнтів тертя в подовжньому і поперечному напрямі для одного і того ж радіусу кривизни показало, що різниця складає, в середньому, 58.65%.

Для поліпропіленової нитки (VIII), в подовжньому напрямі, - коефіцієнт тертя збільшується на 13,4%, а в поперечному напрямі - на 11,3%. У поперечному напрямі коефіцієнт тертя більше коефіцієнта тертя в подовжньому напрямі, в середньому, на 42.48%. Аналогічна ситуація спостерігається і для лавсанової комплексної нитки (V), де збільшення значення коефіцієнта тертя в подовжньому і поперечному напрямках відповідно рівне 9,4% і 16,3%. Різниця в абсолютних значеннях цих коефіцієнтів складає 45.48%.

Для натуральних ниток бавовняною (IX) і вовняної (X) збільшення коефіцієнта тертя в подовжньому напрямі відповідно склало 7,6% і 11,2%. а в поперечному напрямі 29,8% і 11,5%.

Таке збільшення коефіцієнта тертя як в подовжньому, та і в поперечному напрямі пояснюється збільшенням площі контакту нитки з направляючою поверхнею при зростанні радіусу кривизни останньою з 0,8 до 2,8 мм. При аналізі процесу взаємодії ниток з напрямною необхідно враховувати механіко-молекулярну природу даного процесу.

Вельми цікавий той факт, що нитки, що мають середнє і високе скручування, менше схильні до анізотропії фрикційних властивостей. Це добре видно на прикладі віскозної пряжі (VII). У неї збільшення

коефіцієнта тертя в подовжньому напрямі склало 9,6%, а в поперечному 9,1%.

Таблиця 3.12.Значення коефіцієнтів тертя ниток в подовжньому і поперечному напрямі

Нитка	Напрямок руху нитки	Значення коефіцієнта тертя $\mu$					Коефіцієнти в рівнянні регресії		Величина середнього квадратичного відхилення, $\sigma \cdot 10^{-6}$
		Радіус кривизни напрямної					$b_0$	$b_1$	
		$R$ , мм							
		0,8	1,3	1,8	2,3	2,8			
IУ	<i>Подовжнє</i>	0,133	0,140	0,146	0,150	0,154	0,125	0,01	1,39
	<i>Поперечне</i>	0,224	0,230	0,238	0,241	0,244	0,216	0,01	6,10
У	<i>Подовжнє</i>	0,128	0,135	0,140	0,144	0,147	0,120	0,01	2,40
	<i>Поперечне</i>	0,184	0,190	0,194	0,199	0,214	0,170	0,02	5,60
У II	<i>Подовжнє</i>	0,124	0,129	0,132	0,134	0,136	0,119	0,006	0,89
	<i>Поперечне</i>	0,175	0,180	0,183	0,188	0,191	0,169	0,01	0,06
У III	<i>Подовжнє</i>	0,134	0,141	0,146	0,149	0,152	0,128	0,01	2,00
	<i>Поперечне</i>	0,194	0,199	0,203	0,209	0,216	0,185	0,01	8,90
ІХ	<i>Подовжнє</i>	0,144	0,148	0,151	0,153	0,155	0,140	0,01	0,50
	<i>Поперечне</i>	0,201	0,210	0,223	0,255	0,261	0,174	0,03	14,0
Х	<i>Подовжнє</i>	0,107	0,112	0,115	0,117	0,119	0,103	0,01	0,89
	<i>Поперечне</i>	0,166	0,171	0,174	0,180	0,185	0,158	0,01	0,50



Це можна пояснити тим, що витки на поверхні нитки розташовуються до вектора швидкості приблизно під одним і тим же кутом у разі подовжнього або поперечного руху.

На закінчення можна відзначити, що експериментальне підтвердження залежності коефіцієнта тертя від величини радіусу кривизни направляє дозволяє зробити вивід про коректність зроблених допущень при теоретичному дослідженні процесу руху нитки по тій, що направляє.

### **3.8. Вплив форми направляючої поверхні на величину натягу нитки**

Дана серія експериментальних досліджень була проведена для визначення впливу форми направляючої поверхні на натяг ведучої гілки нитки. Отримані результати можна використовувати при модернізації геометричної форми існуючих робочих органів технологічного устаткування і напрямних, при створенні їх нового вигляду (голок, платин, направляючих прутков і ін.).

При теоретичному дослідженні процесу взаємодії ниток з напрямними, форма останніх робила свій вплив на натяг нитки.

Як направляючі поверхні для електротензометрической установки (див. рис. 3.3) використовували стрижні, у яких поперечний перетин мав циліндрову і параболічну форму. Крок зміни радіусу кривизни направляючої поверхні дорівнював 1 мм. Для стрижнів з параболічною формою значення радіусу кривизни на дузі обхвату ниткою напрямної приймалося рівним середньоарифметичному максимального і мінімального радіусів (наприклад, для  $R_i = 1,8$  мм,  $R_{max} = 2,2$  мм, а  $R_{min} = 1,4$  мм).

Для кожного варіанту знімали три повторні осцилограми.

Результати, представлені в таблиці 3.13, були отримані шляхом обробки експериментальних даних методами математичної статистики. По

критерію Стьюдента проводилася перевірка надійності отриманого результату при вибраній довірчій вірогідності 0,95.

При проведенні експерименту незмінними зберігалися: натяг веденої гілки ( $P_0 = 9$  сН); кут обхвату ниткою напрямної ( $\varphi = 1,57$  радий); швидкість руху нитки ( $V = 0,9$  м/с).

Для опису залежності форми і розмірів напрямної на натяг ведучої гілки, при апроксимації експериментальних даних таблиці 3.13, використовували поліноми другого ступеня вигляду

$$P = b_2 + b_1 Ri + b_0 Ri^2.$$

Коефіцієнти  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , для кожної конкретної нитки, визначалися по відомій методиці.

Необхідно відзначити, що апроксимація експериментальних даних виконувалася з використанням стандартних пакетів програм на ЕОМ.

Аналізуючи отримані результати, переконуємося в тому, що найбільше натяг у ниток має місце, коли остання рухається по напрямній, у якої кривизна із зростанням кута обхвату зменшується.

Так на рис. 3.10 представлені графічні залежності зміни натягу ведучої гілки для капронової нитки (*IV*) і вовняної пряжі (*X*) для різних значень радіусу кривизни. Тут криві *IV1*, *X1* відповідають випадку, коли нитка рухається у бік збільшення кривизни, а криві *IV2*, *X2* - у бік зменшення. Криві *IV*, *X* відповідають випадку, коли напрямна має постійну кривизну.

При русі віскозної пряжі (*VII*) і поліпропіленовій (*VIII*) нитки натяг, для випадку направляючої постійної кривизни, змінювався відповідно з 12,6 сН до 10,8 сН і з 11,9 сН до 10,1 сН. Для випадку збільшення кривизни, відповідно змінювався з 12,1 до 10,7 сН і з 11,3 до 10,0 сН. При зменшенні кривизни напрямної натяг для цих ниток змінювався відповідно в межах з 12,8 до 10,9 сН і з 12,1 до 10,7 сН.

Проведений глибокий розбір даних явищ дозволив встановити, що при збільшенні кривизни нитки, змінання, в зоні контакту йде поступово, досягаючи свого максимуму ближче до точки сходу. У разі напрямної з кривизною, що зменшується, ще на початковій стадії рухи нитки відбуватиметься інтенсивне змінання.

Таблиця 3.13. Влияние формы направляющей поверхности на натяг ведущей гілки нитки

Нитка	Характер зміни кривизни <i>До</i> поверхні	Натяг ведучої гілки нитки $P$ , сН					Значення коефіцієнтів в рівнянні регресії		
		Радіус кривизни $R$ , мм					$b_0$	$b_1$	$b_2$
		0,8	1,3	1,8	2,3	2,8			
1У	<i>K - const</i>	13,4	11,5	11,6	13,8	18,1	4,15	-12,6	20,80
	<i>K - збіл.</i>	13,0	11,4	11,5	12,2	14,1	2,05	-6,83	17,20
	<i>K - зменш.</i>	14,2	12,6	12,1	14,2	15,1	2,55	-8,73	19,55
У	<i>K - const</i>	13,3	12,1	11,3	11,0	11,1	0,90	-4,34	16,19
	<i>K - збіл..</i>	13,2	11,8	10,6	10,8	11,0	1,50	-6,50	17,44
	<i>K - зменш.</i>	13,9	12,6	11,8	12,0	12,5	1,40	-5,74	17,59
У II	<i>K - const</i>	12,6	12,1	11,7	11,3	10,8	2,6.10	-0,90	13,30
	<i>K - збіл.</i>	12,1	11,7	11,2	10,8	10,7	0,20	-1,42	13,11
	<i>K - зменш.</i>	12,8	12,2	11,9	11,5	10,9	-0,05	-0,77	13,45
УШ	<i>K - const</i>	11,9	11,5	11,0	10,6	10,1	1,9.10	-0,90	12,62
	<i>K - збіл..</i>	11,3	11,1	10,9	10,5	10,0	-0,25	0,25	11,26
	<i>K - зменш.</i>	12,1	11,9	11,5	11,0	10,7	-0,09	-0,34	12,44
ІХ	<i>K - const</i>	8,9	9,6	9,7	9,8	10,0	-0,25	1,45	7,89
	<i>K - збіл.</i>	8,9	9,2	9,4	9,7	9,9	-8.10-	0,50	8,49
	<i>K - зменш.</i>	8,1	8,4	8,7	9,1	9,6	0,15	0,21	7,84

X	K - const	14,3	12,6	11,5	11,2	11,5	1,47	-6,61	18,65
	K - збіл..	14,0	13,6	13,0	12,2	12,3	-0,40	0,04	14,22
	K - зменш.	14,8	14,0	13,4	12,8	12,8	1,5.10	-0,60	14,48

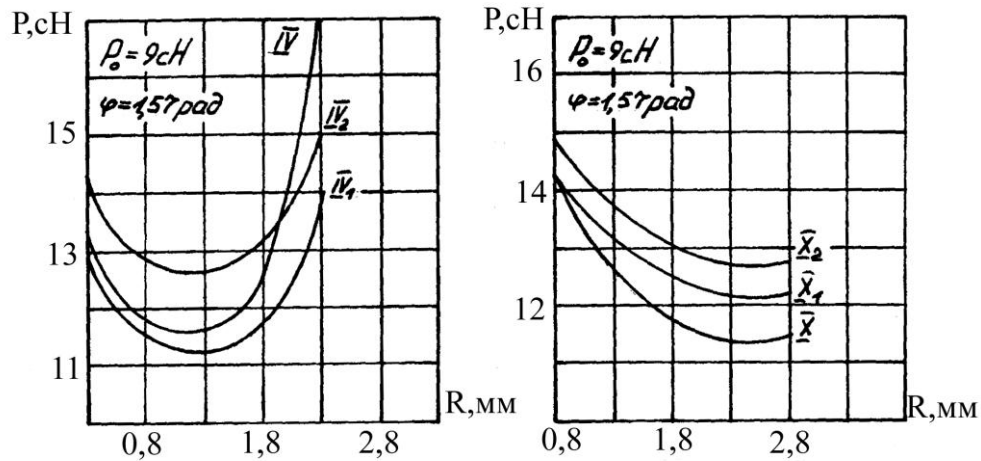


Рис.3.10. Залежність натягу ведучої гілки від форми напрямної

Враховуючи, що час проходження ділянки нитки в зоні контакту дуже малий (близько  $1 \cdot 10^{-3}$  с), можна припустити, що не встигають розвинутися необоротні деформації (нитка є "жорсткою" при поперечній деформації). Це і приводить до зростання натягу. Крім того, не можна не враховувати зміну коефіцієнта тертя із зміною радіусу кривизни.

### Основні висновки по розділу

1. Складені плани проведення експериментальних досліджень умов взаємодії ниток з направляючими поверхнями постійної і змінної кривизни.

2.1. Визначені основні чинники, що впливають на зміну натягу ведучої гілки нитки. Це натяг веденої гілки, радіус кривизни напрямної, кут обхвату і швидкість руху нитки. Для даних чотирьох чинників

реалізований ортогональний план 2-го порядку .

2.2. Проведено докладне обґрунтування вибору ниток і пряжі, реєструючої для вимірника апаратуру. Розроблено дві нові установки, захищені авторськими свідоцтвами.

3. За наслідками дослідження сумісного впливу радіусу кривизни направляючої  $R$ , натяг веденої гілки  $P_0$ , кута обхвату  $\varphi$  і швидкості руху нитки  $v$  побудовані наступні регресійні залежності (3.1) -(3.15):

капронова моонитка 52Т

$$P = 0,82R + 1,36P_0 + 1,66\varphi - 9,00;$$

капронова моонитка 36т

$$P = 0,61R + 1,41P_0 + 1,86\varphi - 8,05;$$

капронова комплексна нитка 280,5Т

$$P = 57,80R^2 - 35,19R + 4,89P_0 + 2,74\varphi - 2,08v - 4,59RP_0 + 0,45P_0v - 11,05;$$

капронова комплексна нитка 174Т

$$P = 4,16R^2 - 5,54R + 2,95P_0 + 3,34\varphi + 1,77v - 0,79RP_0 - 12,53;$$

лавсанова комплексна нитка 110,8Т

$$P = 0,86R^2 - 4,16R + 1,95P_0 + 3,20\varphi + 1,53v - 8,08;$$

лавсанова комплексна нитка 58Т

$$P = 0,75R^2 - 3,26R + 1,35P_0 + 3,09\varphi + 1,38v - 3,21;$$

віскозна пряжа 93,8Т

$$P = 1,93R^2 + 2,89\varphi + 1,34v - 0,87R - 9,84;$$

полипропиленовая комплексна нитка 93,5Т

$$P = 0,96R + 2,38P_0 + 3,37\varphi + 1,54v - 0,21RP_0 - 15,41;$$

бавовняна пряжа 100Т

$$P = 3,46R - 1,02R^2 + 2,09P_0 + 3,24\varphi + 1,40v - 18,35;$$

шерстяна пряжа 89,7Т

$$P = 1,41R^2 - 6,48R + 1,79P_0 + 2,49\varphi + 1,29v - 2,55;$$

бавовняна пряжа 27,6Т

$$P = 1,90P_0 - 0,32R + 3,26\varphi + 1,38v - 11,96;$$

шерстяна пряжа 29,9Т

$$P = 1,33R^2 - 5,46R + 1,65P_0 + 2,31\varphi + 1,10\nu - 2,29;$$

віскозна штапельна пряжа 28,8Т

$$P = 0,83R^2 - 3,21R + 1,17P_0 + 3,06\varphi + 1,31\nu - 6,73;$$

віскозна комплексна нитка 16,7Т

$$P = 0,63R^2 - 2,11R + 1,66P_0 + 2,57\varphi + 1,10\nu - 6,39;$$

капронова комплексна нитка 28Т

$$P = 0,83R^2 - 3,21R + 1,77P_0 + 3,06\varphi + 1,31\nu - 6,73.$$

4. Визначена залежність питомого розривного навантаження і відносного розривного подовження від умов взаємодії нитки з напрямною (для ниток *I.XV*).

5. Проведені експериментальні дослідження і визначений вплив анізотропії тертя і форми направляючої поверхні на натяг ведучої гілки капронових, віскозних, бавовняних і вовняних ниток.

---

#### **4. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТЕКСТИЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ З УРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕФОРМАЦІЇ ТА ТЕРТЯ В ЗОНІ КОНТАКТУ НИТКИ З НАПРЯМНОЮ**

Взаємодія ниток з циліндричними напрямними поверхнями зустрічається в багатьох технологічних процесах текстильної і трикотажної промисловості. При цьому можна розділяти взаємодію ниток з напрямними великої і малої кривини. В даній роботі розглядається останній випадок.

Взаємодія ниток з циліндричними напрямними з постійною кривизною поверхні широко зустрічається в трикотажній, ткацькій промисловості, коли відбувається відносне переміщення напрямних та ниток.

Удосконалення технологічних процесів легкої та текстильної промисловості повинно базуватися на комплексних дослідженнях процесу взаємодії ниток з напрямними поверхнями малої кривизни [1, 2, 10, 12]. Отримання теоретичних залежностей дозволить отримати рівняння для визначення натягу нитки в зоні формування тканини та трикотажу, зменшити відсоток обривів ниток, поліпшити якість готової продукції [2]. В багатьох проведених дослідженнях не враховується нелінійна залежність сили та коефіцієнта тертя при отриманні остаточних рівнянь [2-13]. Все це призводить до значних розбіжностей між теоретичними та експериментальними залежностями, що не дозволяє використовувати перші при конкретних розрахунках.

Теоретичні дослідження процесу взаємодії ниток з циліндричними нитко напрямними пристроями з урахуванням нелінійної залежності сили та коефіцієнту тертя ставлять перед собою мету визначення їх натягу в довільній точці, що дозволить удосконалити процес їх переробки на технологічному устаткуванні [10, 12].

#### 4.1.ВЗАЄМОДІЯ НИТКИ З НАПРАВЛЯЮЧИМИ ПОВЕРХНЯМИ МАЛОЇ КРИВИЗНИ

##### Отримання диференціальних рівнянь, які описують рівновагу нитки на поверхні малої кривизни

На рис.4.1.1 показана загальна розрахункова схема. Нитка огинає циліндричну напрямну поверхню радіусу  $R$ . Вхідний натяг нитки дорівнює  $P_0$ , а вихідний натяг нитки дорівнює  $P$ . Кут охоплення ниткою циліндричної напрямної дорівнює  $\varphi$ .

Система диференціальних рівнянь, яка описує рівновагу нескінченно малого елемента нитки  $ds = R d\varphi$  ( $s$  - дугова координата) має вигляд [35-37]

$$\frac{dP}{ds} = F_{mp}, \quad \frac{P}{R} = N, \quad (4.1.1)$$

де  $P$  - натяг нитки;

$F_{mp}$  - сила тертя, яка діє на нескінченно малий елемент нитки;

$N$  - питома нормальна реакція напрямної поверхні.

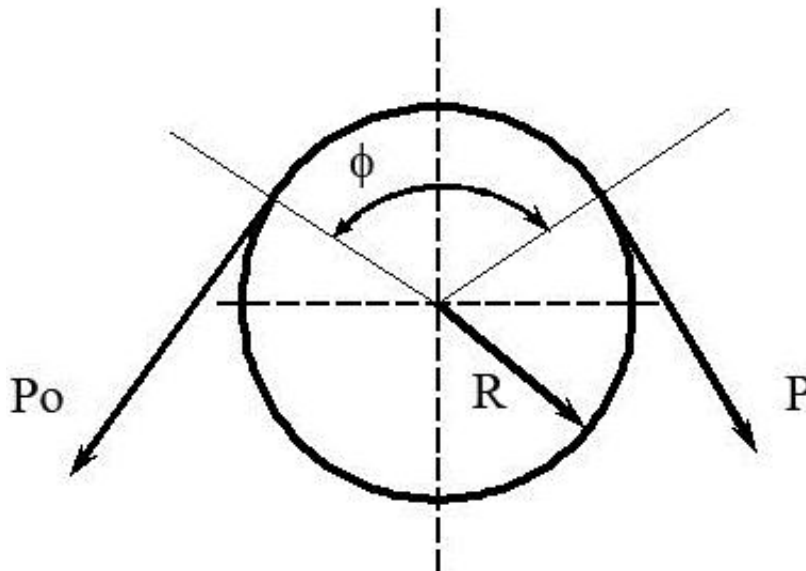


Рис.4.1.1. Загальна розрахункова схема

Дослідження, проведені в цьому напрямку [1, 2, 10, 12], свідчать про те, що сила та коефіцієнт тертя нелінійно залежать від попереднього



натягу, кута охоплення ниткою напрямної, діаметру циліндричної напрямної [35]. На рис.4.1.2 представлені графічні залежності зміни коефіцієнта тертя  $f$  від попереднього натягу нитки  $P_0$  (крива 1), кута охоплення ниткою напрямної  $\phi$  (крива 2), діаметру циліндричної напрямної  $d$  (крива 3).

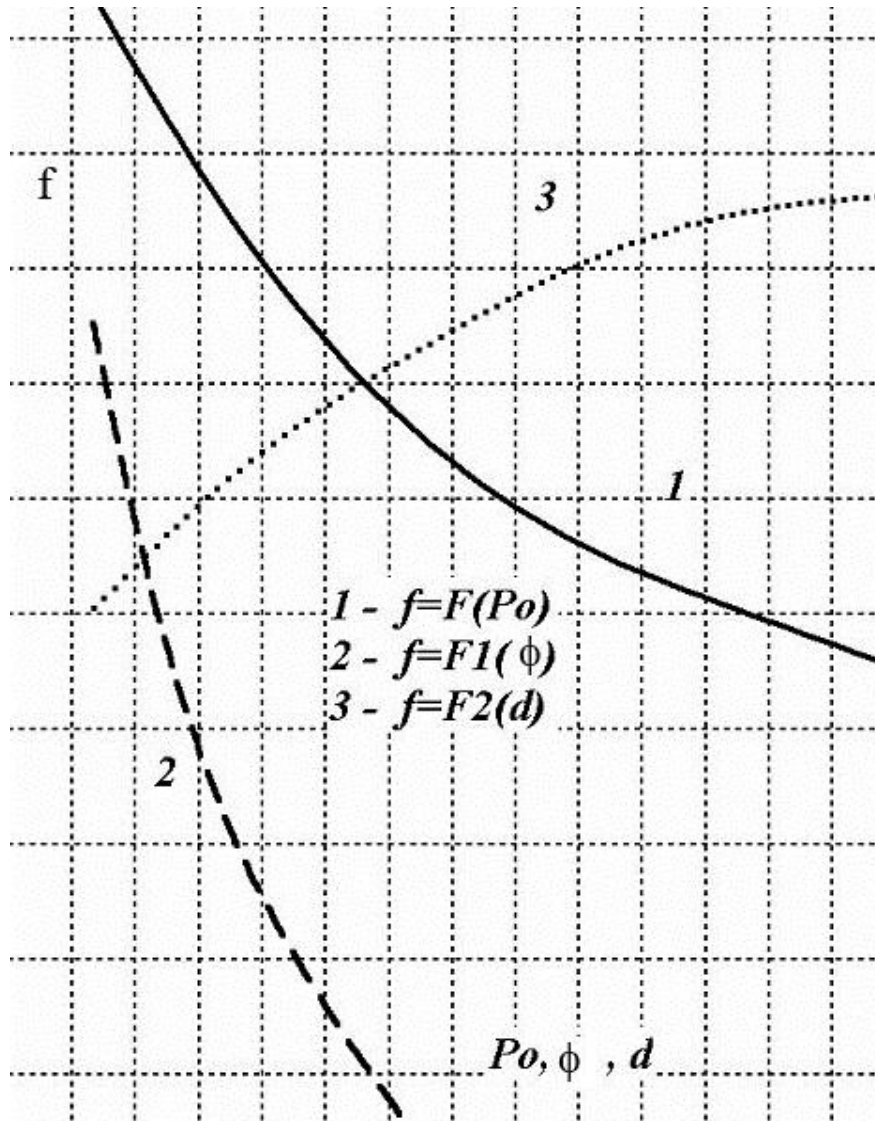


Рис.4.1.2. Графічні залежності коефіцієнта тертя від натягу нитки, кута охоплення та діаметру напрямної

Виходячи з цього силу тертя  $F_{тр}$  та коефіцієнт тертя  $f$  можна представити наступними залежностями

$$\begin{aligned} F_{mp} &= fN^n, \\ f &= \frac{a}{b\varphi^{n_1}}, \end{aligned} \quad (4.1.2)$$

де  $n, a, b, n_1$ - деякі константи, значення яких залежать від виду матеріалів нитки та напрямної та умов взаємодії між ними. Так значення  $n$  знаходиться в межах  $\frac{2}{3} \leq n \leq 1$  [10]. Коли  $n_1 = 0$ , то з другого рівняння системи (4.1.2) коефіцієнт тертя буде дорівнювати  $f = \frac{a}{b}$ .

З урахуванням системи рівнянь (4.1.2), представимо систему диференціальних рівнянь (4.1.1) у вигляді

$$\frac{dP}{Rd\varphi} = \frac{aP^n}{b\varphi^{n_1}R^n}. \quad (4.1.3)$$

Розділяємо в диференційному рівнянні (4.1.3) змінні і отримаємо наступне диференціальне рівняння

$$\frac{dP}{P^n} = \frac{aRd\varphi}{b\varphi^{n_1}R^n}.$$

Проінтегруємо останнє диференціальне рівняння

$$\int_{P_0}^P P^{-n} dP = \frac{a}{bR^{n-1}} \int_0^\varphi \varphi^{-n_1} d\varphi, \quad (4.1.4)$$

або

$$\frac{1}{1-n} P^{1-n} \Big|_{P_0}^P = \frac{a\varphi^{1-n_1}}{bR^{n-1}(1-n_1)} \Big|_0^\varphi.$$

Підставляємо верхнє та нижнє значення параметрів визначених інтегралів та отримуємо

$$P^{1-n} - P_0^{1-n} = \frac{(1-n)a}{bR^{n-1}(1-n_1)} \varphi^{1-n_1}.$$

В остаточному вигляді отримаємо формулу для визначення натягу ведучої гілки нитки

$$P^{1-n} = P_0^{1-n} + \frac{(1-n)aR^{1-n}}{b(1-n_1)} \varphi^{1-n_1}. \quad (4.1.5)$$

**Визначення натягу нитки з урахуванням нелінійної залежності сили та коефіцієнта тертя**

Перейдемо до аналізу рівняння (4.1.5). Прологарифмуємо його ліву та праву частини

$$(1-n)\ln P = \ln \left[ P_0^{1-n} + \frac{(1-n)aR^{1-n}}{b(1-n_1)} \varphi^{1-n_1} \right],$$

або

$$\ln P = \frac{\ln \left[ P_0^{1-n} + \frac{(1-n)aR^{1-n}}{b(1-n_1)} \varphi^{1-n_1} \right]}{(1-n)}.$$

Визначимо значення натягу ведучої гілки нитки для чого перейдемо в останньому рівнянні до границі при  $n \rightarrow 1$

$$\lim_{n \rightarrow 1} \ln P = \lim_{n \rightarrow 1} \frac{\ln \left[ P_0^{1-n} + \frac{(1-n)aR^{1-n}}{b(1-n_1)} \varphi^{1-n_1} \right]}{(1-n)}. \quad (4.1.6)$$

Використовуючи правило Лопітала будемо мати

$$\lim_{n \rightarrow 1} \ln P = \lim_{n \rightarrow 1} \frac{\ln \left[ P_0^{1-n} + \frac{(1-n)aR^{1-n}}{b(1-n_1)} \varphi^{1-n_1} \right]}{(1-n)} = \lim_{n \rightarrow 1} \frac{F_1}{F_2},$$

$$F_1 = \frac{d}{dn} \left\{ \ln \left[ P_0^{1-n} + \frac{(1-n)aR^{1-n}}{b(1-n_1)} \varphi^{1-n_1} \right] \right\}, \quad (4.1.7)$$

$$F_2 = \frac{d}{dn} (1-n) = -1.$$

Знайдемо значення функції  $F_1$  для чого визначимо значення відповідної похідної

$$F_1 = \frac{-P_0^{1-n} \ln P_0 - \frac{a\varphi^{1-n_1} R^{1-n} \ln R}{b(1-n_1)} - \frac{a\varphi^{1-n_1} R^{1-n}}{b(1-n_1)} + \frac{a\varphi^{1-n_1} n R^{1-n} \ln R}{b(1-n_1)}}{P_0^{1-n} + \frac{(1-n)aR^{1-n}}{b(1-n_1)} \varphi^{1-n_1}}. \quad (4.1.8)$$

Підставляємо рівняння (4.1.8) та третє рівняння системи (4.1.7) в перше рівняння системи (4.1.7), отримаємо

$$\lim_{n \rightarrow 1} \frac{F_1}{F_2} = \frac{P_0^{1-n} \ln P_0 + \frac{a\varphi^{1-n_1} R^{1-n} \ln R}{b(1-n_1)} + \frac{a\varphi^{1-n_1} R^{1-n}}{b(1-n_1)} - \frac{a\varphi^{1-n_1} n R^{1-n} \ln R}{b(1-n_1)}}{P_0^{1-n} + \frac{(1-n)aR^{1-n}}{b(1-n_1)} \varphi^{1-n_1}}. \quad (4.1.9)$$

Після підстановки (4.1.9) в перше рівняння системи (4.1.7), перетворимо його у вигляд

$$\ln P = \lim_{n \rightarrow 1} \frac{F_1}{F_2} = \frac{P_0^{1-n} \left[ \ln P_0 + \frac{a\varphi^{1-n_1} \ln R}{b(1-n_1)} \left( \frac{R}{P_0} \right)^{1-n} + \frac{a\varphi^{1-n_1}}{b(1-n_1)} \left( \frac{R}{P_0} \right)^{1-n} - \frac{a\varphi^{1-n_1} n \ln R}{b(1-n_1)} \left( \frac{R}{P_0} \right)^{1-n} \right]}{P_0^{1-n} \left[ 1 + \frac{(1-n)a\varphi^{1-n_1}}{b(1-n_1)} \left( \frac{R}{P_0} \right)^{1-n} \right]}.$$

Спростимо останнє рівняння, отримаємо

$$\ln P = \frac{\ln P_0 + \frac{a\varphi^{1-n_1}}{b(1-n_1)} \left(\frac{R}{P_0}\right)^{1-n} [\ln R(1-n) + 1]}{1 + \frac{(1-n)a\varphi^{1-n_1}}{b(1-n_1)} \left(\frac{R}{P_0}\right)^{1-n}}. \quad (4.1.10)$$

Аналізуючи рівняння (4.1.10), при  $n \rightarrow 1$ , отримаємо

$$\ln P - \ln P_0 = \frac{\frac{a\varphi^{1-n_1}}{b(1-n_1)} \left(\frac{R}{P_0}\right)^{1-n}}{1}.$$

Остаточний вираз для визначення натягу ведучої гілки нитки буде мати вигляд

$$P = P_0 e^{\frac{a\varphi^{1-n_1}}{b(1-n_1)} \left(\frac{R}{P_0}\right)^{1-n}}. \quad (4.1.11)$$

Для випадку, коли коефіцієнт тертя є сталою величиною, враховуючи рівняння (4.1.2), при  $n_1 = 0$   $f = \frac{a}{b}$ , отримаємо з (4.1.11)

$$P = P_0 e^{f\varphi \left(\frac{R}{P_0}\right)^{1-n}}. \quad (4.1.12)$$

Тут необхідно вказати, що формула (4.1.12) відрізняється від формули, яка отримана в роботі [35]. Спрощення формули в роботі [5] призводить до невірних остаточних результатів. Покладаючи в формулі (4.1.12)  $n=1$ , отримаємо відому формулу Л.Ейлера

$$P = P_0 e^{f\varphi}.$$

На рис.4.1.3 представлені результати визначення натягу для капронової нитки 28 Т для  $P_0=5, 10, 15, 20$  сН по формулі (4.1.11). При розрахунках  $a=0,4$ ;  $b=2,7$ ;  $n=0,7$ ;  $n_1=0,8$ ;  $\varphi=3,14$ . На цьому рисунку наведені також експериментальні дані. Порівняння теоретичних та

експериментальних даних показало, що похибка не перевищує 2-4%. При розрахунку за формулою Л.Ейлера похибка перевищує 8%.

### **Отримання диференційних рівнянь, які описують рівновагу жорсткої на згин нитки на поверхні малої кривизни**

В роботі наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень по визначенню натягу жорсткої на згин нитки, яка взаємодіє з циліндричною напрямною поверхнею з урахуванням нелінійної залежності сили та коефіцієнту тертя. При проведенні досліджень використовувалися циліндричні напрямні поверхні, радіус кривизни яких був значно більшим радіуса нитки. Отримані рівняння для визначення натягу нитки використовувалися для удосконалення технологічних процесів текстильної промисловості.

Низька якість сировини, недосконалий ниткотракт технологічного устаткування при зростанні натягу по глибині заправки призводить до обривів. Прості технологічного устаткування, пов'язані з ліквідацією обривів, складають 75-80% від загального часу загальних простоїв [1, 2,3-13].

Відсутність фундаментальних досліджень в галузі вивчення взаємодії ниток з напрямними великої та малої кривизни з урахуванням змінання, жорсткості на згин ускладнює вирішення такої важливої задачі як удосконалення технологічних процесів ткацтва та трикотажного виробництва.

Значно скоротити кількість обривів можна шляхом використання якісної сировини та оптимізацією умов переробки ниток на технологічному устаткуванні, де має місце їх взаємодія з направляючими та робочими органами великої та малої кривизни. На даний момент відсутні теоретичні та експериментальні дослідження процесу взаємодії

ниток з напрямними поверхнями з урахуванням їх реальних фізико-механічних властивостей [2,3]. По першу чергу це стосується нелінійної залежності сили та коефіцієнта тертя, впливу жорсткості нитки на згин, її зминання в зоні контакту з напрямною поверхнею [2, 12].

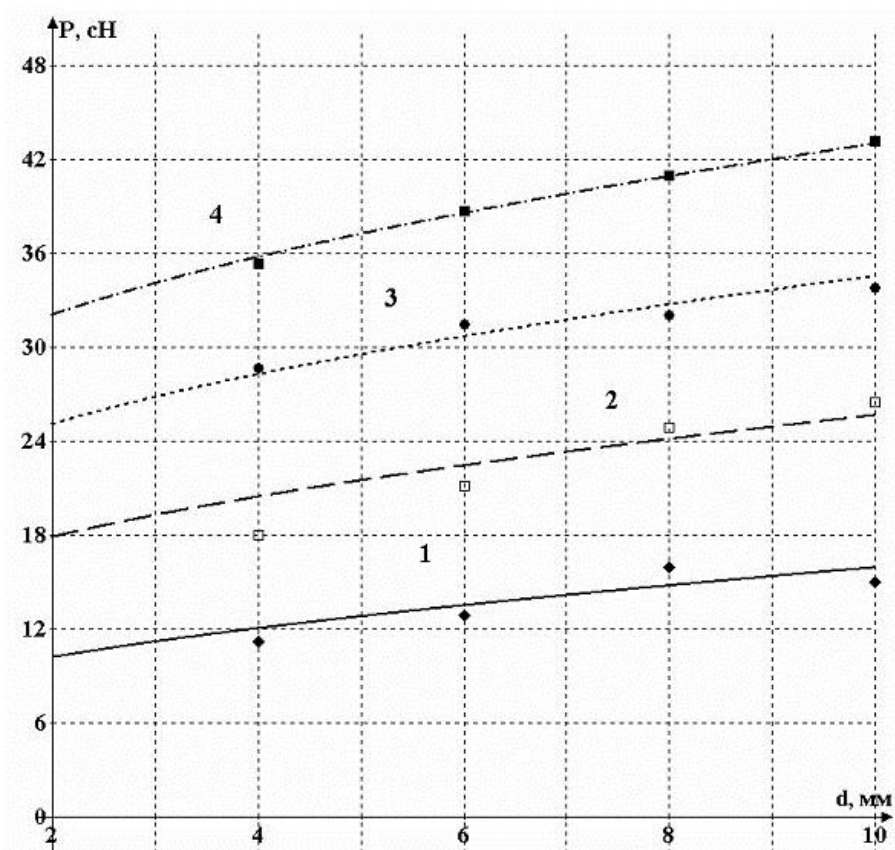


Рис.4.1.3. Залежність натягу капронової нитки 28 Т від радіуса кривизни циліндричної напрямної

Таким чином, метою даного дослідження є дослідження процесу взаємодії ниток з циліндричною напрямною з урахуванням реальних фізико-механічних властивостей та визначення натягу нитки після проходження нитконапрямних пристроїв.

На рис.4.1.4 представлена загальна розрахункова схема взаємодії жорсткої на вигин нитки з циліндричною напрямною поверхнею. Нитка огинає циліндричну напрямну радіуса  $R$ . Кут охоплення напрямної, при

відсутності жорсткості на вигин дорівнював би  $2\alpha = \pi = 180^\circ$  (вектори сил натягу ведучої  $P$  та веденої  $P_0$  гілок нитки мають бути спрямовані по дотичних в точках  $C$  і  $D$ ). Завдяки наявності жорсткості нитки на вигин реальний кут охоплення буде становити  $\varphi_p = 2\alpha - \gamma - \gamma_0$ , де  $\gamma, \gamma_0$  - кути (кути жорсткості) нахилу дотичних в точках  $O$  та  $O_1$  до вертикальної прямої (або вісі  $y$ ). Таким чином, необхідно визначити значення кутів  $\gamma, \gamma_0$ . Рівняння рівноваги пружної лінії запишемо у вигляді (див.рис.4.1.4)

$$\frac{y'' \left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{j(K)}}{(1 + y'^2)^{\frac{3}{2}}} = M, \quad M = P(x_A - x), \quad (4.1.13)$$

де  $\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{j(K)}$  - коефіцієнт жорсткості нитки на вигин;

$E$  - модуль пружності нитки на розтягнення;

$d_i$  - діаметри окремих елементарних волокон (філаментів), з яких складається комплексна нитка чи пряжа;

$w$  - кількість філаментів, з яких складається пряжа;

$j(K)$  - коефіцієнт, який залежить від крутки  $K$  нитки;

$y', y''$  - перша та друга похідна координати  $y$  по  $x$ ;

$M$  - згинаючий момент;

$P$  - натяг нитки;

$x_A$  - координата точки прикладання сили натягу  $P$ .

Проведені дослідження [1,2,37] показали, що коефіцієнт жорсткості на вигин залежить від крутки  $K$ .



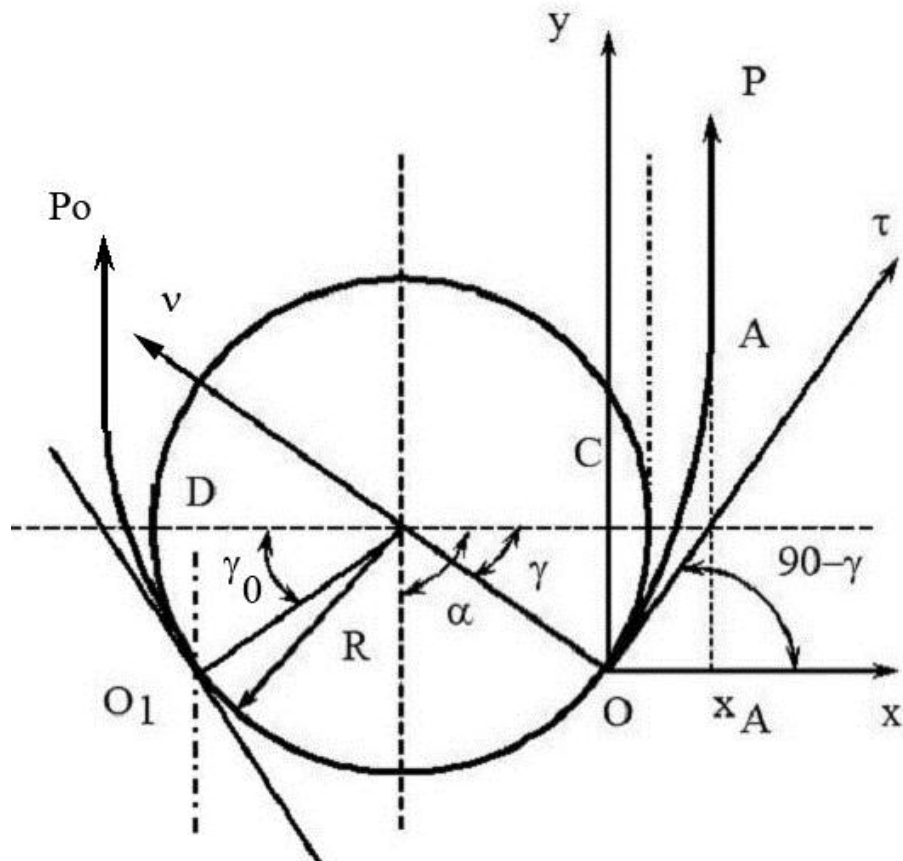


Рис.4.1.4. Загальна розрахункова схема

Вплив цього параметра оцінюється коефіцієнтом

$$j(K) = 1 + u_1 K^{u_2}, \quad (4.1.14)$$

де  $u_1, u_2$  - деякі постійні коефіцієнти.

При  $K \rightarrow 0$   $j(K) \rightarrow 1$  при  $K \rightarrow K_{кр}$ ,  $j(K) \rightarrow j(K_{кр})$ , де  $K_{кр}$  - критичне значення крутки. В останньому випадку коефіцієнт жорсткості нитки на вигин буде визначатися як у мононитки

$$B = EI = \frac{E\pi d^4}{64},$$

де  $d = 2r$  - розрахунковий діаметр нитки.

З урахуванням (4.1.14) диференційне рівняння (4.1.13) запишемо у вигляді

$$\frac{y'' \left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}{(1+y'^2)^{\frac{3}{2}}} = P(x_A - x). \quad (4.1.15)$$

Розділяємо в диференційному рівнянні (4.1.15) змінні і отримаємо

$$\frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})} d(y')}{(1+y'^2)^{\frac{3}{2}}} = P(x_A - x) dx.$$

Інтегруємо останнє диференційне рівняння

$$\int \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})} d(y')}{(1+y'^2)^{\frac{3}{2}}} = \int P(x_A - x) dx.$$

Отримаємо

$$\frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})} y'}{(1+y'^2)^{\frac{1}{2}}} = P(x_A x - \frac{x^2}{2}) + C,$$

де  $C$  - будь яка стала інтегрування.

Враховуючи що  $y' = tg \varphi$ , де  $\varphi$  - кут нахилу дотичної до вісі  $x$ , останнє диференційне рівняння можна представити у вигляді

$$\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})} \sin \varphi = P(x_A x - \frac{x^2}{2}) + C. \quad (4.1.16)$$

При  $x = 0, \varphi = 90 - \gamma$ . Тоді стала інтегрування визначається з виразу

$$C = \left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})} \sin(90 - \gamma), \quad C = \left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})} \cos \gamma.$$

Тоді рівняння (4.1.16) прийме вигляд

$$\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})} (\sin \varphi - \cos \gamma) = P(x_A x - \frac{x^2}{2}). \quad (4.1.17)$$

При  $x = x_A$ ,  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ . З урахуванням цього рівняння (4.1.17) представимо у вигляді

$$\cos \gamma = 1 - \frac{P x_A^2}{2 \left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}. \quad (4.1.18)$$

Значення координати  $x_A$  знайдемо з умови рівноваги моментів сил відносно точки  $O$

$$\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})} / (R+r) = P x_A, \Rightarrow x_A = \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}{P(R+r)}.$$

$$\cos \gamma = 1 - \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}{2P(R+r)^2}. \quad (4.1.19)$$

Аналогічний вивід рівняння для визначення кута  $\gamma_0$  дозволяє отримати наступний результат

$$\cos \gamma_0 = 1 - \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}{2P_0(R+r)^2}. \quad (4.1.20)$$

Використовуючи залежності (4.1.19) та (4.1.20) визначимо натяг нитки в точках  $O, O_1$

$$P_0 = P \cos \gamma = P \left[ 1 - \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}{2P(R+r)^2} \right], \quad P_{0_1} = P_0 \cos \gamma_0 = P_0 \left[ 1 - \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}{2P_0(R+r)^2} \right]. \quad (4.1.21)$$

Перейдемо до розгляду питання, яке спрямоване на визначення закону зміни натягу нитки на ділянці  $OO_1$ .

Нитка огинає циліндричну напрямну радіусу  $R$ . Вхідний натяг нитки дорівнює  $P_0$ , а вихідний натяг нитки дорівнює  $P$ . Кут охоплення ниткою циліндричної напрямної дорівнює  $\varphi_p = 2\alpha - \gamma - \gamma_0$ .

Система диференціальних рівнянь, що описує рівновагу нескінченно малого елемента нитки  $ds = R d\varphi$  ( $s$  - дугова координата) має вигляд [2,12]

$$\begin{aligned} \frac{dP}{ds} - \frac{Q}{(R+r)} - F_{mp} &= 0, & \frac{dQ}{ds} + \frac{P}{(R+r)} - N &= 0, \\ \frac{dM}{ds} + Q &= 0, & M &= \frac{\left(\frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4\right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}{(R+r)} = const, \end{aligned} \quad (4.1.22)$$

де  $P$  - натяг нитки;  $Q$  - перерізуюча сила;  $F_{mp}$  - сила тертя, яка діє на нескінченно малий елемент нитки;  $N$  - питома нормальна реакція напрямної поверхні.

Дослідження, проведені в цьому напрямку [1, 2,10, 12], свідчать про те, що сила та коефіцієнт тертя нелінійно залежать від попереднього натягу, кута охоплення ниткою напрямної, діаметра циліндричної напрямної [35]. Виходячи з цього силу тертя  $F_{mp}$  та коефіцієнт тертя  $f$  можна представити наступними залежностями

$$F_{mp} = fN^n, f = \frac{a}{b\varphi^{n_1}}, \quad (4.1.23)$$

де  $n, a, b, n_1$  - деякі константи, значення яких залежить від виду матеріалів нитки та напрямної та умов взаємодії між ними. Так значення  $n$  знаходиться в межах  $\frac{2}{3} \leq n \leq 1$  [10]. Коли  $n_1 = 0$ , то з другого рівняння

системи (4.1.23) коефіцієнт тертя буде дорівнювати  $f = \frac{a}{b}$ .

Враховуючи третє та четверте рівняння системи (4.1.22), а також (4.1.23), представимо систему диференціальних рівнянь (4.1.22) у вигляді

$$\frac{dP}{(R+r)d\varphi} = \frac{aP^n}{b\varphi^{n_1}(R+r)^n}. \quad (4.1.24)$$

Розділяємо в диференційному рівнянні (4.1.24) змінні і отримаємо наступне диференційне рівняння

$$\frac{dP}{P^n} = \frac{a(R+r)d\varphi}{b\varphi^{n_1}(R+r)^n}.$$

Проінтегруємо останнє диференційне рівняння

$$\int_{P_{0_1}}^{P_0} P^{-n} dP = \frac{a}{b(R+r)^{n-1}} \int_0^{\varphi_p} \varphi^{-n_1} d\varphi, \quad (4.1.25)$$

або

$$\frac{1}{1-n} P^{1-n} \Big|_{P_{0_1}}^{P_0} = \frac{a\varphi^{1-n_1}}{b(R+r)^{n-1}(1-n_1)} \Big|_0^{\varphi_p}.$$

Підставляємо верхнє та нижнє значення параметрів визначених інтегралів та отримуємо

$$P_0^{1-n} - P_{0_1}^{1-n} = \frac{(1-n)a}{b(R+r)^{n-1}(1-n_1)} \varphi_p^{1-n_1}.$$

В остаточному вигляді отримаємо формулу для визначення натягу ведучої гілки нитки

$$P_0^{1-n} = P_{0_1}^{1-n} + \frac{(1-n)a(R+r)^{1-n}}{b(1-n_1)} \varphi_p^{1-n_1}. \quad (4.1.26)$$

### **Визначення натягу нитки жорсткої на згин з урахуванням нелінійної залежності сили та коефіцієнта тертя**

Перейдемо до аналізу рівняння (4.1.26). Прологарифмуємо його ліву та праву частини

$$(1-n)\ln P_0 = \ln \left[ P_{0_1}^{1-n} + \frac{(1-n)a(R+r)^{1-n}}{b(1-n_1)} \varphi_p^{1-n_1} \right],$$

або

$$\ln P_0 = \frac{\ln \left[ P_{0_1}^{1-n} + \frac{(1-n)a(R+r)^{1-n}}{b(1-n_1)} \varphi_p^{1-n_1} \right]}{(1-n)}.$$

Визначимо значення натягу ведучої гілки нитки для чого перейдемо в останньому рівнянні до границі при  $n \rightarrow 1$

$$\lim_{n \rightarrow 1} \ln P_0 = \lim_{n \rightarrow 1} \frac{\ln \left[ P_{0_1}^{1-n} + \frac{(1-n)a(R+r)^{1-n}}{b(1-n_1)} \varphi_p^{1-n_1} \right]}{(1-n)}. \quad (4.1.27)$$

Використовуючи правило Лопітала будемо мати

$$\lim_{n \rightarrow 1} \ln P_0 = \lim_{n \rightarrow 1} \frac{\ln \left[ P_{0_1}^{1-n} + \frac{(1-n)a(R+r)^{1-n}}{b(1-n_1)} \varphi_p^{1-n_1} \right]}{(1-n)} = \lim_{n \rightarrow 1} \frac{F_1}{F_2},$$

$$F_1 = \frac{d}{dn} \left\{ \ln \left[ P_{0_1}^{1-n} + \frac{(1-n)a(R+r)^{1-n}}{b(1-n_1)} \varphi_p^{1-n_1} \right] \right\}, \quad (4.1.28)$$

$$F_2 = \frac{d}{dn} (1-n) = -1.$$

Знайдемо значення функції  $F_1$  для чого визначимо значення відповідної похідної

$$F_1 = \frac{-P_{0_1}^{1-n} \ln P_{0_1} - \frac{a\varphi_p^{1-n_1}(R+r)^{1-n} \ln(R+r)}{b(1-n_1)} - \frac{a\varphi_p^{1-n_1}(R+r)^{1-n}}{b(1-n_1)} + \frac{a\varphi_p^{1-n_1}n(R+r)^{1-n} \ln(R+r)}{b(1-n_1)}}{P_{0_1}^{1-n} + \frac{(1-n)a(R+r)^{1-n}}{b(1-n_1)} \varphi_p^{1-n_1}}. \quad (4.1.29)$$

Підставляємо рівняння (4.1.29) та третє рівняння системи (4.1.28) в перше рівняння системи (4.1.28), отримаємо

$$\lim_{n \rightarrow 1} \frac{F_1}{F_2} = \frac{P_{0_1}^{1-n} \ln P_{0_1} + \frac{a\varphi_p^{1-n_1}(R+r)^{1-n} \ln(R+r)}{b(1-n_1)} + \frac{a\varphi_p^{1-n_1}(R+r)^{1-n}}{b(1-n_1)} - \frac{a\varphi_p^{1-n_1}n(R+r)^{1-n} \ln(R+r)}{b(1-n_1)}}{P_{0_1}^{1-n} + \frac{(1-n)a(R+r)^{1-n}}{b(1-n_1)} \varphi_p^{1-n_1}}. \quad (4.1.30)$$

Після підстановки (4.1.30) в перше рівняння системи (4.1.28), перетворимо його у вигляд

$$\ln P_0 = \lim_{n \rightarrow 1} \frac{F_1}{F_2} = \frac{P_{0_1}^{1-n} \left[ \ln P_{0_1} + \frac{a\varphi_p^{1-n_1} \ln(R+r)}{b(1-n_1)} \left( \frac{(R+r)}{P_{0_1}} \right)^{1-n} + \frac{a\varphi_p^{1-n_1}}{b(1-n_1)} \left( \frac{(R+r)}{P_{0_1}} \right)^{1-n} - \frac{a\varphi_p^{1-n_1} n \ln(R+r)}{b(1-n_1)} \left( \frac{(R+r)}{P_{0_1}} \right)^{1-n} \right]}{P_{0_1}^{1-n} \left[ 1 + \frac{(1-n)a\varphi_p^{1-n_1}}{b(1-n_1)} \left( \frac{(R+r)}{P_{0_1}} \right)^{1-n} \right]}$$

Спростимо останнє рівняння, отримаємо

$$\ln P_0 = \frac{\ln P_{0_1} + \frac{a\varphi_p^{1-n_1}}{b(1-n_1)} \left( \frac{(R+r)}{P_{0_1}} \right)^{1-n} [\ln(R+r)(1-n) + 1]}{1 + \frac{(1-n)a\varphi_p^{1-n_1}}{b(1-n_1)} \left( \frac{(R+r)}{P_{0_1}} \right)^{1-n}}. \quad (4.1.31)$$

Аналізуючи рівняння (4.1.31), при  $n \rightarrow 1$ , отримаємо

$$\ln P_0 - \ln P_{0_1} = \frac{\frac{a\varphi_p^{1-n_1}}{b(1-n_1)} \left( \frac{(R+r)}{P_{0_1}} \right)^{1-n}}{1}.$$

Остаточний вираз для визначення натягу ведучої гілки нитки в точці O буде мати вигляд

$$P_0 = P_{0_1} e^{\frac{a\varphi_p^{1-n_1}}{b(1-n_1)} \left( \frac{(R+r)}{P_{0_1}} \right)^{1-n}}. \quad (4.1.32)$$

Для випадку, коли коефіцієнт тертя є сталою величиною, враховуючи рівняння (4.1.23), при  $n_1 = 0$   $f = \frac{a}{b}$ , отримаємо з (4.1.32)

$$P_0 = P_{0_1} e^{f\varphi_p \left( \frac{(R+r)}{P_{0_1}} \right)^{1-n}}. \quad (4.1.33)$$

Тут необхідно вказати, що формула (4.1.33) відрізняється від формули, що отримана в роботі [10]. Спрощення формули в роботі [10, 13] призводить до невірних остаточних результатів. Покладаючи в формулі (4.1.33)  $n = 1$ , отримаємо відому формулу Л.Ейлера.

$$P_0 = P_{0_1} e^{f\varphi}.$$

Підставляючи результати системи (4.1.21) в (4.1.32) отримаємо наступний вираз

$$P \left[ 1 - \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}{2P(R+r)^2} \right] = P_0 \left[ 1 - \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}{2P_0(R+r)^2} \right] e^{\frac{a\varphi_p^{1-n_1}}{b(1-n_1)} \left( \frac{(R+r)}{P_0 \left[ 1 - \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}{2P_0(R+r)^2} \right]} \right)^{1-n}}$$

В остаточному вигляді будемо мати

$$P = P_0 e^{\frac{a\varphi_p^{1-n_1}}{b(1-n_1)} \left( \frac{(R+r)}{P_0 \left[ 1 - \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}{2P_0(R+r)^2} \right]} \right)^{1-n}} + \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}{2(R+r)^2} (1 - e^{\frac{a\varphi_p^{1-n_1}}{b(1-n_1)} \left( \frac{(R+r)}{P_0 \left[ 1 - \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}{2P_0(R+r)^2} \right]} \right)^{1-n}}).$$

Коли в останньому рівнянні знехтувати поперечними розмірами перетину нитки ( $r=0$ ), а також вважати, що нитка має крутку  $K \rightarrow K_{kp}$ ,  $j(K) \rightarrow j(K_{kp})$  та

$$\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})} = EI, \quad I = \frac{\pi d^4}{64},$$

для жорсткої на вигин нитки отримаємо наступне рівняння

$$P = P_0 e^{\frac{a\varphi_p^{1-n_1}}{b(1-n_1)} \left[ \frac{R}{P_0 \left( 1 - \frac{EI}{2R^2} \right)} \right]^{1-n}} + \frac{EI}{2R^2} (1 - e^{\frac{a\varphi_p^{1-n_1}}{b(1-n_1)} \left[ \frac{R}{P_0 \left( 1 - \frac{EI}{2R^2} \right)} \right]^{1-n}}). \quad (4.1.34)$$

Для випадку, коли можна знехтувати нелінійною залежністю сили та коефіцієнта тертя ( $n=1, n_1=0$ ) отримаємо рівняння для визначення натягу жорсткої на вигин нитки

$$P = P_0 e^{f\varphi_p} + \frac{EI}{2R^2} (1 - e^{f\varphi_p}). \quad (4.1.35)$$



Цей результат збігається з результатами наведеними в роботах [1-2,35-37].  
У випадку, коли можна вважати нитку абсолютно гнучкою ( $EI = 0$ )  
отримаємо класичну формулу Л.Ейлера

$$P = P_0 e^{f\varphi}.$$

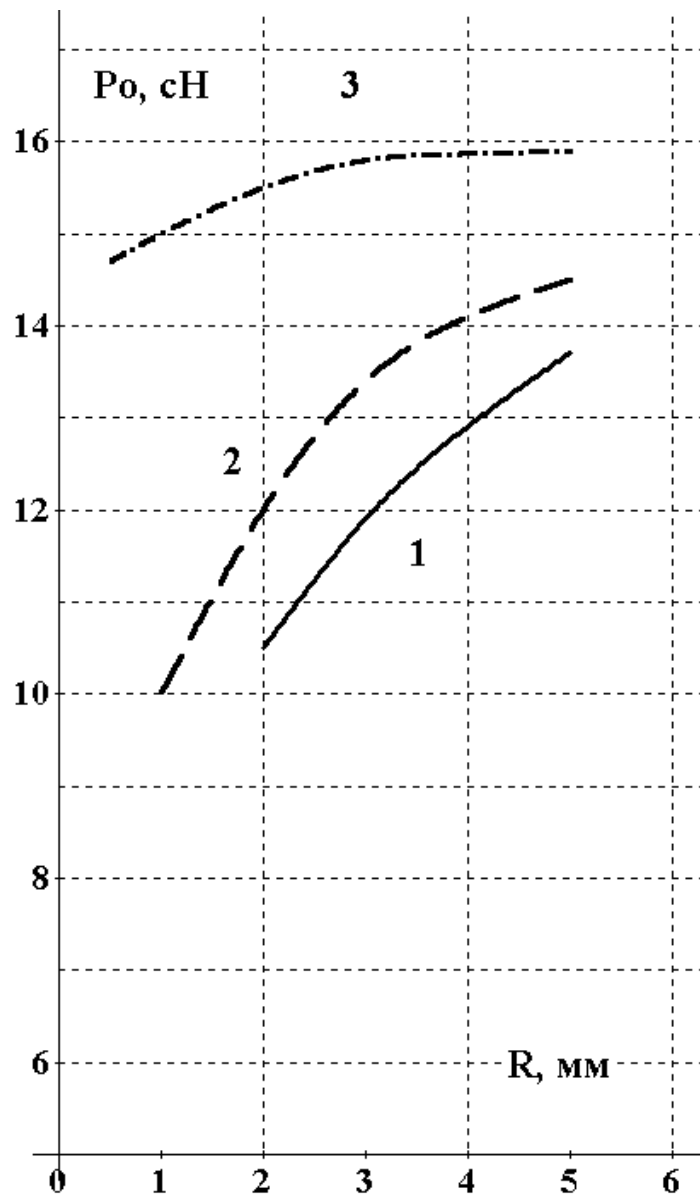


Рис.4.1.4. Розрахунок натягу ведучої гілки нитки

На рис.4.1.5 представлені результати розрахунку натягу ведучої гілки: 1 – капронова монопітка 52 Т(1 крива),  $B = 53,7 \text{ cH} \cdot \text{мм}^2$ ,  $P_0 = 10 \text{ cH}$ ,  $r = 0,12 \text{ мм}$ ,  $R = 0,5 \dots 5 \text{ мм}$ ,  $\varphi_p = 3,14 \text{ рад}$ ,  $n = 0,85$ ,  $n_1 = 0,15$ ; 2 – капронова

мононитка 36 Т(2 крива),  $B=21,9\text{сН}\cdot\text{мм}^2$ ,  $P_0=10\text{ сН}$ ,  $r=0,1\text{ мм}$ ,  $R=0,5\dots5\text{ мм}$ ,  $\varphi_p=3,14\text{ рад}$ ,  $n=0,85$ ,  $n_1=0,15$ ; 3 – капронова комплексна нитка 28 Т(3 крива),  $B=0,22\text{сН}\cdot\text{мм}^2$ ,  $P_0=10\text{ сН}$ ,  $r=0,1\text{ мм}$ ,  $R=0,5\dots5\text{ мм}$ ,  $\varphi_p=3,14\text{ рад}$ ,  $n=0,85$ ,  $n_1=0,14$ . Аналіз отриманих результатів показав, що для 1 мононитки реальний кут охоплення напрямної найменший з обраних варіантів. При натязі веденої гілки нитки в 10 сН, мононитка 1 в недостатній мірі охоплює напрямну. Для 3 нитки (капронової комплексної), коефіцієнт жорсткості на вигин на порядок менше ніж у монониток, тому реальний кут охоплення буде найбільшим, а відповідно і натяг.

#### **4.2.ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ КОМПЛЕКСНИХ НИТОК І ПРЯЖІ З ЦИЛІНДРИЧНОЮ НАПРЯМНОЮ ПОВЕРХНЕЮ**

Взаємодія ниток з циліндричними напрямними поверхнями зустрічається в багатьох технологічних процесах текстильної та трикотажної промисловості. У більшості випадків має місце взаємодія нитки з циліндричною направляючою великої кривизни. Такий вид взаємодії вимагає, при виведенні основних рівнянь, враховувати мнучкість і жорсткість нитки на вигин. Врахування реальних фізико-механічних показників властивостей нитки дозволить отримати рівняння для визначення натягу і форми осі, які можна використовувати при удосконаленні технологічних процесів.

Удосконалення технологічних процесів легкої і текстильної промисловості має базуватися на комплексних дослідженнях процесу взаємодії ниток з напрямними поверхнями великої кривизни з урахуванням їх реальних фізико-механічних

характеристик [1-13,22-37]. Отримання теоретичних залежностей дозволить скласти рівняння для визначення натягу нитки в зоні формування тканини і трикотажу, зменшити відсоток обривів ниток, поліпшити якість готової продукції [35,58]. У багатьох дослідженнях не враховуються реальні фізико-механічні властивості і нелінійна залежність сили і коефіцієнта тертя при отриманні остаточних рівнянь [1-14]. Все це призводить до значних розбіжностей між теоретичними та експериментальними залежностями, що не дозволяє використовувати перші при конкретних розрахунках.

Основним завданням є те, щоб шляхом інтегрування системи диференціальних рівнянь одержати залежності натягу нитки, з урахуванням мнучкості в зоні контакту, жорсткості на вигин і нелінійної залежності сили і коефіцієнта тертя, від радіуса кривизни циліндричної напрямної, початкового натягу і кута охоплення ниткою направляючої поверхні.

Теоретичні дослідження процесу взаємодії ниток з циліндричними нитконапрямними пристроями з урахуванням мнучкості, жорсткості на вигин і нелінійної залежності сили і коефіцієнта тертя ставлять перед собою завдання визначення натягу ниток в довільній точці, рішення якого дозволить удосконалити процес їх переробки на технологічному обладнанні.

**Визначення впливу мнучкості і жорсткості на вигин на натяг нитки при її взаємодії з циліндричною направляючою**

На рис. 4.2.1 показана загальна розрахункова схема. Нитка огинає циліндричну направляючу поверхню радіуса  $R$ . Вхідний натяг нитки дорівнює  $P_0$ , а вихідний натяг нитки дорівнює  $P$ . Кут охоплення ниткою циліндричної направляючої дорівнює  $\varphi = \varphi_P + \varphi_{см1} + \varphi_{см2} - \varphi_{уж1} - \varphi_{уж2}$ , де  $\varphi_P$  - кут охоплення ниткою циліндричної направляючої без урахування мнучкості і жорсткості на вигин (на рис.4.2.1  $\varphi_P = \pi$ );  $\varphi_{см1}, \varphi_{см2}$  - кути, на які збільшується кут охоплення  $\varphi_P$  за рахунок деформації зминання в зоні контакту нитки з направляючою;  $\varphi_{уж1}, \varphi_{уж2}$  - кути, на які зменшується кут охоплення  $\varphi_P$  за рахунок наявності жорсткості нитки на згин [10].

Пошук взаємозв'язку між натягом ведучої  $P$  и веденої гілки нитки необхідно починати з встановлення залежності між натягом в точці  $P_A$  і натягом в точці  $P_B$ . На цих ділянках вільні гілки нитки підпорядковуються законам пружних на вигин одномірних об'єктів. Зв'язок між натягом в цих точках має вид [12, 35-37]

$$P_A = P_0 \left[ 1 - \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}{2P_0 [R+r(1-\delta_0)]^2} \right],$$

$$P_B = P \left[ 1 - \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}{2P [R+r(1-\delta)]^2} \right],$$
(4.2.1)

де  $\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{j(K)}$  - коефіцієнт жорсткості нитки на згин;

$E$  - модуль пружності нитки на розтягнення;

$d_i$  - діаметр окремого елементарного волокна (філаменту), з яких складається комплексна нитка або пряжа;

$w$  - кількість філаментів, з яких складається пряжа;

$j(K) = 1 + u_1 K^{u_2}$ , - коефіцієнт, який залежить від крутки нитки;

$\delta, \delta_0$  - відносна деформація поперечного перерізу нитки в точках її сходу и входу на напрямну;

$u_1, u_2$  - деякі сталі коефіцієнти.

При  $K \rightarrow 0$   $j(K) \rightarrow 1$  при,  $K \rightarrow K_{KP}$ ,  $j(K) \rightarrow J(K_{KP})$  де  $K_{KP}$ - критичне значення крутки. В останньому випадку коефіцієнт жорсткості нитки на вигин буде визначатися як у мононитки

$$B_0 = EI = \frac{E\pi d^4}{64},$$

де  $d = 2r$  - розрахунковий діаметр нитки.

Перейдемо до визначення взаємозв'язку між натягом нитки в точках А і В. На цій ділянці нитка буде взаємодіяти з циліндричною напрямною поверхнею.

Система диференційних рівнянь, яка описує рівновагу безкінечно малого елемента нитки  $ds = (R+r)d\varphi$  ( $s$ - дугова координата) має вигляд [1,35,37]

$$\frac{dP}{ds} = F_{mp}, \quad \frac{P}{[R + r(1 - \delta)]} = N, \quad N = bE_1\delta, \quad (4.2.2)$$

где  $P$  - натяг нитки;

$F_{mp}$  - сила тертя, яка діє на безкінечно малий елемент нитки;

$N$  - питома нормальна реакція напрямної поверхні;

$s$  - дугова координата;

$b$  - ширина сліду контакту нитки з напрямною поверхнею;

$E_1$  - модуль пружності нитки при зтисканні [10] .

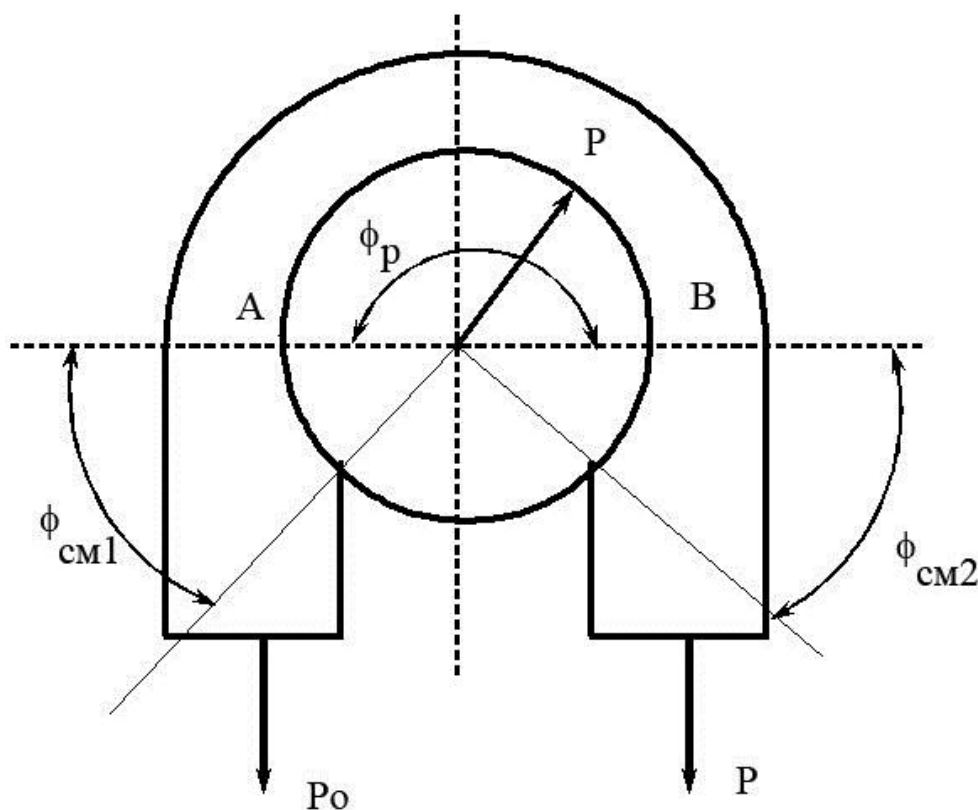


Рис.4.2.1. Загальна розрахункова схема

Дослідження, проведені в цьому напрямку [1-13], свідчать про те, що сила і коефіцієнт тертя нелінійно залежать від попереднього натягу, кута охоплення ниткою направляючої, діаметра циліндричної направляючої [1-10] Виходячи з цього силу тертя і коефіцієнт тертя  $f$  можна представити наступними залежностями

$$\begin{aligned} F_{mp} &= fN^n, \\ f &= \frac{a}{b\varphi^{n_1}}, \end{aligned} \quad (4.2.3)$$

де  $-a, b, n, n_1$  деякі константи, значення яких залежить від виду матеріалів нитки і напрямної та умов взаємодії між ними. Так значення  $n$  знаходиться в межах  $\frac{2}{3} \leq n \leq 1$  [10]. При  $n_1 \rightarrow 0$ , з другого рівняння системи (4.2.3), визначимо коефіцієнт тертя, який буде дорівнювати  $f = \frac{a}{b}$ .

З системи (4.2.2) виключимо значення питомої нормальної реакції

$$\frac{P}{[R + r(1 - \delta)]} = bE_1 \delta. \quad (4.2.4)$$

Підставляємо (4.2.4) в перше рівняння системи (4.2.2), з урахуванням (4.2.3), отримаємо

$$\frac{d}{ds} \{ [R + r(1 - \delta)] bE_1 \delta \} = \frac{a}{b\varphi^{n_1}} (bE_1)^n (\delta)^n.$$

Розкриваємо ліву частинину останнього рівняння

$$bE_1 \frac{d\delta}{ds} R + bE_1 \frac{d\delta}{ds} r - 2bE_1 \delta \left( \frac{d\delta}{ds} \right) = \frac{a}{b\varphi^{n_1}} (bE_1)^n (\delta)^n.$$

Нехтуючи в останньому виразі добутками і квадратами малих величин, будемо мати

$$(R + r) \frac{d\delta}{ds} = \frac{a}{b\varphi^{n_1}} (bE_1)^{n-1} (\delta)^n.$$

Розділяємо в диференційному рівнянні змінні і отримаємо наступне диференційне рівняння

$$\frac{d\delta}{(\delta)^n} = \frac{a(bE_1)^{n-1} d\varphi}{b\varphi^{n_1}}.$$

Проінтегруємо останнє диференційне рівняння

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (\delta)^{-n} d\delta = \frac{a(bE_1)^{n-1}}{b} \int_0^{\varphi} \varphi^{-n_1} d\varphi, \quad (4.2.5)$$

або

$$\frac{1}{1-n} (\delta)^{1-n} \Big|_{\delta_0}^{\delta} = \frac{a(bE_1)^{n-1} \varphi^{1-n_1}}{b(1-n_1)} \Big|_0^{\varphi}.$$

Підставляємо верхнє і нижнє значення параметрів визначених інтегралів і отримуємо

$$(\delta)^{1-n} - (\delta_0)^{1-n} = \frac{(1-n)a(bE_1)^{n-1}}{b(1-n_1)} \varphi^{1-n_1}.$$

В кінцевому вигляді отримаємо формулу

$$(\delta)^{1-n} = (\delta_0)^{1-n} + \frac{(1-n)a(bE_1)^{n-1}}{b(1-n_1)} \varphi^{1-n_1}. \quad (4.2.6)$$

Перейдемо до аналізу рівняння (4.2.6). Прологарифмуємо його ліву і праву частини

$$(1-n)\ln(\delta) = \ln\left[(\delta_0)^{1-n} + \frac{(1-n)a(bE_1)^{n-1}}{b(1-n_1)} \varphi^{1-n_1}\right].$$

або

$$\ln(\delta) = \frac{\ln\left[(\delta_0)^{1-n} + \frac{(1-n)a(bE_1)^{n-1}}{b(1-n_1)} \varphi^{1-n_1}\right]}{(1-n)}.$$

Визначимо швидкість зміни відносної деформації, для чого перейдемо в останньому рівнянні до межі

$$\lim_{n \rightarrow 1} \ln(\delta) = \lim_{n \rightarrow 1} \frac{\ln\left[(\delta_0)^{1-n} + \frac{(1-n)a(bE_1)^{n-1}}{b(1-n_1)} \varphi^{1-n_1}\right]}{(1-n)}. \quad (4.2.7)$$

Використовуючи правило Лопітала будемо мати

$$\lim_{n \rightarrow 1} \ln(\delta) = \lim_{n \rightarrow 1} \frac{\ln\left[(\delta_0)^{1-n} + \frac{(1-n)a(bE_1)^{n-1}}{b(1-n_1)} \varphi^{1-n_1}\right]}{(1-n)} = \lim_{n \rightarrow 1} \frac{F_1}{F_2}, \quad (4.2.8)$$

$$F_1 = \frac{d}{dn} \left\{ \ln\left[(\delta_0)^{1-n} + \frac{(1-n)a(bE_1)^{n-1}}{b(1-n_1)} \varphi^{1-n_1}\right] \right\},$$

$$F_2 = \frac{d}{dn}(1-n) = -1.$$

Після перетворень, отримаємо



$$\lim_{n \rightarrow 1} \frac{F_1}{F_2} = \frac{(\delta_0)^{1-n} \ln(\delta_0) - \frac{a\varphi^{1-n_1} (bE_1)^{n-1} \ln bE_1}{b(1-n_1)} + \frac{a\varphi^{1-n_1} (bE_1)^{n-1}}{b(1-n_1)} + \frac{a\varphi^{1-n_1} n (bE_1)^{n-1} \ln bE_1}{b(1-n_1)}}{(\delta_0)^{1-n} + \frac{(1-n)a(bE_1)^{n-1}}{b(1-n_1)} \varphi^{1-n_1}} \quad (4.2.9)$$

Після підстановки (4.2.9) в перше рівняння системи (4.2.8), перетворимо його до вигляду

$$\ln(\delta) = \lim_{n \rightarrow 1} \frac{F_1}{F_2} = \frac{(\delta_0)^{1-n} \left[ \ln(\delta_0) - \frac{a\varphi^{1-n_1} \ln bE_1}{b(1-n_1) [bE_1(\delta_0)]^{1-n}} + \frac{a\varphi^{1-n_1}}{b(1-n_1) [bE_1(\delta_0)]^{1-n}} + \frac{a\varphi^{1-n_1} n \ln bE_1}{b(1-n_1) [bE_1(\delta_0)]^{1-n}} \right]}{(\delta_0)^{1-n} \left[ 1 + \frac{(1-n)a\varphi^{1-n_1}}{b(1-n_1) [bE_1(\delta_0)]^{1-n}} \right]}$$

Спростимо останнє рівняння, отримаємо

$$\ln(\delta) = \frac{\ln(\delta_0) + \frac{a\varphi^{1-n_1}}{b(1-n_1) [bE_1(\delta_0)]^{1-n}} [1 - \ln bE_1(1-n)]}{1 + \frac{(1-n)a\varphi^{1-n_1}}{b(1-n_1) [bE_1(\delta_0)]^{1-n}}} \quad (4.2.10)$$

Аналізуючи рівняння (4.2.10), при  $n \rightarrow 1$ , отримаємо

$$\ln(\delta) - \ln(\delta_0) = \frac{a\varphi^{1-n_1}}{b(1-n_1) [bE_1(\delta_0)]^{1-n}}$$

Остаточний вираз для визначення натягу ведучої гілки нитки буде мати вид

$$\delta = \delta_0 e^{\frac{a\varphi^{1-n_1}}{b(1-n_1) [bE_1(\delta_0)]^{1-n}}} \quad (4.2.11)$$

Для випадку, коли коефіцієнт тертя є сталою величиною, враховуючи рівняння (4.2.3), при  $n_1 = 0$   $f = \frac{a}{b}$ , отримаємо з (4.2.11)

$$\delta = \delta_0 e^{\frac{f\varphi}{[bE_1(\delta_0)]^{1-n}}} \quad (4.2.12)$$

Перетворимо останнє рівняння (4.2.12), враховуючи

$$\delta_0 = \frac{P_A}{bE_1[R+r(1-\delta_0)]} \quad (4.2.13)$$

Тоді рівняння (4.2.12) приймає вигляд

$$\delta = \delta_0 e^{f\varphi \left( \frac{R+r(1-\delta_0)}{P_A} \right)^{1-n}} \quad (4.2.14)$$

При  $n=1$ , отримаємо

$$\delta = \delta_0 e^{f\varphi} \quad (4.2.15)$$

Підставляємо (4.2.15) в перше рівняння системи (4.2.2), з урахуванням першого рівняння системи (4.2.3), будемо мати

$$\frac{dP}{ds} = f(bE_1)^n (\delta_0)^n e^{f\varphi n}$$

Розділяємо в останньому диференційному рівнянні змінні і інтегруємо

$$\int_{P_A}^{P_B} dP = f(bE_1)^n (\delta_0)^n (R+r) \int_0^{\varphi} e^{f\varphi n} d\varphi$$

Отримаємо

$$P_B - P_A = \frac{P_A^n (R+r)}{n[R+r(1-\delta_0)]^n} e^{fn\varphi} - \frac{P_A^n (R+r)}{n[R+r(1-\delta_0)]^n}$$

В кінцевому вигляді, отримаємо

$$P_B = P_A \left[ 1 + \frac{P_A^{n-1} (R+r)}{n[R+r(1-\delta_0)]^n} (e^{fn\varphi} - 1) \right] \quad (4.2.16)$$

При

$$P_B = P_A \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} (e^{f\varphi} - 1) \right]. \quad (4.2.17)$$

Вирішуємо (4.2.17) разом з системою рівнянь (4.2.1), тоді

$$P \left[ 1 - \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}{2P[R+r(1-\delta)]^2} \right] = P_0 \left[ 1 - \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}{2P_0[R+r(1-\delta_0)]^2} \right] \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} (e^{f\varphi} - 1) \right].$$

В кінцевому вигляді будемо мати

$$P = P_0 \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} (e^{f\varphi} - 1) \right] + \left[ \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}{2[R+r(1-\delta)]^2} - \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}{2[R+r(1-\delta_0)]^2} \right] \times \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} (e^{f\varphi} - 1) \right]. \quad (4.2.18)$$

Кут  $\varphi = \varphi_P + \varphi_{cM1} + \varphi_{cM2} - \varphi_{u\lambda 1} - \varphi_{u\lambda 2}$ , можна розраховувати з використанням формул [1-12,10, 35-37]

$$\begin{aligned} \varphi_{cM1} &= \arccos \left[ 1 - \delta_0 \left( \frac{2r}{R} \right)^2 \right], & \varphi_{cM2} &= \arccos \left[ 1 - \delta \left( \frac{2r}{R} \right)^2 \right], \\ \varphi_{u\lambda 1} &= \arccos \left[ 1 - \frac{B}{2P_0(R+r)^2} \right], & \varphi_{u\lambda 2} &= \arccos \left[ 1 - \frac{B}{2P(R+r)^2} \right]. \end{aligned} \quad (4.2.19)$$

При  $K \rightarrow 0$   $j(K) \rightarrow 1$ , при  $K \rightarrow K_{KP}$ ,  $j(K) \rightarrow J(K_{KP})$  де  $K_{KP}$ - критичне значення скрутки. В останньому випадку коефіцієнт жорсткості нитки на вигин буде визначатися як для мононитки  $B_0 = EI = E\pi d^4 / 64$ . Тоді рівняння (4.2.18) прийме вид

$$P = P_0 \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} (e^{f\varphi} - 1) \right] + \frac{B_0}{2[R+r(1-\delta)]^2} - \frac{B_0}{2[R+r(1-\delta_0)]^2} \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} (e^{f\varphi} - 1) \right]. \quad (4.2.20)$$

Для нитки, коефіцієнтом жорсткості на вигин котрої можна знехтувати, отримаємо

$$P = P_0 \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} (e^{f\varphi} - 1) \right]. \quad (4.2.21)$$

Для ідеальної гнучкої нитки, коли  $\delta_0 = 0$ , отримаємо відому формулу Л.Ейлера

$$P = P_0 e^{f\varphi}.$$

Рівняння (4.2.18) необхідно розв'язувати з використанням систем (4.2.2), (4.2.19). Отримана залежність представляє трансцендентне рівняння відносно  $P$ . Для його вирішення використовувались чисельні методи з застосуванням метода дихотомії. Для цього було розроблене спеціальне програмне забезпечення.

На рис.4.2.2 представлені графічні залежності натягу ведучої гілки нитки  $P$  для: капронової мононитки 36 Т(2 крива),  $B=21,9\text{сН}\cdot\text{мм}^2$ ,  $P_0=10\text{ сН}$ ,  $r=0,1\text{ мм}$ ,  $R=0,5\dots 10\text{ мм}$ ,  $\varphi_p=3,14\text{ рад}$ ,  $n=0,85$ ; капронової комплексної нитки 28 Т(1 крива),  $B=0,22\text{сН}\cdot\text{мм}^2$ ,  $P_0=10\text{ сН}$ ,  $r=0,1\text{ мм}$ ,  $R=0,5\dots 10\text{ мм}$ ,  $\varphi_p=3,14\text{ рад}$ ,  $n=0,84$ .

Крива 3, яка є асимптотою для залежностей 1 і 2, побудована по формулі Л.Ейлера без урахування жорсткості нитки на вигин і зминання. Аналіз графічних залежностей показує, що для капронових ниток однакового діаметра ( $r=0,1\text{ мм}$ ) характер зміни натягу суттєво

відрізняється. Так для капронової комплексної нитки 28 Т (крива 1) натяг плавно зменшується. Після значення  $r=0,4$  мм бачимо різке зростання натягу. Це пов'язано із зростанням кута охоплення ниткою напрямної за рахунок мнучкості поверхні нитки в зоні контакту з напрямною.

Для капронової мононитки 36 Т можна спостерігати протилежну картину (крива 2). Натяг нитки буде зростати з ростом величини радіуса кривизни циліндричної направляючої поверхні. Це пов'язано зі зменшенням кута охоплення ниткою направляючої поверхні. У результаті розрахунків було встановлено, що реальний контакт по деякій дузі буде існувати тільки при  $r \geq 1$  мм. На ділянці, коли  $r < 1$  мм фактичний контакт між ниткою і циліндричною направляючою буде здійснюватися в точці. Таким чином, при збільшенні радіуса кривизни направляючої лінії 1 і 2 будуть наближатися до кривої 3, яка характеризує класичну залежність Л.Ейлера. З цього випливає, що для більшості напрямних поверхонь технологічного обладнання текстильної та трикотажної промисловості, коли радіус поперечного перерізу нитки є порівняним з радіусом кривизни циліндричної напрямної поверхні, необхідно враховувати як структуру нитки так і її реальні фізико-механічні характеристики.

**Розробка програмного забезпечення для визначення натягу нитки, коефіцієнта жорсткості на вигин оптимального радіуса кривизни направляючої**

Перейдемо до опису алгоритму для визначення натягу нитки, коефіцієнта жорсткості на вигин оптимального радіуса кривизни напрямної, які приводяться до вигляду  $F(x)=0$  [1,10]. Для чисельного визначення коренів трансцендентного рівняння будемо використовувати метод дихотомії (половинного ділення відрізка) [2]. Даний метод хороший тим, що при будь-якій ширині відрізка  $[a,b]$  збіжність процесу є гарантована.

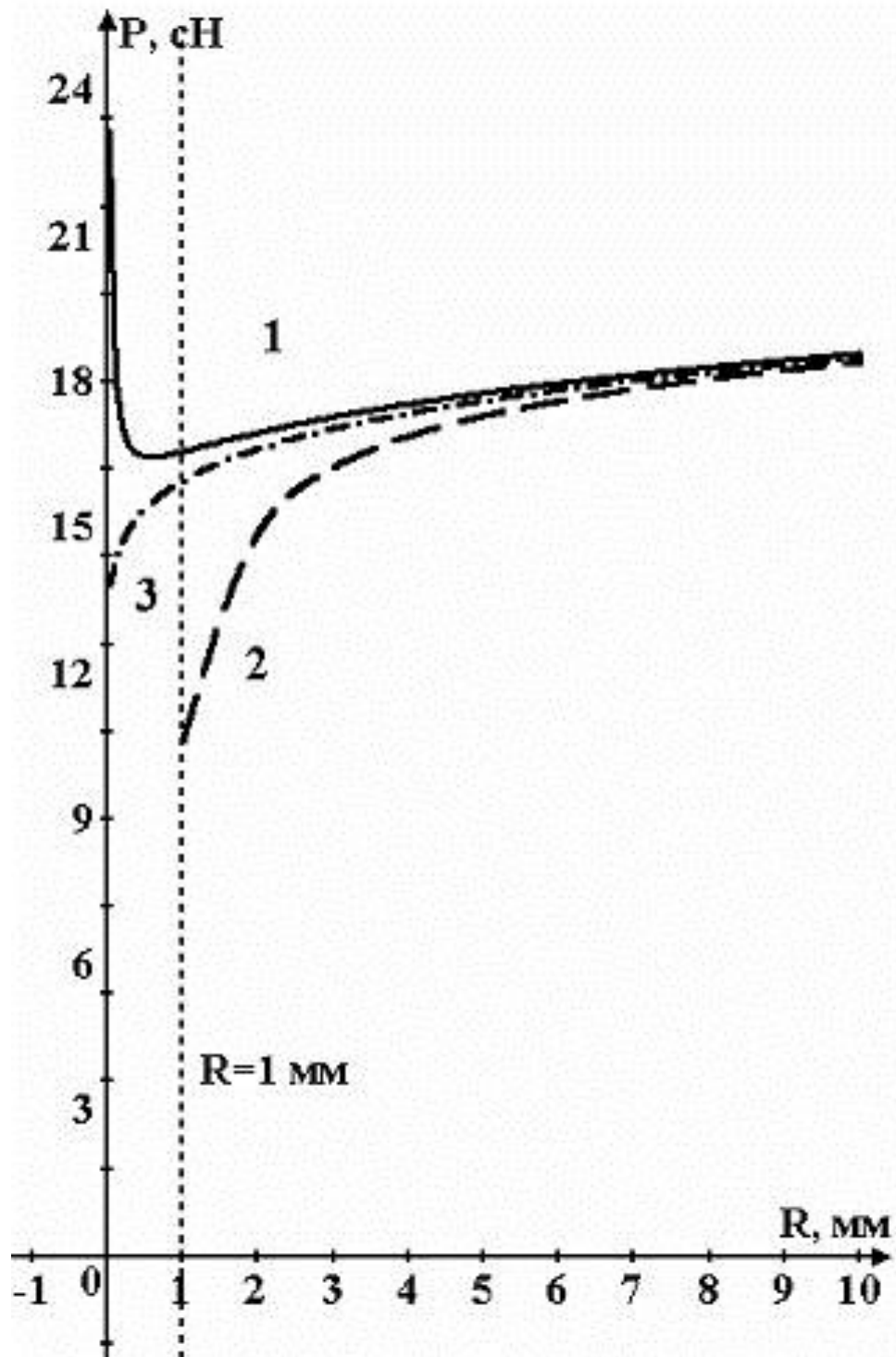


Рис.4.2.2. Залежності натягу ведучої гілки нитки від радіуса циліндричної напрямної

Число ітерацій при використанні методу дихотомії визначається за формулою

$$N \cong \frac{\ln\left(\frac{b-a}{\varepsilon}\right)}{\ln 2},$$

де  $N$  - число ітерацій;

$a, b$  - границі відрізка;

$\varepsilon$  - точність визначення кореня трансцендентного рівняння.

Блок-схема алгоритма для визначення кореня трансцендентного рівняння з використанням метода дихотомії приведена на рис.4.2.3.

На початковому етапі задаються координати відрізка  $[a, b]$  і точність визначення кореня трансцендентного рівняння  $\varepsilon$ . На наступному етапі визначається значення

$$x = \frac{a+b}{2}.$$

Дане значення  $x$  підставляється в вихідне рівняння  $F(x)$ . Після цього проводимо порівняння

$$F(x) > 0,$$

у випадку якщо умова виконується, то проводимо присвоєння

$$a = x.$$

В протилежному випадку

$$b = x.$$

На наступному етапі проводимо порівняння

$$b - a > \varepsilon.$$

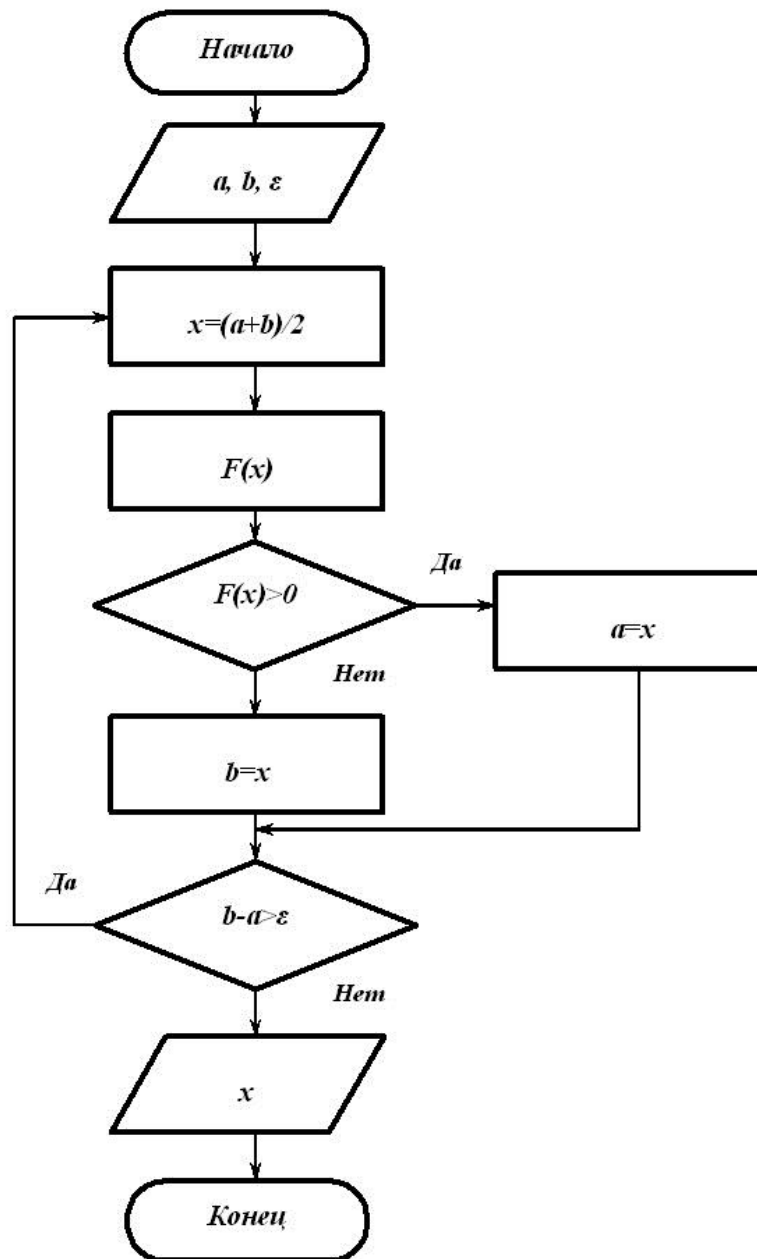


Рис.4.2.3. Блок-схема реалізації метода дихотомії для визначення кореней трансцендентного рівняння

У разі якщо умова виконується, то повертаємося до другого пункту алгоритму. В іншому випадку виводимо результат на друк, вважаючи його вірним із заданою точністю  $\varepsilon$ .



Для реалізації даного алгоритму була написана програма (див. Додаток) мовою Object Pascal в середовищі Delphi. Дана програма містить чотири модулі TUDI 1, TUDI 2, Uerrors і Synt. Перші три з них реалізуються з використанням трьох форм TfrmTUDI1, TfrmTUDI2, TFEerrors. На рис. 4.2.4 представлена форма TfrmTUDI1.

Дана форма містить в собі наступні компоненти

```
TfrmTUDI1 = class(TForm)
```

```
  lbl11TUDI: TLabel;
```

```
  lbl12TUDI: TLabel;
```

```
  lbl13TUDI: TLabel;
```

```
  lbl14TUDI: TLabel;
```

```
  btn11TUDI1: TButton;
```

```
  img1TUDI1: TImage;
```

```
  Image1: TImage;
```

```
  Image2: TImage;
```

```
  Image3: TImage;
```

```
  Image4: TImage;
```

```
  Image5: TImage;
```

```
  Label1: TLabel.
```

Реалізація процедури

```
procedure TfrmTUDI1.btn11TUDI1Click(Sender: TObject);
```

```
begin
```

```
  frmTUDI1.Hide;
```

```
  frmTUDI2.Show;
```

```
end;
```

призводить до закриття першої форми TfrmTUDI1 і відкриття другої, основної форми TfrmTUDI2, яка приведена на рис.4.2.4.

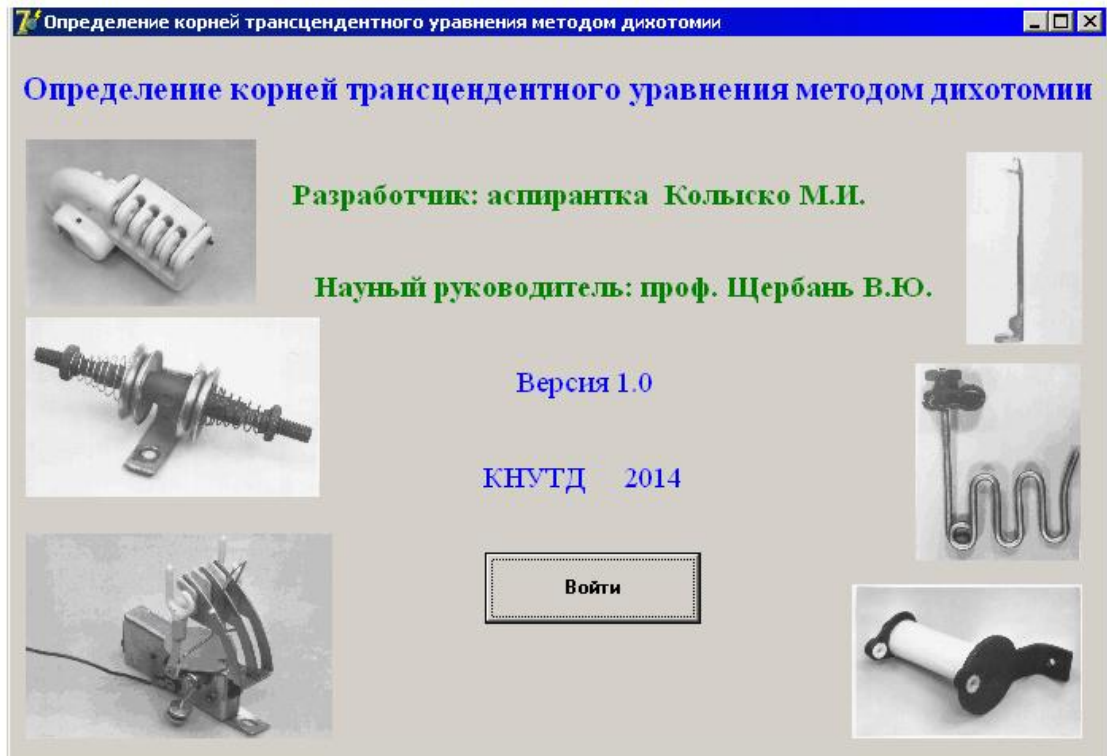


Рис.4.2.4. Форма TfrmTUDI1

Вона містить п'ять міток, одну кнопку и шість компонентів Timage.

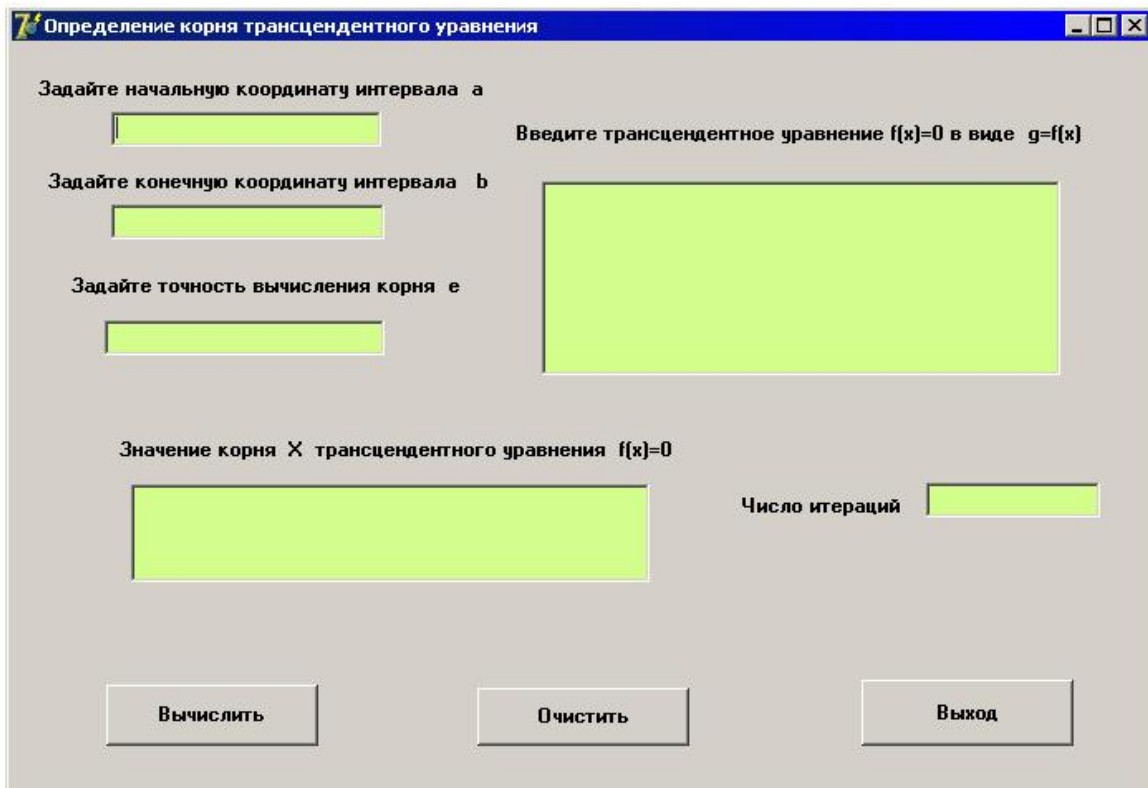


Рис.4.2.4. Основна форма TfrmTUDI2 програми

На данній формі TfrmTUDI2 містяться наступні компоненти

```
TfrmTUDI2 = class(TForm)
```

```
  lbl21TUDI2: TLabel;
```

```
  lbl22TUDI2: TLabel;
```

```
  lbl23TUDI2: TLabel;
```

```
  lbl24TUDI2: TLabel;
```

```
  lbl25TUDI2: TLabel;
```

```
  lbl26TUDI2: TLabel;
```

```
  edt21TUDI2: TEdit;
```

```
  edt22TUDI2: TEdit;
```

```
  edt23TUDI2: TEdit;
```

```
  Memo1: TMemo;
```

```
  mem21TUDI2: TMemo;
```

```
  edt24TUDI2: TEdit;
```

```
  btn21TUDI2: TButton;
```

```
  btn22TUDI2: TButton;
```

```
  btn23TUDI2: Tbutton.
```

Це шість міток lbl21TUDI2: TLabel; lbl22TUDI2: TLabel; lbl23TUDI2: TLabel; lbl24TUDI2: TLabel; lbl25TUDI2: TLabel; lbl26TUDI2: TLabel; чотири однорядкових вікна редагування edt21TUDI2: TEdit; edt22TUDI2: TEdit; edt23TUDI2: TEdit; edt24TUDI2: Tedit; три кнопки btn21TUDI2: TButton;

btn22TUDI2: TButton; btn23TUDI2: Tbutton і два вікна багаторядкового редагування mem21TUDI2: Tmemo, Memo1: TMemo. Активація трьох кнопок btn21TUDI2: TButton; btn22TUDI2: TButton; btn23TUDI2: Tbutton дозволяє реалізувати три наступні процедури

```
  procedure TfrmTUDI2.btn21TUDI2Click(Sender: TObject);
```

```
  procedure TfrmTUDI2.btn23TUDI2Click(Sender: TObject);
```

```

begin
frmTUDI1.Close;
end;
procedure TfrmTUDI2.btn22TUDI2Click(Sender: TObject);
begin
edt21TUDI2.Clear;
edt22TUDI2.Clear;
edt23TUDI2.Clear;
edt24TUDI2.Clear;
mem21TUDI2.Clear;
Memo1.Clear;
End.

```

Перша процедура `procedure TfrmTUDI2.btn21TUDI2Click (Sender: TObject)` реалізовує основний обчислювальний процес. Друга процедура `procedure TfrmTUDI2.btn23TUDI2Click (Sender: TObject)` здійснює вихід з програми. Третя процедура `procedure TfrmTUDI2.btn22TUDI2Click (Sender: TObject)` дозволяє очистити вміст однорядкових вікон редагування `edt 21 TUDI 2: TEdit; edt 22 TUDI 2: TEdit; edt 23 TUDI 2: TEdit; edt 24 TUDI 2: Tedit` і двох багаторядкових вікон редагування `mem 21 TUDI 2: Tmemo, Memo 1: Tmemo`.

Вікно `edt 21 TUDI 2: Tedit` служить для введення початкової межі інтервалу відрізка  $a$ . Вікно `edt22TUDI2: Tedit` служить для вводу кінцевої границі інтервала  $b$ . Вікно `edt23TUDI2: Tedit` служить для введення значення точності визначення кореня трансцендентного рівняння  $\varepsilon$ .

В багаторядкове вікно редагування `Memo1: Tmemo` вводяться вхідні данні і основне рівняння  $F(x) = 0$ . Форма `TfrmTUDI2`, з введеними даними, показана на рис.4.2.6. Реалізація процедури `procedure TfrmTUDI2.btn21TUDI2Click(Sender: TObject)` запускає процес обрахунку кореня трансцендентного рівняння  $F(x) = 0$ .

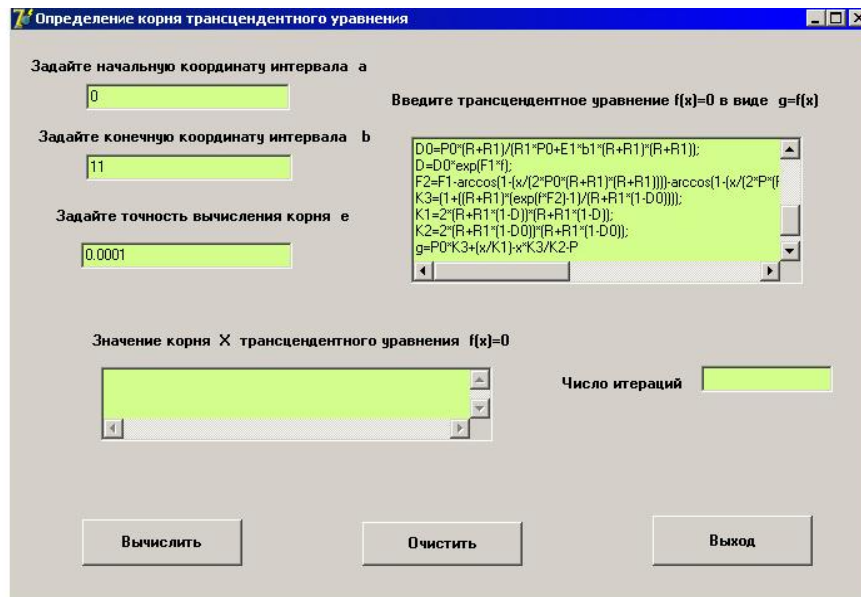


Рис.4.2.6. Форма TfrmTUDI2 з введеними даними

На рис.4.2.7 показана форма TfrmTUDI2 з результатами розрахунку корня трансцендентного рівняння з заданою точністю  $\epsilon$ .

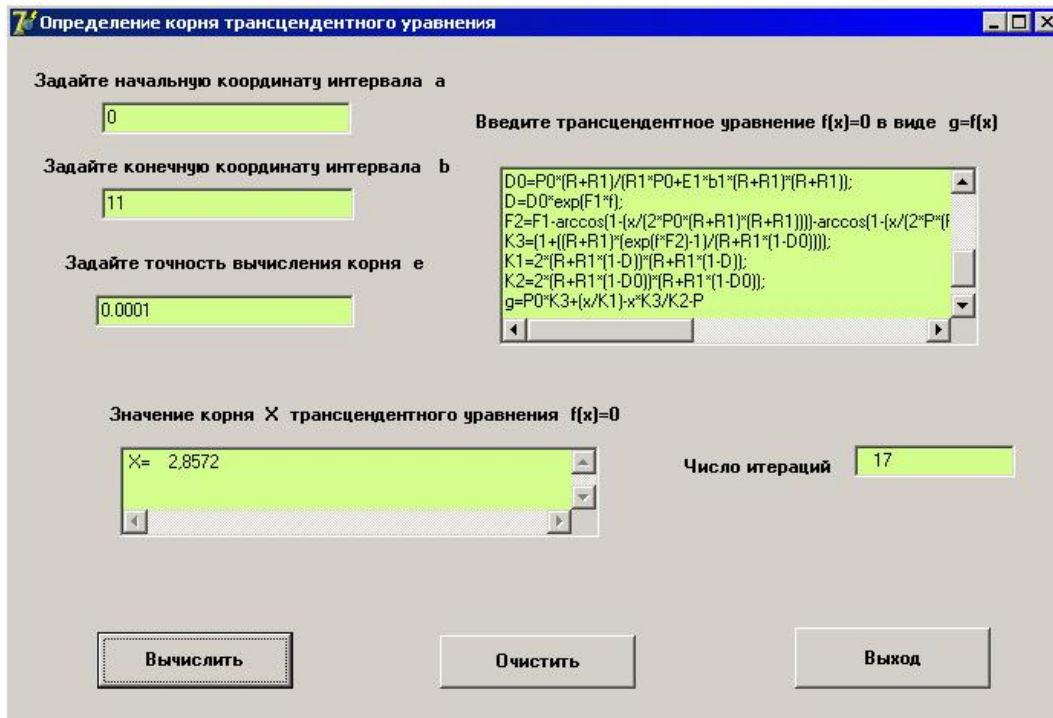


Рис.4.2.7. Результаты розрахунку корня трансцендентного рівняння

В однорядковому вікні редагування edt24TUDI2: Tedit показано число ітерацій  $N$ , яке відбувається при визначенні кореня. В багаторядковому вікні редагування mem21TUDI2: Tmemo виведено значення кореня.

Третя форма TFEerrors = class(TForm) служить для виведення повідомлень про помилки при вводі вхідних даних в багаторядкове вікно редагування Memo1: Tmemo.

Окремий модуль Synt, який використовується в програмі, не має своєї форми і служить виключно для трансляції виразів, які введені в багаторядкове вікно редагування Memo 1: Tmemo. У даному трансляторі, відкритому для редагування, використовується дев'ять основних функцій. Відповідний фрагмент коду програми має вигляд

```
begin
  try
    case -PZ[i]-100 of
      1: Stack[High(Stack)]:=Exp(Stack[High(Stack)]);
      2: Stack[High(Stack)]:=Sin(Stack[High(Stack)]);
      3: Stack[High(Stack)]:=Cos(Stack[High(Stack)]);
      4: Stack[High(Stack)]:=Sqrt(Stack[High(Stack)]);
      5: Stack[High(Stack)]:=Abs(Stack[High(Stack)]);
      6: Stack[High(Stack)]:=Ln(Stack[High(Stack)]);
      7: Stack[High(Stack)]:=Tan(Stack[High(Stack)]);
      8: Stack[High(Stack)]:=ArcTan(Stack[High(Stack)]);
      9: Stack[High(Stack)]:=ArcCos(Stack[High(Stack)]);
    End.
```

**Визначення натягу ведучої гілки нитки залежно від матеріалу,  
структури і розмірів напрямних машин легкої і текстильної  
промисловості**

Для визначення впливу структури, матеріалу ниток і розмірів циліндричної напрямної в роботі було реалізовано обчислювальний експеримент. Для цього були обрані нитки, основні характеристики яких наведені в таблиці 4.2.1.

Вирази (4.2.18) - (4.2.20) використовувалися для складання трансцендентних рівнянь. Трансцендентне рівняння, яке використовується для визначення натягу ведучої гілки нитки  $P$  з використанням метода дихотомії, має вигляд

$$f(P) - P = 0. \quad (4.2.22)$$

Тут кілька слів необхідно зауважити про специфіку обчислень окремих параметрів, які входять в рівняння (4.2.18).

Відносна деформація поперечного перерізу нитки в точці входу  $\delta_0$  і точці сходу нитки з напрямної  $\delta$  є функцією початкового натягу  $P_0$ , модуля пружності нитки на зтискання  $E_1$ , радіуса напрямної  $R$  і розрахункового радіуса поперечного перерізу нитки  $r$ , ширини сліда контакту  $b_1$  (див. формули (4.2.11-4.2.14)). На рис.4.2.8 представлені графічні залежності зміни відносної деформації для різноманітних ниток.

Для комплексних ниток і пряжі, з невисокою круткою, величина відносної деформації має максимальне значення рівне 1. Це відповідає випадку, коли абсолютна деформація перерізу в точці контакту з напрямною буде дорівнювати розрахунковому радіусу поперечного перерізу нитки. Аналіз графіків показує, що розрахункове значення відносної деформації поперечного перерізу нитки на інтервалі від 0,1 до 1,2 мм перевищує 1.

## Геометричні і механічні характеристики ниток

№	Нитка	Будова	Текс, Т	Розрахунковий діаметр $d$ , мм	Модуль пружності на розтягнення $E$ , сН/мм <sup>2</sup>	Коефіцієнт жорсткості на згин $B_0$ , сН·мм <sup>2</sup>	Модуль пружності на сжатие $E_1$ , сН/мм <sup>2</sup>	Ширина сліда контакту $b_1$ , мм	Коефіцієнт тертя	
									$a$	$b$
1	Капронова (80 фл., $d_i=0,037$ мм)	Комплексна нитка	29	0,2	$4 \cdot 10^5$	0,37	814,2	0,012	0,1765	0,1186
2	Бавовна (80 фл., $d_i=0,039$ мм)	Пряжа	30,8	0,22	$3 \cdot 10^5$	0,11	625,5	0,014	0,1656	0,059
3	Вовняна (80 фл., $d_i=0,042$ мм)	Пряжа	29,9	0,23	$1,5 \cdot 10^5$	0,23	480,9	0,015	0,1330	0,091
4	Віскозна (80 фл., $d_i=0,041$ мм)	Пряжа	29	0,22	$4,5 \cdot 10^5$	0,62	1254,8	0,011	0,1580	0,114
5	Капронова	Мононитка	36	0,2	$4 \cdot 10^5$	31,4	$2,6 \cdot 10^4$	-	0,1765	0,1186
6	Капронова	Комплексна нитка	280,5	0,64	$4 \cdot 10^5$	3,5	814,2	0,012	0,1765	0,1186
7	Капронова	Комплексна нитка	174	0,48	$4 \cdot 10^5$	2,2	814,2	0,012	0,1765	0,1186
8	Віскозна	Пряжа	93,5	0,4	$4,5 \cdot 10^5$	1,9	1254,8	0,011	0,1580	0,114
9	Бавовна	Пряжа	100	0,41	$3 \cdot 10^5$	0,36	625,5	0,014	0,1656	0,059
10	Вовняна	Пряжа	89,7	0,4	$1,5 \cdot 10^5$	0,69	480,9	0,015	0,1330	0,091



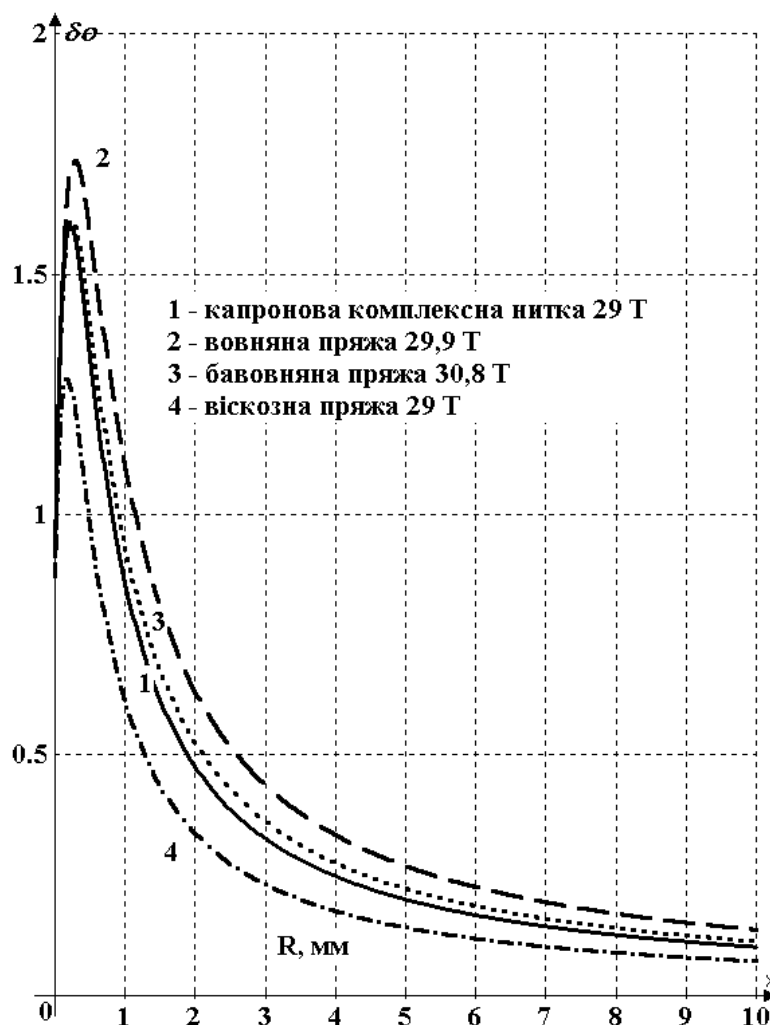


Рис.4.2.8. Графічні залежності зміни відносної деформації поперечного перерізу ниток

Це відноситься і до відносної деформації поперечного перерізу в точці сходу з направляючої. В даному випадку, в програмі передбачалась спеціальна процедура порівняння, яка здійснювала коригування. В результаті розв'язання трансцендентного рівняння (4.2.22), з використанням чисельного методу дихотомії, були отримані значення натягу ведучої гілки нитки з урахуванням мнучкості і жорсткості на вигин, які наведені у таблиці 4.2.2.

Таблиця 4.2.2

Значення натягу ведучої гілки нитки і коефіцієнта жорсткості на вигин

Нитка		Радіус R, мм												
		0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	2	3	4	5
Капронова	P	-	16.5	16.4	16.3	16.2	16.2	16.2	16.1	16.0	16.0	16.2	16.4	16.6
	$B_0$	-	-	-	-	1.96	1.81	1.69	1.58	1.49	0.87	0.59	0.45	0.36
Вовняна	P	-	16.7	16.1	14.8	14.6	14.4	14.2	14.1	14.1	14.7	14.7	14.8	14.9
	$B_0$	-	-	-	-	2.57	2.33	2.17	2.03	1.91	1.14	0.78	0.58	0.46
Бавовна	P	-	21.2	19.7	18.9	18.4	18.0	17.8	17.6	17.4	16.6	16.5	16.52	16.6
	$B_0$	-	-	-	-	2.26	2.06	1.92	1.79	1.69	0.99	0.68	0.51	0.4
Віскозна	P	-	14.3	14.2	14.19	14.17	14.15	14.05	14.0	14.9	14.1	14.3	14.6	14.7
	$B_0$	-	-	-	-	1.38	1.28	1.18	1.1	1.03	0.58	0.39	0.29	0.23
Моно-нитка	P	-	-	-	-	-	-	-	-	10	11.5	12.9	13.9	14.6

На рис.4.2.9 представлені графічні залежності натягу ведучої гілки нитки залежно від радіуса кривизни напрямної поверхні, які були отримані на підставі даних таблиці.

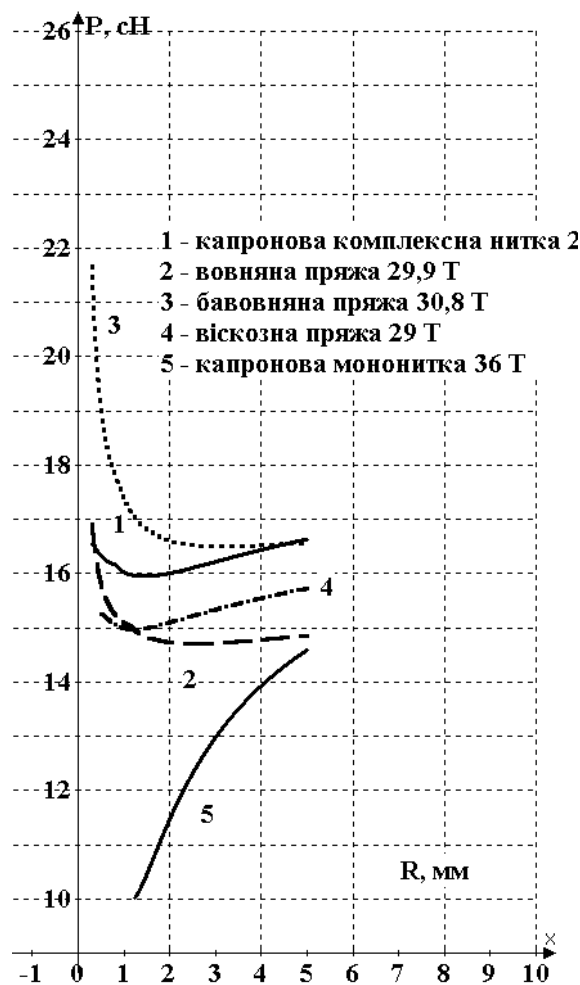


Рис.4.2.9. Залежність натягу ведучої гілки нитки від радіуса кривизни напрямної поверхні

Аналіз даних графічних залежностей показує, що натяг нитки при зменшенні радіуса кривизни спочатку спадає, а потім починає різко зростати. Це пояснюється збільшенням реального кута охоплення ниткою направляючої за рахунок мнучкості в зоні контакту. Тут спостерігається подвійний ефект. З одного боку реальний кут охоплення зменшується за рахунок жорсткості нитки на вигин, коли радіус кривизни направляючої порівняний з розрахунковим радіусом нитки, а з іншого боку відбувається збільшення кута за рахунок мнучкості. Це добре видно на графіку 5 рис.3.3.2. Він отриманий для капронової мононитки, у якої мнучкість відсутня. Натяг мононитки зі зменшенням радіуса кривизни падає.

На рис.4.2.10 представлені графічні залежності зміни натягу капронових ниток різної товщини.



Рис.4.2.10. Залежність зміни натягу капронових комплексних ниток від радіуса кривизни напрямної

Аналіз даних залежностей показує, що для ниток більшого діаметра розмах коливань значення натягу ведучої гілки нитки буде більшим.

### Визначення оптимального значення коефіцієнта жорсткості нитки на вигин

Представляє теоретичний і практичний інтерес для визначення коефіцієнта жорсткості нитки на вигин  $B_0$ , при якому натяг ведучої гілки нитки, зі зміною радіуса кривизни напрямної  $R$ , буде змінюватися по

закону Л.Эйлера (див. підр.4.2). В цьому випадку перетворимо рівняння (4.2.20) до вигляду

$$P_0 \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} (e^{f\varphi} - 1) \right] + \frac{B_0}{2[R+r(1-\delta)]^2} - \frac{B_0}{2[R+r(1-\delta_0)]^2} \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} (e^{f\varphi} - 1) \right] - P_0 e^{f\varphi} = 0. \quad (4.2.23)$$

Рівняння (3.4.1) є трансцендентним рівнянням. Його розв'язання, з урахуванням залежностей (4.2.3), (4.2.19), дозволяє визначити значення коефіцієнта жорсткості нитки на вигин. В таблиці 3.3.2 представлені значення коефіцієнта  $B_0$  для різноманітних видів ниток.

Розв'язок трансцендентного рівняння (4.2.23) здійснювалось у відповідності до методики, приведеної в підрозділі 3.2. На рис.4.2.11 представлені графічні залежності зміни коефіцієнта жорсткості нитки на вигин в залежності від радіуса кривизни напрямної.

Залежність (4.2.23) показує, що для комплексних ниток і пряжі коефіцієнт жорсткості нитки на вигин залежить від величини крутки  $K$

$$B_0 = \left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{j(K)}, \quad j(K) = 1 + u_1 K^{u_2}, \quad (4.2.24)$$

де  $u_1, u_2$  - деякі сталі коефіцієнти.

Використовуючи дані таблиці 4.2.2, а також дані, приведені в роботі [3], для капронової комплексної нитки 29Т отримані наступні дані

$$\begin{aligned} K = 20, & \quad B_0 = 0,139, \\ K = 100, & \quad B_0 = 0,189. \end{aligned} \quad (4.2.25)$$

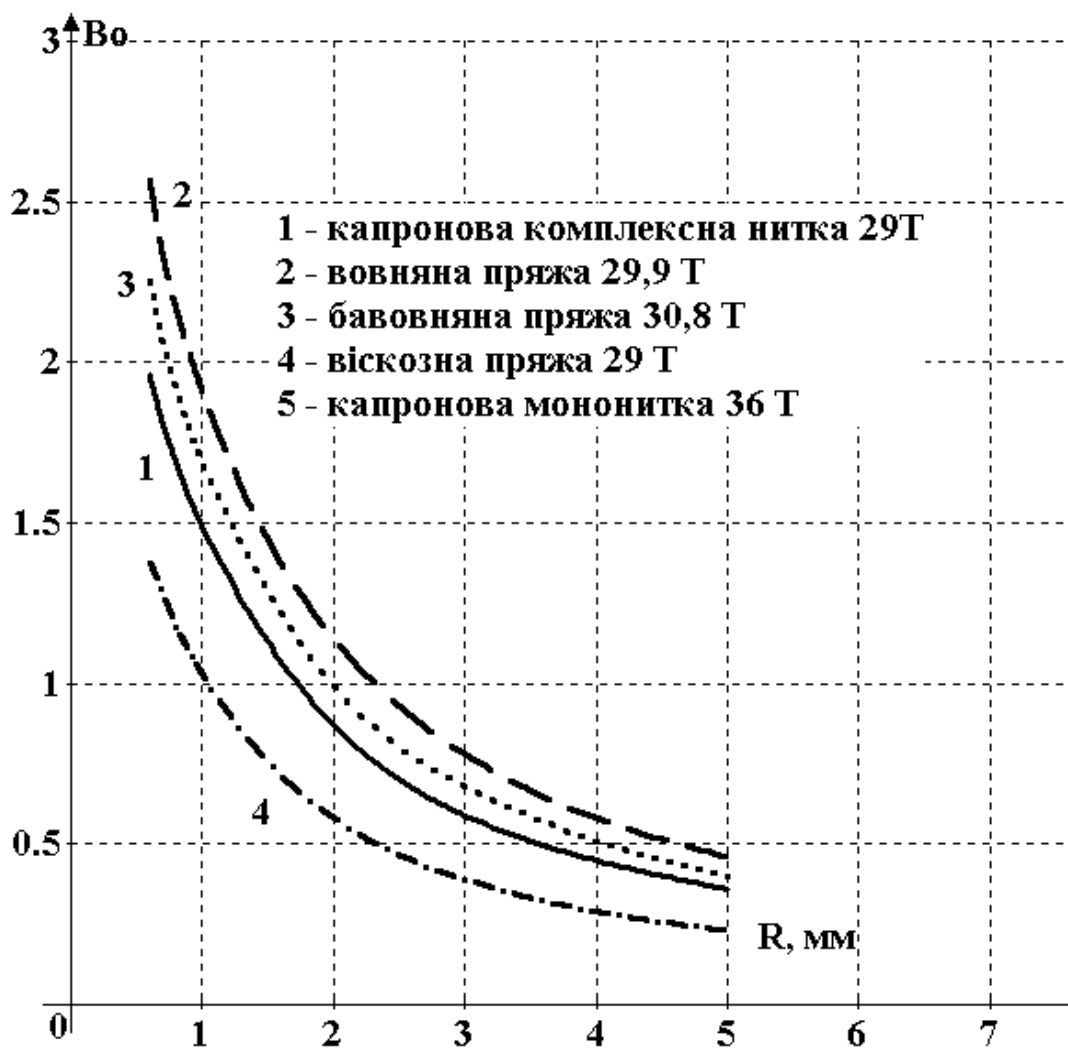


Рис.4.2.11. Зміна коефіцієнта жорсткості нитки на вигин в залежності від радіуса кривизни напрямної

Вирішуючи сумісно (4.2.24)-(4.2.25) отримаємо наступну систему трансцендентних рівнянь для визначення  $u_1, u_2$

$$0,139 = (4,3 \cdot 10^{-5})^{(1+U_1 20^{U_2})},$$

$$0,189 = (4,3 \cdot 10^{-5})^{(1+U_1 100^{U_2})}.$$

Чисельне вирішення данні системи трансцендентних рівнянь здійснювалось з використанням модифікованого метода Ньютона (програма приведена в Додатку). В результаті були отримані наступні значення коефіцієнтів  $u_1, u_2$

$$U_1 = -0,7498, \quad U_2 = 0,023.$$

Дана методика дозволяє отримувати необхідний коефіцієнт жорсткості нитки на вигин задавши нитці зазначену крутку.

**Визначення оптимального радіуса кривизни напрямних пристроїв технологічного обладнання**

Дуже важливим є визначення оптимальних розмірів нитконапрямних пристроїв машин легкої промисловості. Для розрахунків були обрані капронова комплексна нитка 29Т, бавовняна пряжа 30,8Т, вовняна пряжа 29,9Т, віскозна пряжа 29Т. Дані нитки мають приблизно рівний діаметр поперечного перерізу, а їх геометричні та механічні властивості наведені в таблиці 4.2.2. Натяг веденої гілки дорівнював  $P_0=10$  сН. Розрахунковий кут охоплення дорівнював  $\varphi_p=3,14$  рад.

Вираз для визначення натягу ведучої гілки нитки, з урахуванням (4.2.20), представимо у вигляді

$$P = z_6(R) + z_7(R) - z_8(R),$$

де

$$\begin{aligned} z_0(R) &= f = a \left( \frac{R}{P_0} \right)^b, \\ z_1(R) &= \delta_0 = \frac{P_0(R+r)}{rP_0 + E1b_1(R+r)^2}, \\ z_2(R) &= \delta = z_1(R)e^{\varphi_p z_0(R)}, \\ z_3(R) &= \varphi_p - 2 \arccos \left[ 1 - \frac{B_0}{2P_0(R+r)^2} \right] - \arccos \left[ 1 - z_1(R) \left( \frac{2r}{R} \right)^2 \right] - \arccos \left[ 1 - z_2(R) \left( \frac{2r}{R} \right)^2 \right], \\ z_5(R) &= e^{z_0(R)z_3(R)} - 1, \\ z_6(R) &= P_0 \left[ 1 + \frac{(R+r)z_5(R)}{R+r[1-z_1(R)]} \right], \\ z_7(R) &= \frac{B_0}{2[R+r(1-z_2(R))]^2}, \\ z_8(R) &= \frac{B_0}{2[R+r(1-z_1(R))]^2} \left[ 1 + \frac{(R+r)z_5(R)}{[R+r(1-z_1(R))]} \right]. \end{aligned}$$

Оптимальне значення радіуса кривини  $R$  напрямною, при якому натяг ведучої гілки  $P$  буде мінімальним, визначається з наступної рівності

$$\frac{dP}{dR} = \frac{dz6(R)}{dR} + \frac{dz7(R)}{dR} - \frac{dz8(R)}{dR} = 0. \quad (4.2.26)$$

Для розв'язання рівняння (3.4.1) необхідно знайти відповідні похідні функцій  $z0(R), z1(R), z2(R), z3(R), z5(R)$  по радіусу  $R$ , які будуть використовуватись при визначенні похідних. Їх значення визначаються з наступних виразів

$$\begin{aligned} \frac{dz1(R)}{dR} &= \frac{d\delta_0}{dR} = \frac{P_0}{P_0 r + E1b_1(R+r)^2} - \frac{2E1P_0b_1(R+r)^2}{[P_0 r + E1b_1(R+r)^2]^2}, \\ \frac{dz2(R)}{dR} &= \frac{d\delta}{dR} = \frac{P_0 e^{a\varphi_P \left(\frac{R}{R_0}\right)^b}}{P_0 r + E1b_1(R+r)^2} - \frac{2E1P_0b_1 e^{a\varphi_P \left(\frac{R}{R_0}\right)^b} (R+r)^2}{[P_0 r + E1b_1(R+r)^2]^2} + \\ &\quad + \frac{ab\varphi_P e^{a\varphi_P \left(\frac{R}{R_0}\right)^b} \left(\frac{R}{P_0}\right)^{b-1} (R+r)}{P_0 r + E1b_1(R+r)^2}, \\ z4(R) &= \frac{d}{dR} z3(R) = \frac{2B_0}{P_0 (R+r)^3 \sqrt{1 - \left[\frac{B_0}{2P_0 (R+r)^2} - 1\right]^2}} - \\ &\quad - \frac{\frac{8r^2 z2(R)}{R^3} - \frac{4r^2 \frac{d}{dR} z2(R)}{R^2}}{\sqrt{1 - \left[\frac{4}{R^2} r^2 z2(R) - 1\right]^2}} - \frac{\frac{8r^2 z1(R)}{R^3} - \frac{4r^2 \frac{d}{dR} z1(R)}{R^2}}{\sqrt{1 - \left[\frac{4}{R^2} r^2 z1(R) - 1\right]^2}}, \\ \frac{dz5(R)}{dR} &= e^{z0(R)z3(R)} \left[ z0(R) \frac{dz3(R)}{dR} + z3(R) \frac{dz0(R)}{dR} \right]. \end{aligned}$$

Визначимо похідні функцій  $z6(R), z7(R)$ , що входять у вираз (4.2.26)



$$\frac{dz6(R)}{dR} = P_0 \left[ \frac{z5(R)}{R-r[z1(R)-1]} + \frac{\frac{dz5(R)}{dR}(R+r)}{R-r[z1(R)-1]} + \frac{z5(R)\left(r\frac{dz1(R)}{dR}-1\right)(R+r)}{[R-r[z1(R)-1]]^2} \right],$$

$$\frac{dz7(R)}{dR} = \frac{B_0 \left[ 1 + (R+r) \frac{z5(R)}{[R+r[1-z1(R)]]} \right]}{2[R+r[1-z1(R)]]^2}.$$

Для функції  $z8(R)$  вираз першої похідної буде мати вигляд

$$\frac{dz8(R)}{dR} = \frac{B_0 \left[ \frac{z5(R)}{R-r[z1(R)-1]} + \frac{\frac{dz5(R)}{dR}(R+r)}{R-r[z1(R)-1]} + \frac{z5(R)\left(r\frac{dz1(R)}{dR}-1\right)(R+r)}{[R-r[z1(R)-1]]^2} \right]}{2[R-r[z1(R)-1]]^2} +$$

$$+ \frac{B_0 \left[ r\frac{dz1(R)}{dR}-1 \right] \left[ \frac{z5(R)(R+r)}{R-r[z1(R)-1]} + 1 \right]}{[R-r[z1(R)-1]]^3}.$$

Підставляючи останні вирази похідних в (4.2.26) отримаємо трансцендентне рівняння виду  $F(R) = 0$ . Для його розв'язання будемо використовувати алгоритм, що реалізує модифікований метод Ньютона для системи трансцендентних рівнянь і програму, яка приведена в Додатку.

В результаті розрахунків були отримані наступні оптимальні значення радіуса кривизни напрямної: 1,5 мм – для капронової комплексної нитки 29Т; 3,4 мм – для бавовняної пряжі 30,8Т; 2,5 мм – для вовняної пряжі 29,9Т; 1 мм – для віскозної пряжі 29Т.

### 4.3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ВЗАЄМОДІЇ НИТОК З НАПРЯМНИМИ ПОВЕРХНЯМИ

В четвертому розділі наводяться результати досліджень по визначенню впливу різних чинників на зміну натягу ведучої гілки нитки при її взаємодії з направляючою поверхнею. Дослідження процесу

взаємодії ниток з направляючими поверхнями вимагає проведення цілої серії дослідів для підтвердження коректності зроблених допущень при виведенні теоретичних залежностей в розділах 2 і 3 і визначення меж використання останніх.

Активне планування експерименту, використання методів математичної статистики дозволяє отримати регресійні залежності, які описують процес з необхідною точністю, при цьому число чинників може досягати значної величини. Застосування ЕОМ дозволяє легко визначати величину коефіцієнтів в рівняннях регресії, їх значущість. Отримані залежності, після відповідних перетворень, можна використовувати для оптимізації процесу взаємодії нитки з направляючою поверхнею.

### **Розробка установок для проведення експерименту. Обґрунтування вибору вимірювально-реєструючої апаратури**

Для реалізації плану експериментальних досліджень потрібно було розробити спеціальні установки. Велике значення має обґрунтування і вибір вимірювально-реєструючої апаратури, яка є невід'ємною частиною будь-якої експериментальної установки.

Вивчення процесу взаємодії ниток з направляючими поверхнями і нитками, що виступають як напрямні, коли кривизна поверхні співрозмірна з радіусом поперечного перетину нитки, призвело до необхідності імітації даного виду взаємодії в експериментальних установках.

На думку автора, подальший розвиток питання по експериментальному дослідженню процесу взаємодії ниток з напрямними повинен йти шляхом розробки універсальних, багатofункціональних установок, що дозволяють проводити комплексні дослідження процесу взаємодії ниток з напрямними, імітувати реальні умови, що виникають при переробці ниток

на технологічному устаткуванні.

Для здійснення експериментальних досліджень нами були розроблені прилади для визначення натягу ведучої гілки нитки; для визначення фрикційних властивостей ниток в умовах, наближених до реальних, таких, що виникають на технологічному устаткуванні. Дві з цих установок захищені авторськими свідоцтвами (патент України №31888 та патент України №45939).

Аналог першого з розроблених пристроїв містить шків, який встановлено з можливістю горизонтального переміщення відносно осі обертання, причому одна його торцева сторона має нахил та упирається в ролик, а інша контактує з пружиною. Гнучка стрічка з жорсткістю в повздовжньому та поперечному напрямках, що з'єднана з вантажем з однієї сторони і робочим рухомим органом динамометра з іншої сторони, має на нижній поверхні зі сторони шківу прикріплений зразок нитки, яка досліджується, та розташовується між трьома парами роликів, що закріплені на двох кронштейнах. Кронштейни роликів з'єднані з робочими рухомими органами динамометрів.

Але розвиток сучасного машинобудування та технологій в легкій та текстильній промисловості призводить до різкого збільшення швидкості руху нитки. Як відомо зі збільшенням швидкості руху нитки змінюється і величина коефіцієнту тертя [43-46]. Наявність вищої кінематичної пари (кулачкової), яку утворюють ролик та шків з похилою торцевою стороною і пружини для силового замикання, не дозволяє використовувати його при високих швидкостях обертання шківу. Це пояснюється наявністю розривів неперервності в графіках прискорення та похідних від прискорення будь-яких порядків, що мають місце в кулачкових механізмах [43, 45].

Це призводить до того, що в процесі роботи з'являються удари, відривання шківів від ролика. Це спричиняє нестационарний рух шківів в

поперечному напрямку відносно осі обертання і не дозволяє визначити коефіцієнт тертя в поперечному напрямку при великих швидкостях руху нитки.

Задачею запропонованої моделі є розширення технологічних можливостей за рахунок збільшення діапазону вимірювання фрикційних властивостей ниток при великих швидкостях руху.

Поставлена задача досягається тим, що прилад для визначення коефіцієнту тертя ниток, який містить шків, встановлений з можливістю горизонтального переміщення відносно осі обертання ведучого валу, гнучку стрічку з жорсткістю в повздовжньому та поперечному напрямках, яка з'єднана з вантажем з однієї сторони та робочим рухомим органом динамометра з іншої сторони, на нижній поверхні якої зі сторони шківу закріплено зразок нитки, що досліджується, і розташовується між трьома парами роликів, які закріплені на двох кронштейнах, які з'єднані з робочими рухомими органами динамометрів, оснащений двома кінчними зубчастими колесами, які жорстко закріплені на валах, які перетинаються та розташовані в опорах, один з яких є ведучим, а другий веденим, на веденому валові розташовано кривошип, який кінематично зв'язаний з шатуном, а шатун зв'язаний з повзуном, який розташовується в горизонтальних направляючих, вилкоподібним кронштейном, на кінцях якого розміщені двосторонні опорні підшипники ковзання, що зв'язані з шипами, закріпленими з торців шківу, який жорстко встановлено на повзуні.

Порівняльний аналіз з прототипом показує, що заявлений прилад для визначення коефіцієнту тертя ниток відрізняється тим, що на валах, які перетинаються та розташовані в опорах, один з яких є ведучим, а другий веденим, розташовано два кінчних зубчастих колеса, на веденому валу розташовано кривошип, який кінематично зв'язаний з шатуном, а шатун зв'язаний з повзунком, що розміщений в горизонтальних направляючих,

вилкоподібним кронштейном, на кінцях якого розташовані двосторонні упорні підшипники ковзання, що зв'язані з шипами, які закріплено з торців шківу, який жорстко встановлений на повзуні. Ознаки, що були перераховані вище, дозволяють виміряти коефіцієнт тертя ниток в повздовжньому і поперечному напрямках при великих швидкостях руху, що дає можливість широко досліджувати фрикційні властивості матеріалу.

На рис.4.3.1 зображена схема приладу. На схемі умовно не показані гнучка стрічка, вантаж і рухомі робочі органи динамометрів для визначення коефіцієнтів тертя у повздовжньому і поперечному напрямках.

Прилад для визначення коефіцієнта тертя ниток містить шків 1, встановлений з можливістю горизонтального переміщення відносно осі обертання ведучого вала 2, гнучку стрічку із жорсткістю в повздовжньому й поперечному напрямку, з'єднаний з вантажем з однієї сторони й робочим рухомим органом динамометра з іншої сторони, на нижній поверхні якого з боку шківів закріплений зразок нитки, що досліджується, й розташовується між трьома парами роликів, укріпленими на двох кронштейнах, які з'єднані з робочими рухомими органами динамометрів, який має два конічні зубчасті колеса 3, що жорстко закріплені на перетнутих валах, що розташовуються в опорах, один із яких є ведучим 2, а другий веденим. На веденому валу розташованій кривошип 5, кінематично зв'язаний з шатуном 5, а шатун зв'язаний з повзуном 7, розташованим у горизонтальних направляючих.

Вилкоподібний кронштейн 8, на кінцях якого розміщені двосторонні опорні підшипники ковзання 9, які зв'язані із шипами 10, що закріплені з торців шківів 1, жорстко закріплений на повзуні 7, шипи 10 розташовуються з боків шківів 1.

Прилад працює в такий спосіб. Під дією приладу рух від ведучого вала 2 передається шківу 1 і через конічні зубчасті колеса 3 і 4 кривошипу 4.

Через кінематично зв'язаний з ним шатун 6 і повзун 7 вилкоподібний кронштейн 8 отримує зворотно-поступальний рух, який через двосторонні опорні підшипники 9 і шипи 10 передається шківу 1. При цьому, навіть при більших швидкостях обертання ведучого валу 2 шків 1 рухається за заданим законом.

Використання запропонованого приладу дозволяє значно розширити діапазон вимірюваних величин шляхом визначення коефіцієнта тертя ниток при більших швидкостях руху.

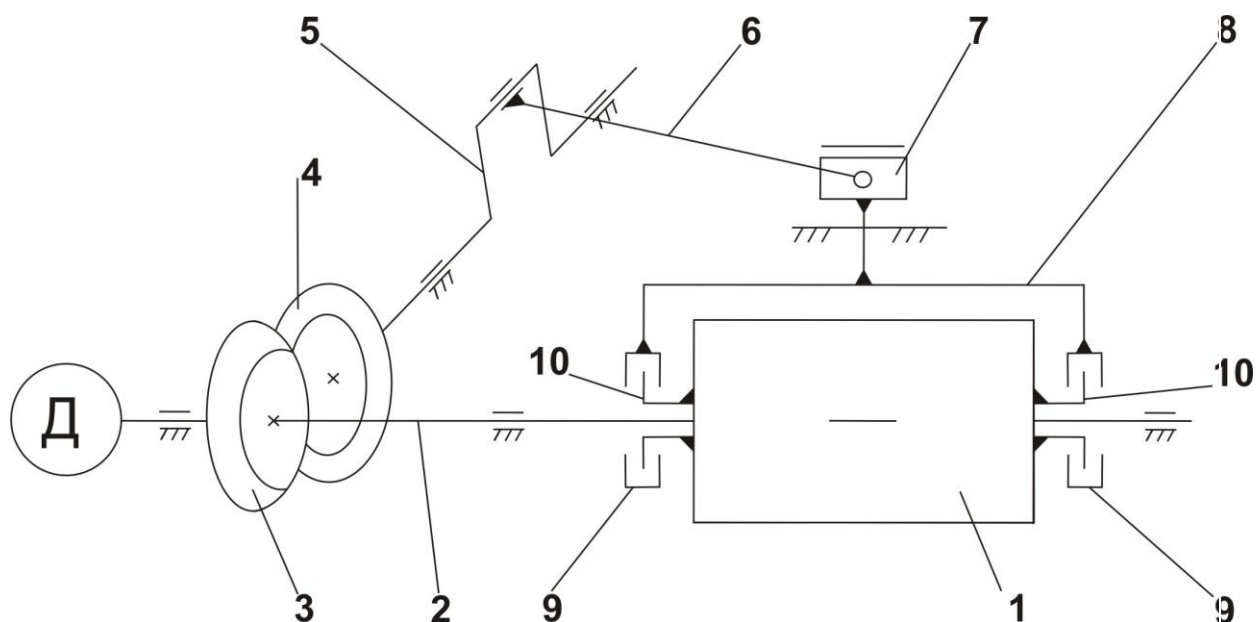


Рис.4.3.1. Схема вимірювального вузла (патент України №31888)

Аналог другого з розроблених пристроїв містить змонтовані в корпусі бобіноутримувач, нитконапрячник, нитконатяжник, вимірювальний вузол у вигляді каретки з трьома нерухомо закріпленими на ній ниткопровідниками, встановлений в напрямній корпусу з можливістю переміщення під дією нитки, пристрій для переміщення нитки та ролики для нитки.

Але використання даного пристрою не дозволяє визначати фрикційні властивості ниток для різних кутів охоплення нитконапрямника. В сучасних трикотажних та текстильних машинах кут охоплення ниткою різних нитконапрямувачів вимірюється в широких межах (від  $10^\circ$  до  $180^\circ$ ). Як відомо, при зміні кута охоплення фрикційні властивості суттєво змінюються [10].

Метою запропонованої моделі є розширення технологічних можливостей вимірювального пристрою.

Поставлена мета досягається тим, що пристрій для визначення фрикційних властивостей нитки, який містить змонтовані в корпусі бобіноутримач, нитконапрямник, каретку з закріпленим кронштейном та вказівником, направляючу каретки з приводом, металеву нескінченну стрічку, що обгинає шків з упором, що несе підпружинений контакт, пристрій для протягування нитки, підтримуючі ролики, вимірювальну шкалу згідно з корисною моделлю містить два рухомих шківів, вісі яких з пристроями фіксації та вказівниками розташовані в наскрізному горизонтальному пазу каретки, нитконапрямник з пристроєм фіксації та вказівником, які розташовані в наскрізному вертикальному пазі каретки, горизонтальну та вертикальну шкалу.

Порівняльний аналіз з прототипом показує, що заявлений пристрій для визначення фрикційних властивостей нитки відрізняється тим, що містить два рухомих шківів, вісі яких з пристроями фіксації та вказівниками розташовані в наскрізному горизонтальному пазу каретки, нитконапрямник з пристроєм фіксації та вказівником, які розташовані в наскрізному вертикальному пазу каретки, горизонтальну і вертикальну шкалу. Ознаки, які були перераховані вище, дозволяють вимірювати фрикційні властивості ниток при зміні кута охоплення нитконапрямників, що дає змогу широко досліджувати фрикційні властивості матеріалу.

На Рис.4.3.2 зображена схема пристрою (центральна каретка

вимірювального вузла показана в загальному вигляді). На рис.4.3.3 показана центральна каретка вимірювального вузла.

Пристрій для визначення фрикційних властивостей нитки містить в корпусі 1 приладу бобінотримач 2, нитконапрямник 3, нитконатягувач 4, вимірювальний вузол в вигляді каретки 4. Каретка 5 встановлена в направляючій 7 корпусу 1 та містить індикаторну стрілку 8 та фігурний кронштейн 9. Нитка отримує рух від пристрою 11. Індикаторна лінійка 10 промаркована в одиницях, які характеризують фрикційні властивості нитки. На корпусі приладу змонтовані рухомі рамки 12-14 для переміщення нитки. Направляюча 7 встановлена з можливістю повздовжнього переміщення за допомогою механізму 15 для переміщення відносно нерухомо змонтованих підшипником ковзання 16. Нижче направляючої 7 на корпусі 1 змонтовані два шківів 17 та 18 з нескінченною гнучкою металевою стрічкою 19, на якій закріплена металева пластинка 20 з контактом 21 та пружиною 22. Два рухомих шківів 23 розташовуються на осях з пристроями фіксації та вказівниками 25, які розміщені в наскрізному горизонтальному пазу 26 каретки 4.

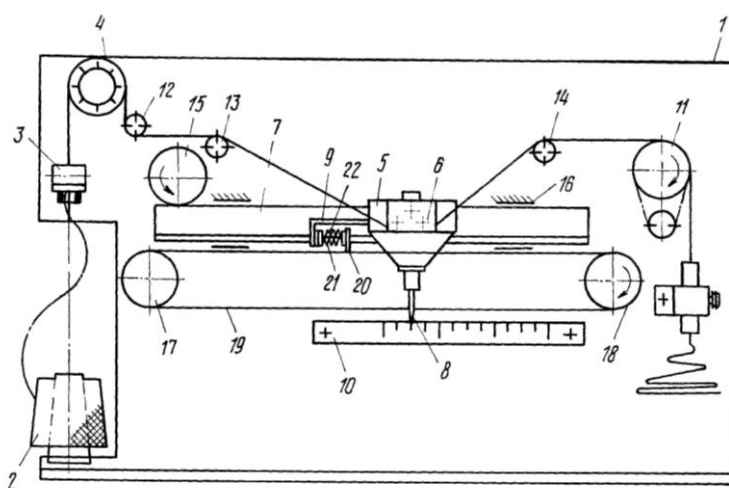


Рис.4.3.2. Схема вимірювального пристрою (патент України №45939)



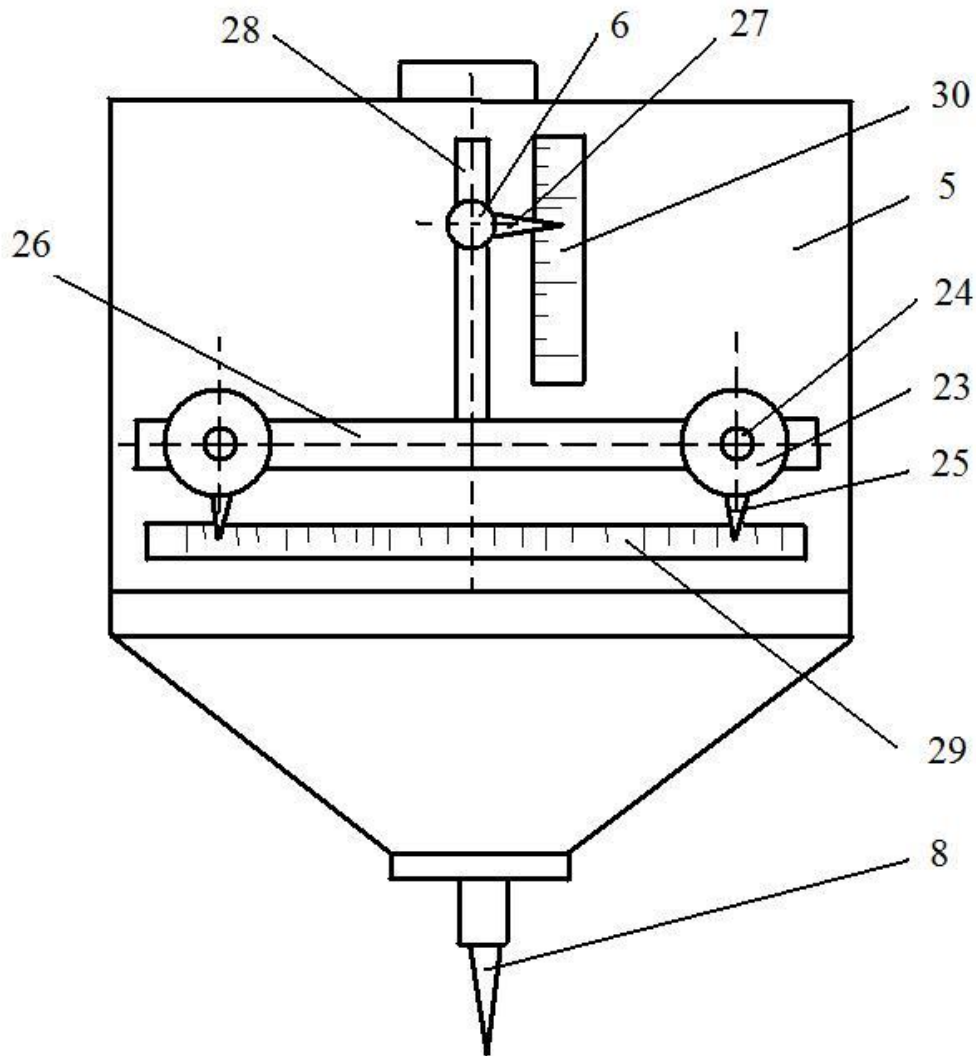


Рис.4.3.3. Центральна каретка вимірювального пристрою(патент України №45939)

Нитконапрямок 6 з пристроєм фіксації та вказівником 27 розташовані в наскрізному вертикальному пазу 28 каретки 4. Горизонтальна 29 і вертикальна 30 шкали мають метричну шкалу.

Пристрій працює наступним чином. Послаблюючи пристрої фіксації розташовують рухомі шківні 23 на осях 24 та нитконапрямок 6 відносно горизонтальної 29 та вертикальної 30 шкал таким чином, щоб отримати необхідний кут охоплення ниткою нитконапрямка 6. Контроль здійснюється за показниками вказівників 25 та 27. Переміщенням каретки 5 встановлюють індикаторну стрілку 8 на нульове положення індикаторної

лінійки 10. Прокручуючи шків 18 проти годинникової стрілки встановлюють пластину 20 з силовим контактом 21 з правого боку від робочої грані фігурного кронштейна 9. Включають пристрій 11 для переміщення нитки. При цьому каретка 5 починає рухатись, а кронштейн 9 деформує пружину 22 та замикає контакт 21 електродвигуна пристрою 15 для переміщення направляючої 7.

Використання запропонованого пристрою дозволяє значно розширити діапазон вимірювальних величин шляхом вимірювання фрикційних властивостей ниток при зміні кута охоплення нитконапрямників, що дозволяє вдосконалити технологічні процеси та обладнання легкої та текстильної промисловості.

Для експериментального визначення сумісного впливу радіусу кривизни, швидкості, кута охоплення на натяг ведучої гілки нитки нами була розроблена установка, представлена на рис.4.3.4. Установка включає третій вимірювальний вузол 3. Це було зроблено для того, щоб можна було одночасно з експериментальним дослідженням умов взаємодії нитки з напрямною 6, встановленою нерухомо в корпусі 5, проводити експеримент за визначенням умов роботи різних нитконатягувачів, які встановлювалися між 2 і 3 вимірювальними вузлами.

Крім того, для варіювання швидкості руху нитки був встановлений ступінчастий привод 8, який забезпечує необхідну швидкість обертання приймальному барабану 9.

Зміна кута обхвату ниткою направляючої 6 здійснювалося за допомогою двох рухомих роликів 4, встановлених в корпусі 5 з можливістю горизонтального переміщення. Нитка на вимірювальний вузол 2 подавалася з циліндричної бобіни з певним попереднім натягом, який створювався шляхом пригальмовування бобіни.

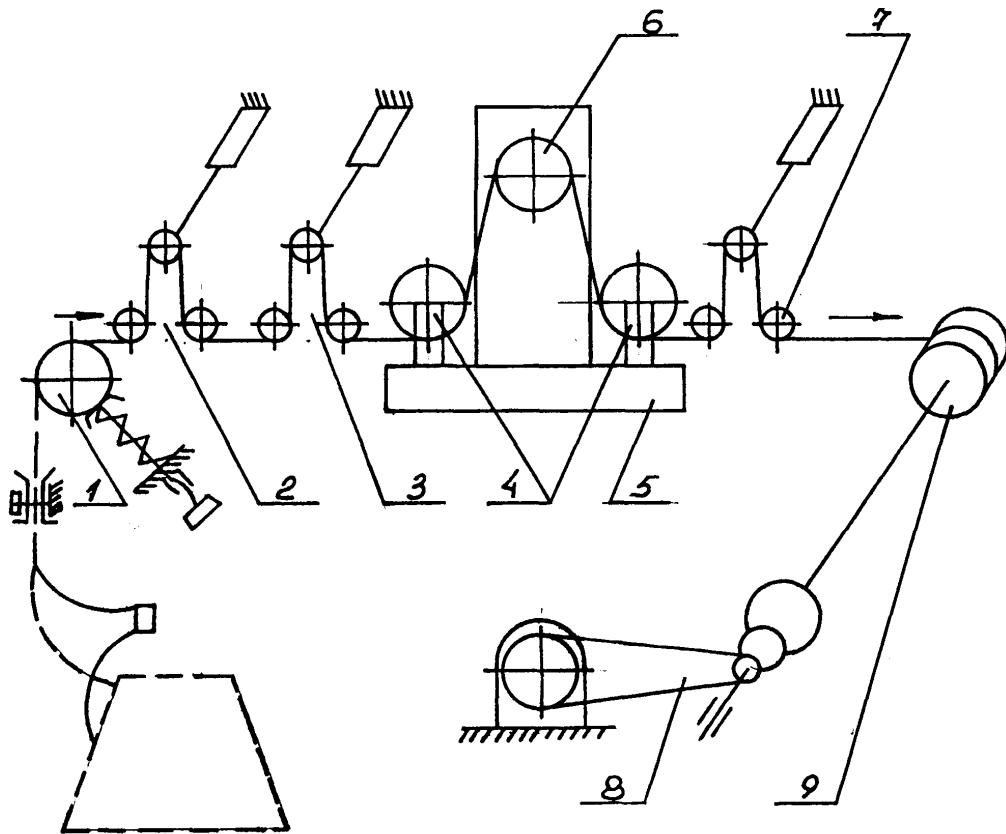


Рис.4.3.4. Електротензометрична установка

У приладі передбачалася подача нитки безпосередньо з конічної бобіни, для чого в його конструкцію були введені ниткоспрямовувачі і шайбовий нитконатягувач. Натяг веденої гілки нитки перед напрямною 6 реєструвався вимірювальним вузлом 3. Натяг ведучої гілки нитки - вимірювальним вузлом 7. У приладі була передбачена можливість заміни направляючої 6 з метою визначення впливу радіусу її кривизни на умови взаємодії з ниткою.

Описані вище установки дозволяли варіювати: швидкість руху нитки від 0,1 до 1,5 м/с; натягнення веденої гілки нитки від 5 до 15 сН; кут обхвату що направляє від 1,57 до 3,14 радіан; радіус кривизни направляючої поверхні від 1 до 7 мм.

Складовою частиною приладів була електротензометрична апаратура. Її вибір не був випадковим. Висока точність у вимірюванні величин,

можливість реєструвати швидкоплинні процеси, хороша наочність - ось далеко не повний перелік цих переваг. При проведенні експериментальних досліджень використовувався дванадцяти каналний осцилограф К12-22, підсилювач 8АНЧ-7М.

При виборі гальванометрів осцилографа визначальними чинниками були: частотна характеристика процесу, що вивчається, і вихідний струм з відповідного каналу підсилювача на осцилограф. Зразки запису осцилограм натягу ведучої гілки нитки приведені на рис.4.3.4. Для кожного варіанту з плану експерименту знімалися три повторні осцилограми.

Необхідно відзначити, що осцилограф К12-22, 8-ми каналний підсилювач 8АНЧ-7М і відповідні блоки живлення до них проходили спеціальну тестову перевірку на предмет своєї функціональної придатності і надійності в роботі.

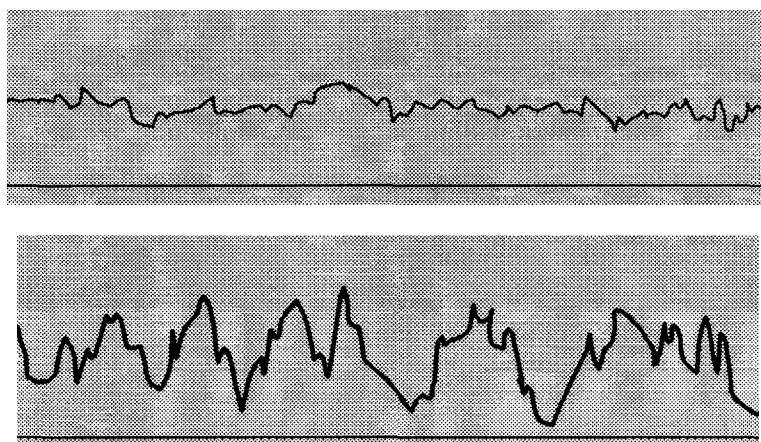


Рис.4.3.4. Зразки осцилограм

### **Обґрунтування вибору ниток і пряжі**

Вивчення впливу матеріалу і структури ниток на величину натягу ведучої гілки призвело до вибору широкого асортименту ниток, як по структурі, так і по хімічному складу. По структурі текстильні нитки можна

класифікувати на комплексні нитки і пряжу. За походженням всі волокна діляться на натуральні і хімічні.

При виборі ниток нами враховувалися і геометричні розміри поперечного перетину (розрахунковий діаметр) . Найширше, при виробленні тканин, використовуються нитки, діаметр яких коливається в межах від 0,2 до 0,7 мм. У трикотажній промисловості, при виробництві полотен, різного асортименту верхнього і нижнього трикотажу, використовують нитки з розрахунковим діаметром від 0,1 до 0,25 мм.

Для експерименту були вибрані наступні нитки (таблиця 4.3.1):

Натуральна сировина:

- бавовняна пряжа натуральна, органічна, рослинна, целюлозна 30,8 Т;
- вовняна пряжа натуральна, органічна, тваринна, білкова 31 Т.

Хімічні волокна (таблиця 4.3.1):

- лавсанова комплексна нитка хімічна, органічна, синтетична, гетероланцюгова, поліефірна 33,2 Т текс;
- капронова комплексна нитка хімічна, органічна, синтетична, гетероланцюгова, поліамідна лінійної щільності 31,2 Т;
- віскозна комплексна нитка хімічна, органічна, штучна, гідратцелюлозна 29 Т.

На підставі набутих значень фактичного тексту визначався розрахунковий діаметр нитки за відомою методикою [10].

Отримані експериментальні дані оброблялися методами математичної статистики в наступній послідовності: визначалося середньоарифметичне значення величини натягу ведучої гілки, знаходили відхилення від середнього значення для кожного результату; визначали величину дисперсії; стандартне відхилення окремого вимірювання і стандартного відхилення середнього результату; перевірку надійності отриманого результату проводили по критерію Ст'юдента для проведеного числа дослідів  $n=3$  при вибраній довірчій вірогідності  $\alpha=0,95$ ; визначали

## Механіка нитки

помилку отриманого середнього результату і визначали інтервал, в якому з довірчою вірогідністю  $\alpha$  знаходиться середній результат; обчислювали відносну помилку.

Таблиця 4.3.1.

### Фізико-механічні властивості ниток

№ п/п	Нитка	Характеристика	Структура	Фактичний текст, Т	Розрахунковий діаметр, мм	Коефіцієнт жорсткості на згин, Во, сН·мм <sup>2</sup>
1	Бавовняна 15,4x2	натуральна, органічна, рослинна, целюлозна	Пряжа	30,8	0,22	0,7
2	Вовняна	натуральна, органічна, тваринна, білкова	Пряжа	31	0,24	0,1
3	Лавсанова	хімічна, органічна, синтетична, гетероланцюгова, поліефірна	Комплексна нитка	33,2	0,24	0,25
4	Капронова 15,6x2	хімічна, органічна, синтетична, гетероланцюгова, поліамідна	Комплексна нитка	31,2	0,22	0,22
5	Віскозна	хімічна, органічна, штучна, гідратцелюлозна	Комплексна нитка	29	0,22	0,4

### Плани проведення експерименту

Визначення основних чинників, які обумовлюють зміну натягу нитки, що рухається по направляючій поверхні, має значення при виборі стратегії проведення експерименту.

Наукова інформація, яка накопичилася до теперішнього часу, з даної проблеми дозволяє побудувати середню апріорну діаграму рангів. По одній осі відкладаються чинники, а по іншій суми рангів. До даних чинників були віднесені: радіус кривизни направляючої поверхні, натяг веденої гілки нитки, кут охоплення ниткою направляючої, швидкість руху нитки, температура навколишнього середовища, вологість повітря, коефіцієнт тертя між ниткою і напрямною, характер обробки напрямної поверхні, матеріал і структура нитки.

Аналіз середньої апріорної діаграми рангів дозволив встановити, що для радіусу кривизни направляючої, натягу веденої гілки, кута охоплення розподіл відповідних сум рангів рівномірний.

Таким чином, при проведенні експериментальних досліджень, нами було поставлено завдання по визначенню впливу радіуса кривизни напрямної поверхні  $R$ , натягу веденої гілки  $P_0$ , кута охоплення  $\varphi$  на натяг ведучої гілки  $P$  нитки.

Після визначення чинників, що впливають на збільшення натягу ведучої гілки нитки, обґрунтування і вибору сировини для випробувань, необхідно скласти план проведення експерименту. Це дозволить виробити певну стратегію в пошуку оптимального поєднання чинників, що впливають на даний процес.

Для кожної з ниток даним планом (таблиця 4.3.2 і таблиця 4.3.3) передбачається 15 дослідів. По кожному з дослідів передбачалося 3 повторних.

Вибір розмірів направляючої поверхні при проведенні експерименту, в

пропонованому діапазоні від 1 мм до 7 мм, пояснюється тим, що даний інтервал охоплює до 80% всього асортименту голково-платинових виробів ниткопрямовувачів, робочих органів текстильних і трикотажних машин.

Одна серія експериментів проводилася для діапазону зміни радіусу кривизни направляючої від 1 до 3 мм. Друга серія експериментів проводилася для діапазону зміни радіусу кривизни направляючої від 3 до 7 мм. Це пояснюється тим, що при взаємодії ниток з направляючими, радіус кривизни яких є порівняним з радіусом поперечного перетину нитки починає позначатися мнучкість і жорсткість ниток на вигин[1,10, 35-37].

Таблиця 4.3.2

План проведення експерименту ( $R=1\dots 3$  мм)

№ варіанта	Досліджувані чинники						Характерні зони матриці
	x1	R	x2	Po	x3	$\varphi$	
i-1- 1	-1	R1i+h1	+1	Poi+ h2	+1	$\varphi_i + h3$	Точки ядра
i-1- 2	+1	R1i-h1	-1	Poi+ h2	+1	$\varphi_i + h3$	
i-1- 3	-1	R1i+h1	+1	Poi- h2	-1	$\varphi_i + h3$	
i-1- 4	+1	R1i-h1	+1	Poi- h2	+1	$\varphi_i + h3$	
i-1- 5	+1	R1i+h1	+1	Poi+ h2	-1	$\varphi_i - h3$	
i-1- 6	+1	R1i-h1	-1	Poi+ h2	-1	$\varphi_i - h3$	
i-1- 7	-1	R1i+h1	-1	Poi- h2	-1	$\varphi_i - h3$	
i-1- 8	-1	R1i-h1	-1	Poi- h2	+1	$\varphi_i - h3$	
i-1- 9	-1,215	R1i-*	0	Poi	0	$\varphi_i$	Зоряні точки
i-1- 10	+1,215	R1i+*	0	Poi	0	$\varphi_i$	
i-1- 11	0	R1i	-1,215	Poi-*	0	$\varphi_i$	
i-1- 12	0	R1i	+1,215	Poi+*	0	$\varphi_i$	
i-1- 13	0	R1i	0	Poi	-1,215	$\varphi_i - *$	
i-1- 14	0	R1i	0	Poi	+1,215	$\varphi_i + *$	
i-1- 15	0	R1i	0	Poi	0	$\varphi_i$	Нульова точка



Інтервали зміни величини натягу веденої гілки нитки (від 5 до 15 сН) були вибрані виходячи з умов переробки ниток на ткацьких верстатах і в'язальних машинах, підготовчому устаткуванні.

Кут охоплення направляючої поверхні, для кожного конкретного випадку, є величиною змінною. Зважаючи на специфіку переробки ниток на трикотажному устаткуванні, де мають місце великі перегини ниток при взаємодії з робочими органами, нами був вибраний інтервал зміни від 90° до 180°.

У таблиці 4.3.3 приведений план проведення експерименту по визначенню впливу радіусу кривизни направляючої поверхні  $R$ , натягу веденої гілки  $P_0$ , кута охоплення  $\varphi$  на натяг ведучої гілки  $P$  нитки при діапазоні зміни радіусу кривизни напрямної від 3 до 7 мм.

Таблиця 4.3.3

План проведення експерименту ( $R=3\dots 7$  мм)

№ варіанта	Досліджувані чинники						Характерні зони матриці
	x1	R	x2	P <sub>0</sub>	x3	φ	
i-2- 1	-1	R <sub>2i+h1</sub>	+1	P <sub>0i+h2</sub>	+1	φ <sub>i+h3</sub>	Точки ядра
i-2- 2	+1	R <sub>2i-h1</sub>	-1	P <sub>0i+h2</sub>	+1	φ <sub>i+h3</sub>	
i-2- 3	-1	R <sub>2i+h1</sub>	+1	P <sub>0i-h2</sub>	-1	φ <sub>i+h3</sub>	
i-2- 4	+1	R <sub>2i-h1</sub>	+1	P <sub>0i-h2</sub>	+1	φ <sub>i+h3</sub>	
i-2- 5	+1	R <sub>2i+h1</sub>	+1	P <sub>0i+h2</sub>	-1	φ <sub>i-h3</sub>	
i-2- 6	+1	R <sub>2i-h1</sub>	-1	P <sub>0i+h2</sub>	-1	φ <sub>i-h3</sub>	
i-2- 7	-1	R <sub>2i+h1</sub>	-1	P <sub>0i-h2</sub>	-1	φ <sub>i-h3</sub>	
i-2- 8	-1	R <sub>2i-h1</sub>	-1	P <sub>0i-h2</sub>	+1	φ <sub>i-h3</sub>	
i-2- 9	-1,215	R <sub>2i-*</sub>	0	P <sub>0i</sub>	0	φ <sub>i</sub>	Зоряні точки
i-2- 10	+1,215	R <sub>2i+*</sub>	0	P <sub>0i</sub>	0	φ <sub>i</sub>	
i-2- 11	0	R <sub>2i</sub>	-1,215	P <sub>0i-*</sub>	0	φ <sub>i</sub>	

i-2- 12	0	R2i	+1,215	Poi+*	0	$\phi_i$	
i-2- 13	0	R2i	0	Poi	-1,215	$\phi_i^*$	
i-2- 14	0	R2i	0	Poi	+1,215	$\phi_i^{+*}$	
i-2- 15	0	R2i	0	Poi	0	$\phi_i$	Нульова точка

При плануванні експерименту, при побудові моделей другого порядку нами було використано ортогональне планування другого порядку. Хоча існують інші оптимальні плани, ортогональне планування використовувалося через свою достатню простоту і можливості застосування вже розроблених пакетів програм для ЕОМ з обробки отриманих експериментальних даних.

**Спільний вплив радіусу кривизни направляючої, натягу веденої гілки, кута охоплення на натяг ведучої гілки для направляючої великої кривизни**

Реалізуючи план експериментальних досліджень (табл.4.3.2) за визначенням впливу радіусу кривизни направляючої поверхні, натягу веденої гілки нитки, кута охоплення на натяг ведучої гілки, для різних ниток (табл.4.3.1), нами було отримано ряд даних, представлених в таблиці 4.3.4.3.

Вище ми зупинялися на тих міркуваннях, які привели до вибору ортогонального плану. Останні вимоги застосування того або іншого плану, що пред'являються до оцінки ефективності, привели до того, що основними критеріями необхідно вважати: максимальну величину дисперсії передбачених значень критерію оптимізації в області експерименту; об'єм еліпсоїда розсіяння оцінок параметрів та ін.

При проведенні експерименту іменовані величини необхідно замінити на кодовані. В нашому випадку радіус кривизни напрямної  $R$  позначимо через  $x1$ . В нульовій точці радіус кривизни дорівнював 2 мм. Довжина плеча

складала 1 мм. Натяг веденої гілки нитки  $P_0$  позначимо через  $x_2$ . В нульовій точці натяг веденої гілки нитки дорівнює 7,5 сН. Довжина плеча складала 2,5 сН. Кут охоплення ниткою напрямної  $\varphi$  позначимо через  $x_3$ . В нульовій точці кут охоплення ниткою напрямної дорівнює  $3\pi/4$ рад. Довжина плеча складала  $\pi/4$ рад.

Тоді система рівнянь для переходу від іменованих до кодованих значень чинників буде мати вигляд

$$x_1 = R - 2, \quad x_2 = \frac{P_0 - 7,5}{2,5}, \quad x_3 = \frac{\varphi - \frac{3\pi}{4}}{\frac{\pi}{4}}. \quad (4.3.1)$$

Таблиця 4.3.4

Спільний вплив радіусу кривизни направляючої, натягу веденої гілки, кута охоплення на натяг ведучої гілки для направляючої великої кривизни

Варіант	Натяг, сН	Варіант	Натяг, сН	Варіант	Натяг, сН	Варіант	Натяг, сН	Варіант	Натяг, сН
1-1- 1	16,00	2-1- 1	13,90	3-1- 1	14,16	4-1- 1	15,74	5-1- 1	15,00
1-1- 2	7,90	2-1- 2	6,86	3-1- 2	6,99	4-1- 2	7,77	5-1- 2	7,20
1-1- 3	14,30	2-1- 3	11,64	3-1- 3	12,00	4-1- 3	14,01	5-1- 3	12,17
1-1- 4	16,80	2-1- 4	14,59	3-1- 4	14,87	4-1- 4	16,52	5-1- 4	15,70
1-1- 5	15,00	2-1- 5	13,55	3-1- 5	12,85	4-1- 5	14,61	5-1- 5	13,06
1-1- 6	8,00	2-1- 6	6,95	3-1- 6	7,08	4-1- 6	7,87	5-1- 6	7,22
1-1- 7	11,00	2-1- 7	9,56	3-1- 7	11,00	4-1- 7	10,82	5-1- 7	9,92
1-1- 8	9,50	2-1- 8	8,25	3-1- 8	8,41	4-1- 8	9,34	5-1- 8	8,57
1-1- 9	14,00	2-1- 9	12,16	3-1- 9	12,39	4-1- 9	13,77	5-1- 9	12,62
1-1-	13,00	2-1-	11,29	3-1-	11,51	4-1-	12,79	5-1-	11,72

10		10		10		10		10	
1-1-11	8,00	2-1-11	6,95	3-1-11	7,08	4-1-11	7,87	5-1-11	7,21
1-1-12	16,00	2-1-12	13,90	3-1-12	14,16	4-1-12	15,74	5-1-12	14,23
1-1-13	10,00	2-1-13	8,69	3-1-13	8,85	4-1-13	9,84	5-1-13	9,02
1-1-14	12,20	2-1-14	10,60	3-1-14	10,70	4-1-14	12,10	5-1-14	11,1
1-1-15	12,20	2-1-15	10,60	3-1-15	10,80	4-1-15	12,00	5-1-15	11,00

На рис.4.3.6 представлена поверхня відгуку для бавовняної пряжі. Рівняння регресії для бавовняної пряжі буде мати вигляд

$$P = 12,17 - 0,36x_1 + 3,16x_2 + 0,45x_3 + 0,82x_1^2 + 0,8x_1x_2 + 0,15x_1x_3 - 0,09x_2^2 + 0,68x_2x_3 - 0,63x_3^2. \quad (4.3.2)$$

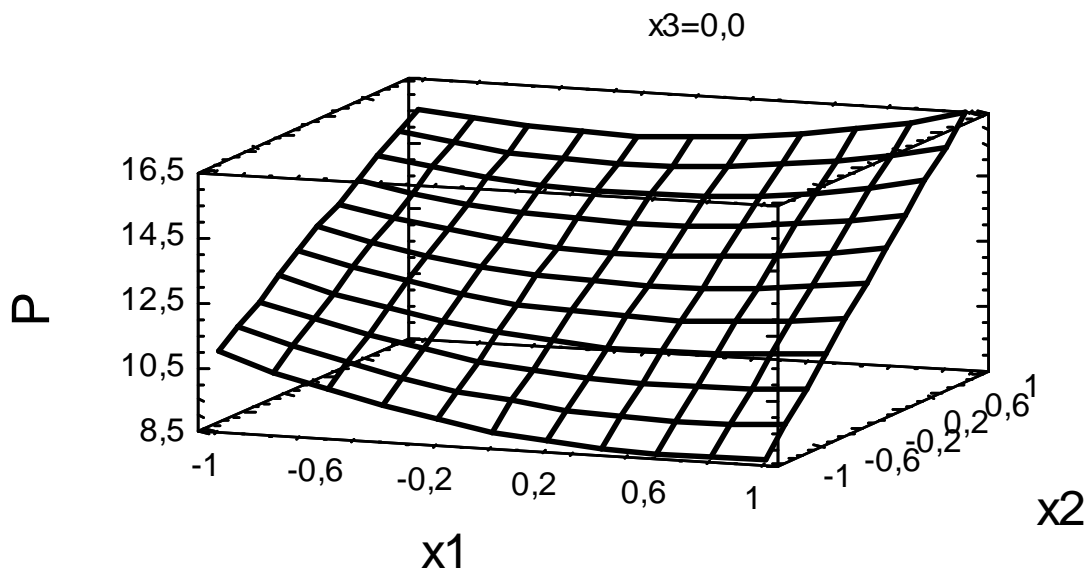


Рис.4.3.6. Поверхня відгуку

В результаті оцінки значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (4.3.2) отримаємо відповідну діаграму, яка представлена на рис.4.3.7. Аналіз даної діаграми показує, що не значущими коефіцієнтами будуть коефіцієнти при

наступних комбінаціях:  $x_1x_3$ ,  $x_2^2$ .

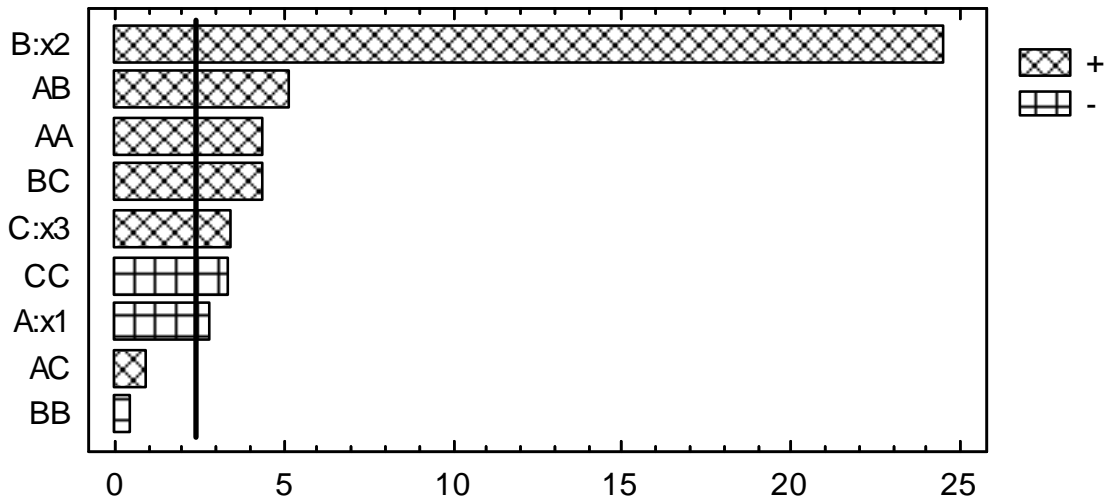


Рис.4.3.7. Діаграма значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії  
З урахуванням значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (4.3.2), а також з урахуванням системи (4.3.1), перейдемо до іменованих значень, остаточно отримаємо

$$P = 8,94 - 0,376P_0 - 12,04R + 5,60\varphi + 1,63R^2 - 2,044\varphi^2 + 0,64P_0R + 0,687P_0\varphi. \quad (4.3.3)$$

На рис.4.3.8 представлена поверхня відгуку для вовняної пряжі. Рівняння регресії для вовняної пряжі буде мати вигляд

$$P = 10,50 - 0,35x_1 + 2,61x_2 + 0,26x_3 + 0,78x_1^2 + 1,01x_1x_2 + 0,18x_1x_3 - 0,0008x_2^2 + 0,77x_2x_3 - 0,47x_3^2. \quad (4.3.4)$$

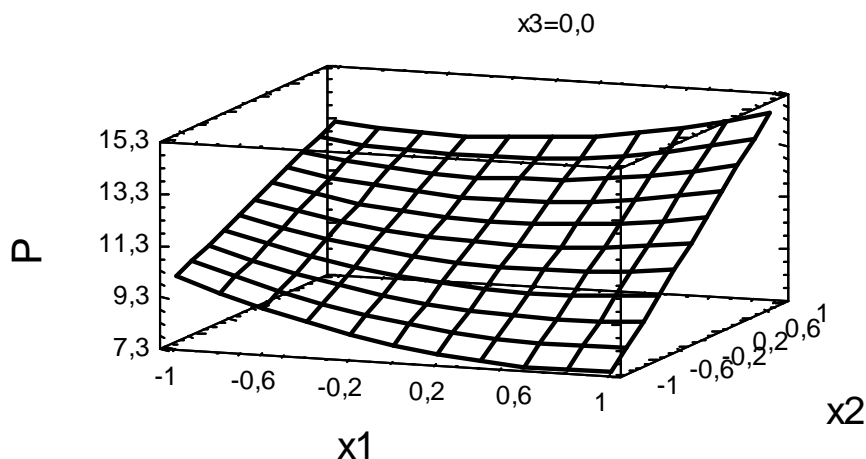


Рис.4.3.8. Поверхня відгуку

В результаті оцінки значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (4.3.4) отримаємо відповідну діаграму, яка представлена на рис.4.3.9. Аналіз даної діаграми показує, що не значущими коефіцієнтами будуть коефіцієнти при наступних комбінаціях:  $x_1$ ,  $x_3$ ,  $x_1x_3$ ,  $x_2^2$ ,  $x_3^2$ .

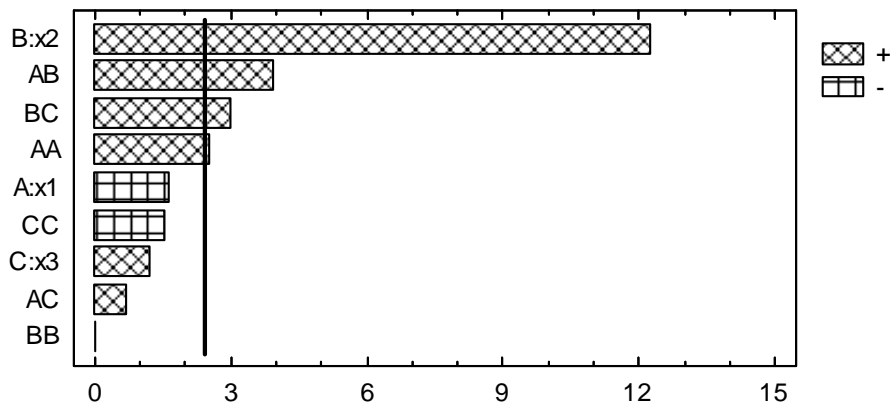


Рис.4.3.9. Діаграма значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії

З урахуванням значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (4.3.4), а також з урахуванням системи (4.3.1), перейдемо до іменованих значень, остаточно отримаємо

$$P = 27,01 - 1,364P_0 - 12,31R - 5,88\varphi + 0,804P_0R + 0,784P_0\varphi + 1,57R^2. \quad (4.3.5)$$

На рис.4.3.10 представлена поверхня відгуку для лавсанової комплексної нитки. Рівняння регресії для лавсанової комплексної нитки буде мати вигляд

$$P = 10,74 - 0,43x_1 + 2,61x_2 + 0,34x_3 + 0,76x_1^2 + 0,86x_1x_2 + 0,29x_1x_3 - 0,043x_2^2 + 0,86x_2x_3 - 0,55x_3^2. \quad (4.3.6)$$

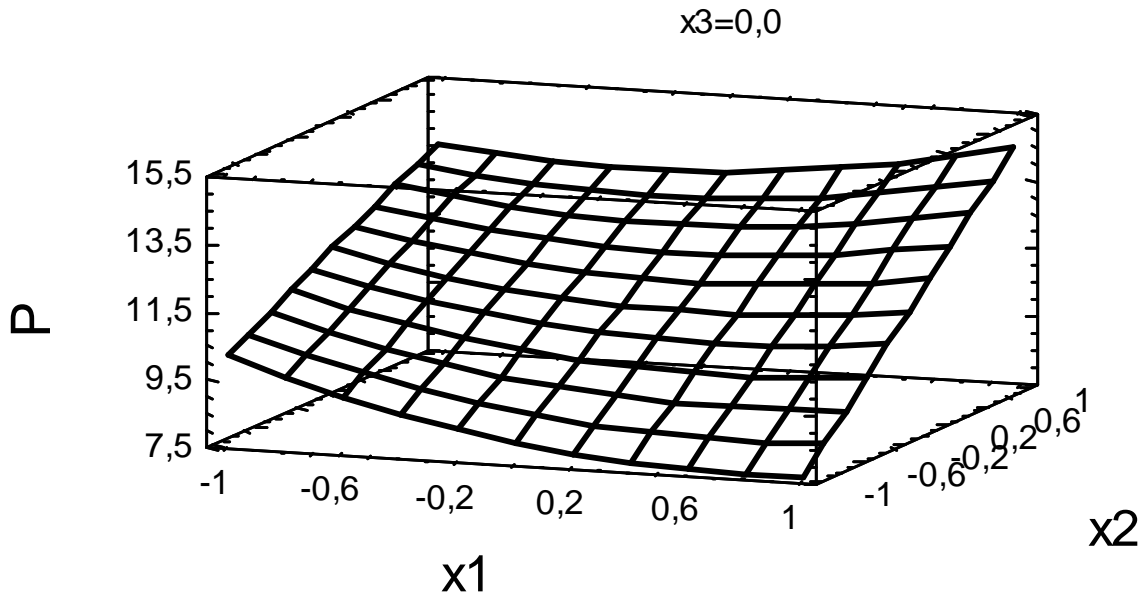


Рис.4.3.10. Поверхня відгуку

В результаті оцінки значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (4.3.6) отримуємо відповідну діаграму, яка представлена на рис.4.3.11. Аналіз даної діаграми показує, що не значущими коефіцієнтами будуть коефіцієнти при наступних комбінаціях:  $x_3$ ,  $x_1x_3$ ,  $x_2^2$ .

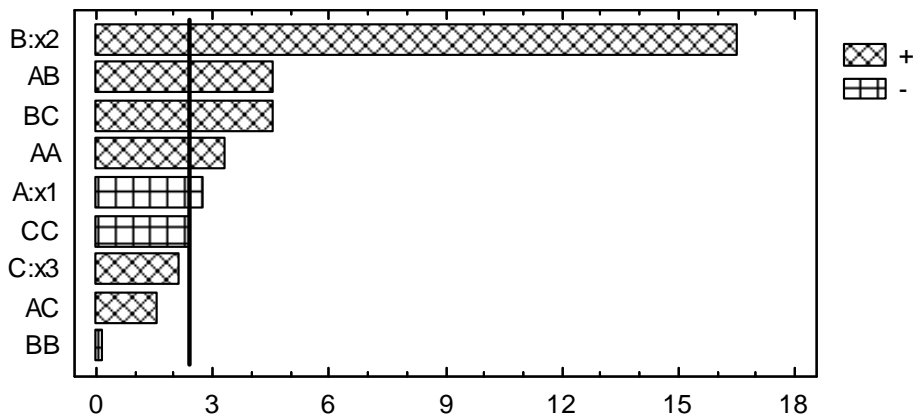


Рис.4.3.11. Діаграма значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії

З урахуванням значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (4.3.6), а також з урахуванням системи (4.3.1), перейдемо до іменованих значень, остаточно отримуємо

$$P = 18,77 - 1,36P_0 - 12,14R + 1,91\varphi + 1,52R^2 - 1,801\varphi^2 + 0,692P_0R + 0,876P_0\varphi. \quad (4.3.7)$$

На рис.4.3.12 представлена поверхня відгуку для капронової комплексної

нитки. Рівняння регресії для капронової комплексної нитки буде мати вигляд

$$P = 11,98 - 0,39x_1 + 3,12x_2 + 0,45x_3 + 0,79x_1^2 + 0,75x_1x_2 + 0,21x_1x_3 - 0,102x_2^2 + 0,64x_2x_3 - 0,61x_3^2. \quad (4.3.8)$$

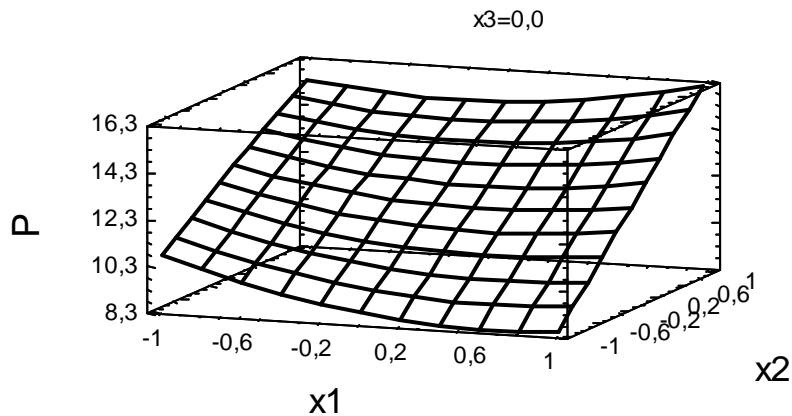


Рис.4.3.12. Поверхня відгуку

В результаті оцінки значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (4.3.8) отримаємо відповідну діаграму, яка представлена на рис.4.3.13. Аналіз даної діаграми показує, що не значущими коефіцієнтами будуть коефіцієнти при наступних комбінаціях:  $x_1x_3$ ,  $x_2^2$ .

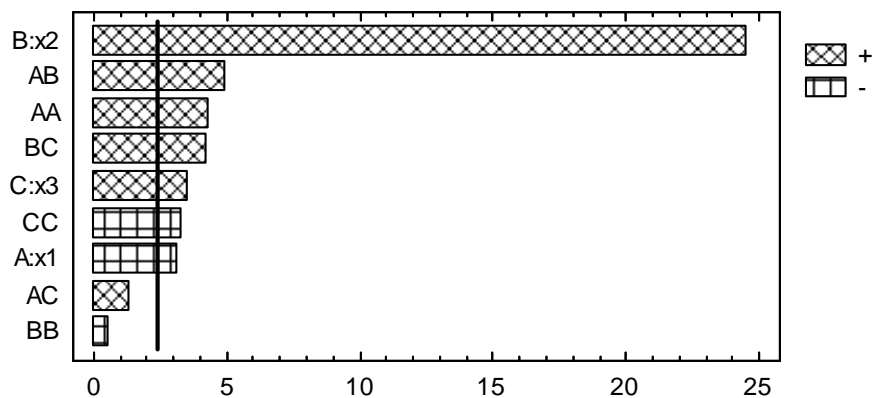


Рис.4.3.13. Діаграма значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії

З урахуванням значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (4.3.8), а також з урахуванням системи (4.3.1), перейдемо до іменованих значень, остаточно отримаємо

$$P = 8,13 - 0,24P_0 - 11,61R + 5,49\varphi + 1,58R^2 - 1,963\varphi^2 + 0,6P_0R + 0,652P_0\varphi. \quad (4.3.9)$$



На рис.4.3.14 представлена поверхня відгуку для віскозної комплексної нитки. Рівняння регресії для віскозної комплексної нитки буде мати вигляд

$$P = 10,98 - 0,38x_1 + 2,78x_2 + 0,54x_3 + 0,73x_1^2 + 0,63x_1x_2 + 0,064x_1x_3 - 0,145x_2^2 + 0,78x_2x_3 - 0,54x_3^2. \quad (4.3.10)$$

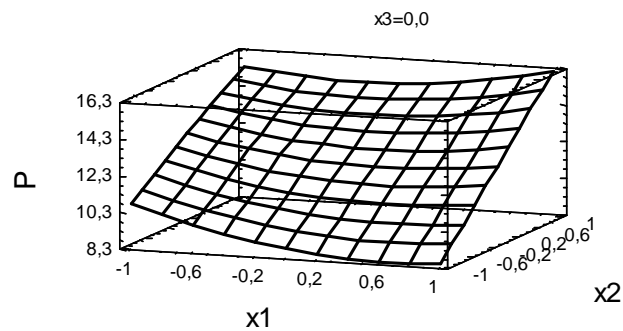


Рис.4.3.14.3. Поверхня відгуку

В результаті оцінки значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (4.3.10) отримаємо відповідну діаграму, яка представлена на рис.4.3.14. Аналіз даної діаграми показує, що не значущими коефіцієнтами будуть коефіцієнти при наступних комбінаціях:  $x_1x_3, x_2^2$ .

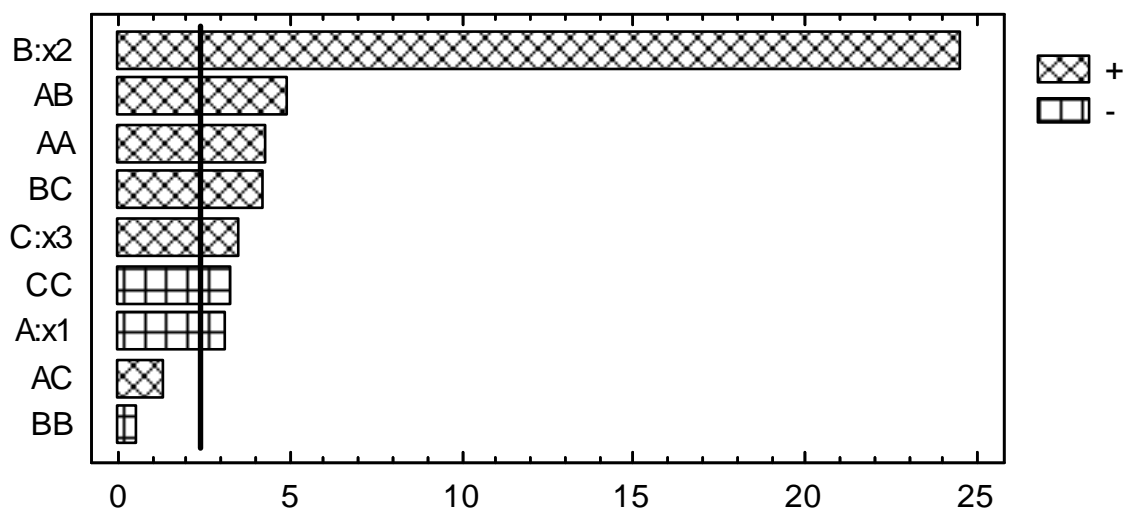


Рис.4.3.14. Діаграма значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії

З урахуванням значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (4.3.10), а також з урахуванням системи (4.3.1), перейдемо до іменованих значень, остаточно отримаємо

$$P = 10,09 - 0,644P_0 - 10,38R + 3,79\varphi + 1,46R^2 - 1,768\varphi^2 + 0,504P_0R + 0,789P_0\varphi. \quad (4.3.11)$$

Розрахунки по формулам (4.3.3), (4.3.5), (4.3.7), (4.3.9), (4.3.11) дозволили отримати масив даних (дивись додаток А), використовуючи який були побудовані графічні залежності що представлені на рис.4.3.16-4.3.18.

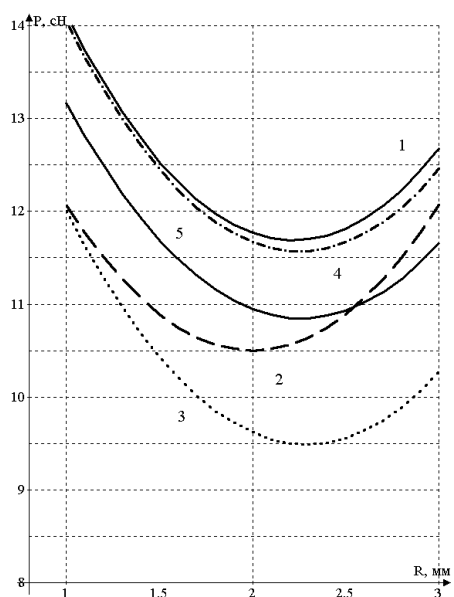


Рис.4.3.16. Залежність натягу ведучої гілки нитки від радіуса кривизни

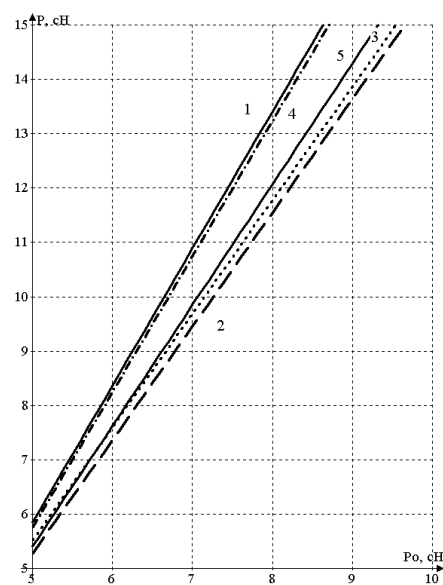


Рис.4.3.17. Залежність натягу ведучої гілки нитки від натягу веденої гілки нитки

Аналіз графічних залежностей на рис.4.3.16-4.3.18 показав, що при збільшенні натягу веденої гілки нитки натяг ведучої гілки зростає пропорційно. При збільшенні радіуса кривизни напрямної (рис.4.3.16) натяг спочатку зменшується, а далі починає зростати. Це пояснюється впливом зминання нитки в зоні контакту та її жорсткістю на вигин. При збільшенні кута охоплення (рис.4.3.18) простежується зворотна картина. Натяг спочатку збільшується, а далі починає спадати. Це пояснюється зміною величини коефіцієнта тертя [10, 35-37]. Ці результати необхідно враховувати при проектуванні технологічних процесів легкої та текстильної промисловості.

**Спільний вплив радіуса кривизни направляючої, натягу веденої гілки, кута охоплення на натяг ведучої гілки для направляючих малої кривизни**

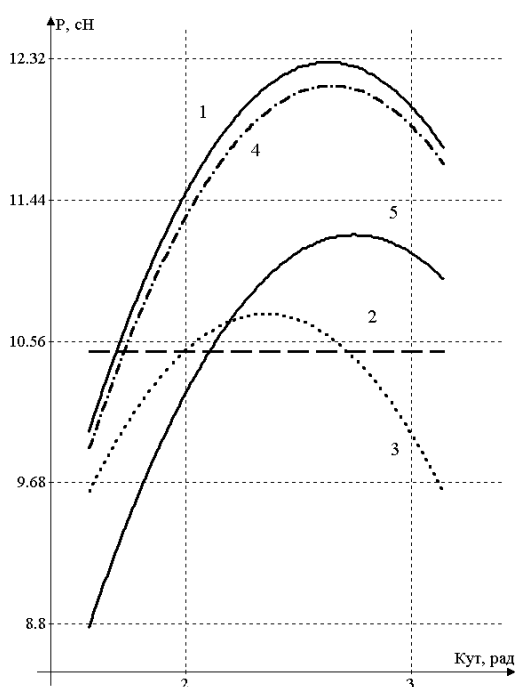


Рис.4.3.18. Залежність натягу ведучої гілки нитки від кута охоплення

Реалізуюючи план експериментальних досліджень (табл.4.3.3) за визначенням впливу радіусу кривизни направляючої поверхні, натягу веденої гілки нитки, кута охоплення на натяг ведучої гілки, для різних ниток (табл.4.3.1), нами було отримано ряд даних, представлених в таблиці 4.3.4.

При проведенні експерименту іменовані величини необхідно замінити на кодовані. В нашому випадку радіус кривизни напрямної  $R$  позначимо через  $x1$ . В нульовій точці радіус кривизни дорівнював 5 мм. Довжина плеча складала 2 мм. Натяг веденої гілки нитки  $P_0$  позначимо через  $x2$ . В нульовій точці натяг веденої гілки нитки дорівнює 10 сН. Довжина плеча складала 5 сН. Кут охоплення ниткою напрямної  $\varphi$  позначимо через  $x3$ . В нульовій точці кут охоплення ниткою напрямної дорівнює  $3\pi/4$ рад. Довжина плеча складала  $\pi/4$ рад.

Тоді система рівнянь для переходу від іменованих до кодованих значень чинників буде мати вигляд

$$x1 = \frac{R-5}{2}, \quad x2 = \frac{P_0-10}{5}, \quad x3 = \frac{\varphi - \frac{3\pi}{4}}{\frac{\pi}{4}}. \quad (4.3.12)$$

Таблиця 4.3.5

Спільний вплив радіусу кривизни направляючої, натягу веденої гілки, кута охоплення на натяг ведучої гілки для направляючих малої кривизни

Варіант	Натяг, сН	Варіант	Натяг, сН	Варіант	Натяг, сН	Варіант	Натяг, сН	Варіант	Натяг, сН
1-2- 1	18,34	2-2- 1	18,34	3-2- 1	17,89	4-2- 1	18,45	5-2- 1	18,11
1-2- 2	16,11	2-2- 2	9,52	3-2- 2	10,11	4-2- 2	9,35	5-2- 2	9,99
1-2- 3	18,32	2-2- 3	16,11	3-2- 3	15,91	4-2- 3	15,92	5-2- 3	16,14
1-2- 4	24,50	2-2- 4	22,20	3-2- 4	22,40	4-2- 4	24,70	5-2- 4	23,00

## Механіка нитки

1-2- 5	20,11	2-2- 5	16,53	3-2- 5	18,44	4-2- 5	19,11	5-2- 5	19,22
1-2- 6	12,08	2-2- 6	6,47	3-2- 6	6,58	4-2- 6	7,43	5-2- 6	7,77
1-2- 7	7,12	2-2- 7	5,89	3-2- 7	5,37	4-2- 7	5,99	5-2- 7	5,83
1-2- 8	9,14	2-2- 8	8,12	3-2- 8	7,24	4-2- 8	7,08	5-2- 8	6,95
1-2- 9	12,61	2-2- 9	12,49	3-2- 9	11,67	4-2- 9	10,44	5-2- 9	12,87
1-2- 10	14,55	2-2- 10	16,07	3-2- 10	14,82	4-2- 10	13,88	5-2- 10	17,69
1-2- 11	10,77	2-2- 11	9,33	3-2- 11	9,53	4-2- 11	9,19	5-2- 11	8,12
1-2- 12	17,38	2-2- 12	19,10	3-2- 12	18,12	4-2- 12	19,41	5-2- 12	18,41
1-2- 13	10,60	2-2- 13	12,25	3-2- 13	12,03	4-2- 13	11,12	5-2- 13	13,57
1-2- 14	21,10	2-2- 14	16,22	3-2- 14	17,55	4-2- 14	15,40	5-2- 14	17,88
1-2- 15	16,80	2-2- 15	15,00	3-2- 15	15,20	4-2- 15	16,40	5-2- 15	15,40

На рис.4.3.19 представлена поверхня відгуку для бавовняної пряжі.  
Рівняння регресії для бавовняної пряжі буде мати вигляд

$$P = 15,55 + 1,98x_1 + 4,01x_2 + 2,12x_3 - 0,63x_1^2 - 0,49x_1x_2 + 0,79x_1x_3 - 0,33x_2^2 - 0,205x_2x_3 + 0,74x_3^2. \quad (4.3.13)$$

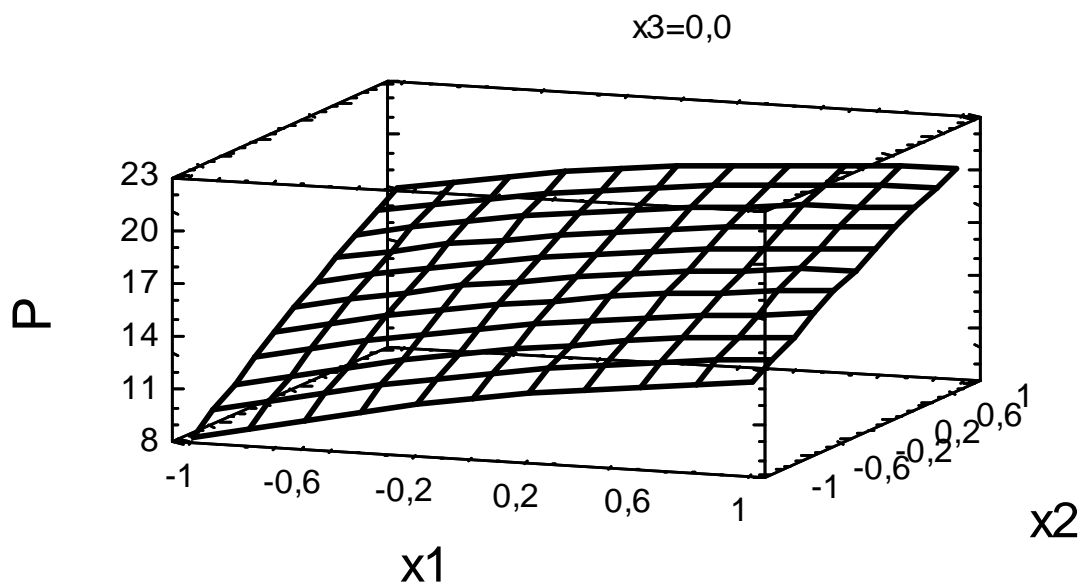


Рис.4.3.19. Поверхня відгуку

В результаті оцінки значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (4.3.10) отримаємо відповідну діаграму, яка представлена на рис.4.3.20. Аналіз даної діаграми показує, що значущими коефіцієнтами будуть коефіцієнти при наступних комбінаціях:  $x_1, x_2, x_3$ .

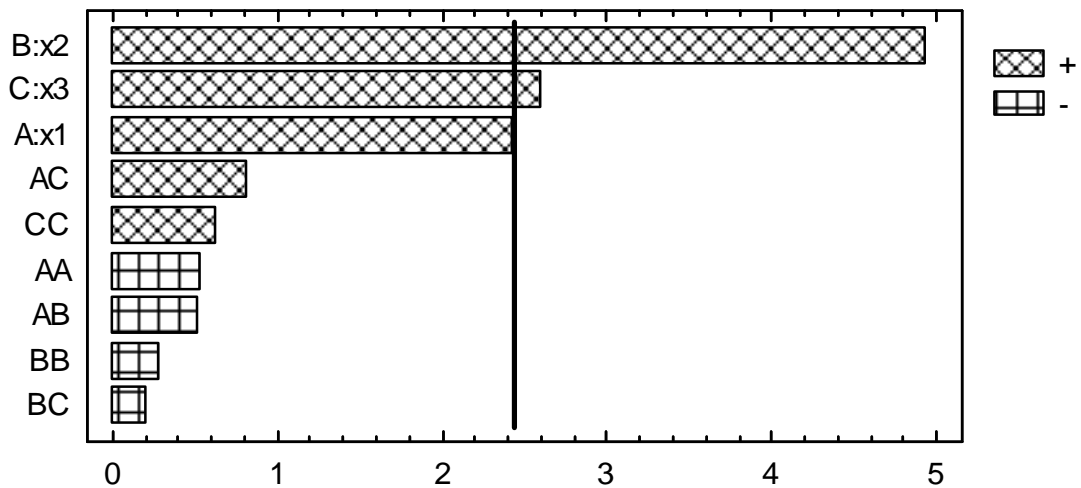


Рис.4.3.20. Діаграма значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії з урахуванням значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (4.3.13), а також з урахуванням системи (4.3.12), перейдемо до іменованих значень, остаточно отримаємо

$$P = 1,602P_0 + 1,98R + 5,4\varphi - 23,09. \quad (4.3.14)$$

На рис.4.3.21 представлена поверхня відгуку для вовняної пряжі. Рівняння регресії для вовняної пряжі буде мати вигляд

$$P = 15,29 + 0,96x_1 + 4,93x_2 + 1,62x_3 - 0,75x_1^2 + 0,29x_1x_2 + 0,53x_1x_3 - 0,79x_2^2 + 0,33x_2x_3 - 0,77x_3^2. \quad (4.3.15)$$

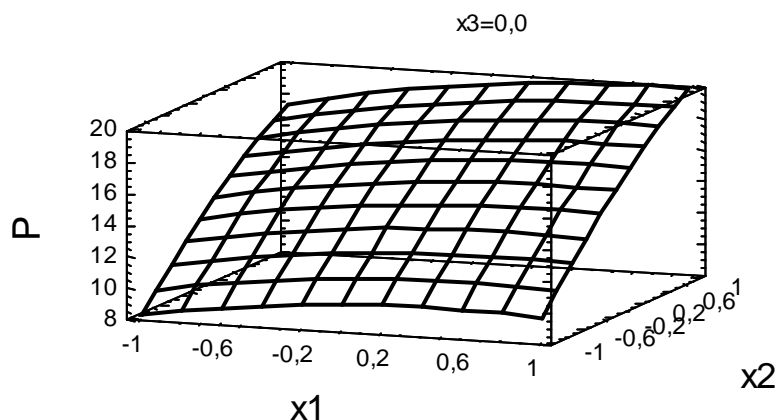


Рис.4.3.21. Поверхня відгуку

В результаті оцінки значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (4.3.15) отримаємо відповідну діаграму, яка представлена на рис.4.3.22. Аналіз даної діаграми показує, що значущими коефіцієнтами будуть коефіцієнти при наступних комбінаціях:  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ .

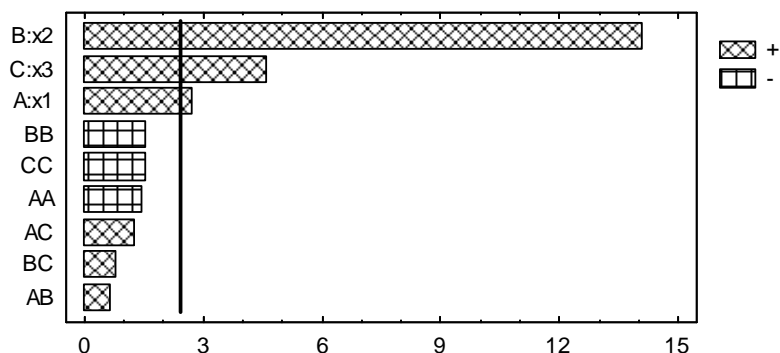


Рис.4.3.22. Діаграма значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії

З урахуванням значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (4.3.15), а також з урахуванням системи (4.3.12), перейдемо до іменованих значень, остаточно отримаємо

$$P = 1,97P_0 + 0,96R + 4,12\varphi - 18,92. \quad (4.3.16)$$

На рис.4.3.23 представлена поверхня відгуку для лавсанової комплексної нитки. Рівняння регресії для лавсанової комплексної нитки буде мати вигляд

$$P = 15,18 + 1,34x_1 + 4,99x_2 + 1,63x_3 - 1,16x_1^2 + 0,37x_1x_2 + 0,46x_1x_3 - 0,81x_2^2 + 0,07x_2x_3 - 0,23x_3^2. \quad (4.3.17)$$

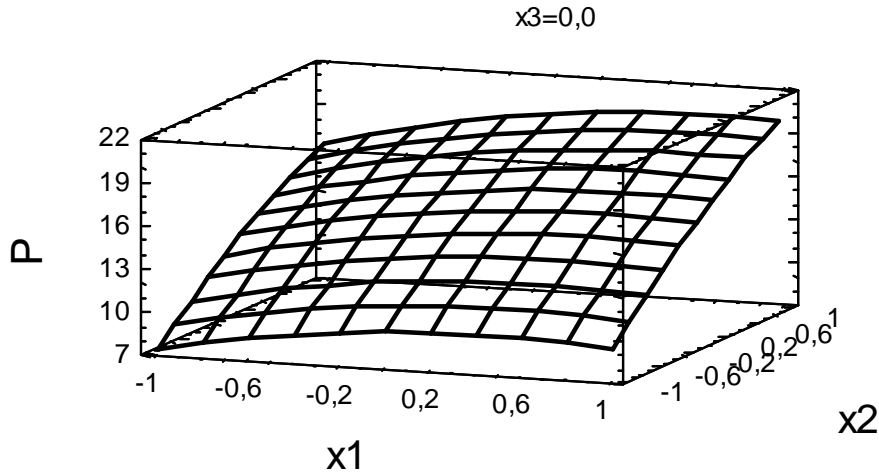


Рис.4.3.23. Поверхня відгуку

В результаті оцінки значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (4.3.17) отримаємо відповідну діаграму, яка представлена на рис.4.3.24.3. Аналіз даної діаграми показує, що значущими коефіцієнтами будуть коефіцієнти при наступних комбінаціях:  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ .

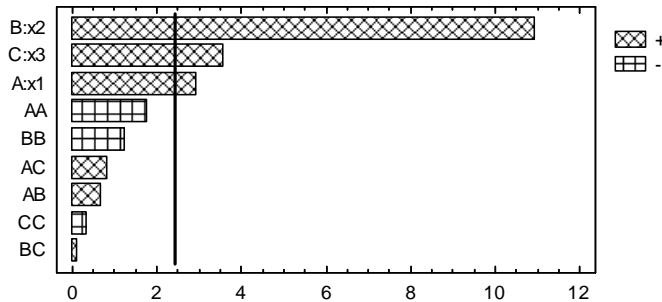


Рис.4.3.24.3. Діаграма значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії  
З урахуванням значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (4.3.17), а також з урахуванням системи (4.3.12), перейдемо до іменованих значень, остаточно отримаємо

$$P = 1,99P_0 + 1,34R + 4,15\varphi - 21,24. \quad (4.3.18)$$

На рис.4.3.25 представлена поверхня відгуку для капронової комплексної



нитки. Рівняння регресії для капронової комплексної нитки буде мати вигляд

$$P = 15,26 + 1,55x_1 + 5,44x_2 + 1,47x_3 - 1,35x_1^2 + 0,72x_1x_2 + 0,49x_1x_3 - 0,06x_2^2 + 0,64x_2x_3 - 0,69x_3^2. \quad (4.3.19)$$

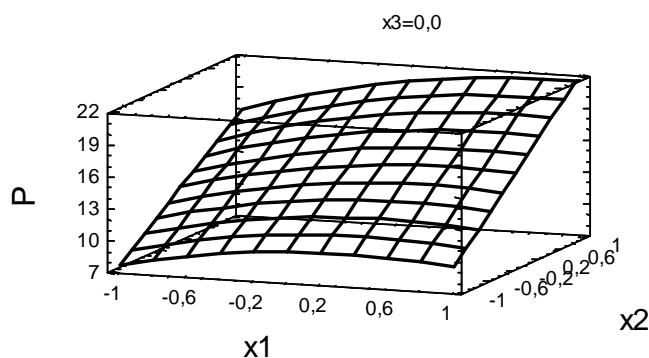


Рис.4.3.24. Поверхня відгуку

В результаті оцінки значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (4.3.19) отримуємо відповідну діаграму, яка представлена на рис.4.3.26. Аналіз даної діаграми показує, що значущими коефіцієнтами будуть коефіцієнти при наступних комбінаціях:  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ .

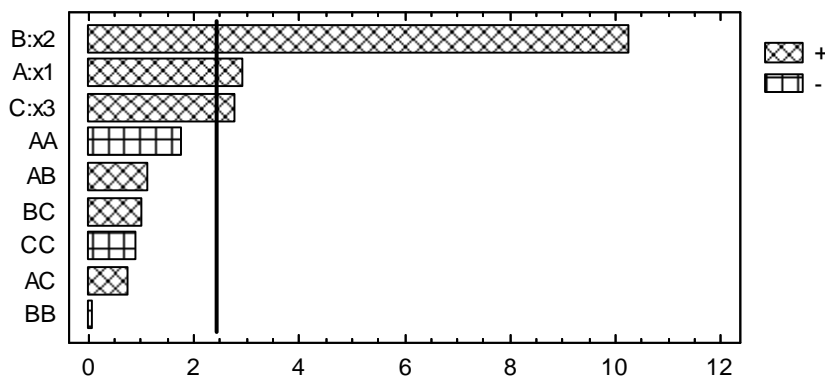


Рис.4.3.26. Діаграма значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії

З урахуванням значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (4.3.19), а також з урахуванням системи (4.3.12), перейдемо до іменованих значень, остаточно отримаємо

$$P = 2,17P_0 + 1,56R + 3,75\varphi - 23,08. \quad (4.3.20)$$

На рис.4.3.27 представлена поверхня відгуку для віскозної комплексної

нитки. Рівняння регресії для віскозної комплексної нитки буде мати вигляд

$$P = 15,75 + 1,69x_1 + 5,23x_2 + 1,29x_3 - 0,44x_1^2 + 0,37x_1x_2 + 0,36x_1x_3 - 1,66x_2^2 + 0,30x_2x_3 - 0,17x_3^2. \quad (4.3.21)$$

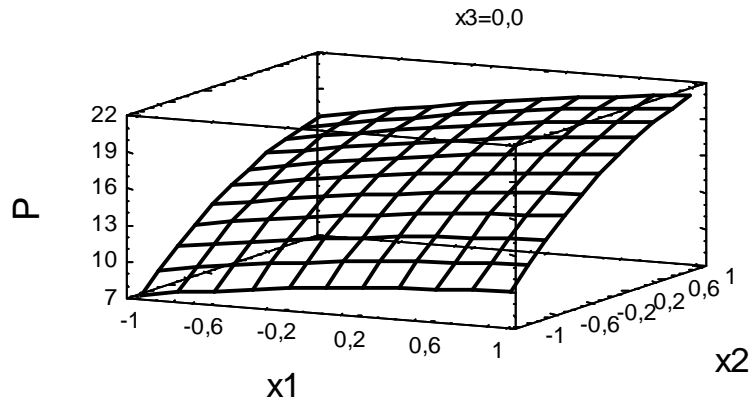


Рис.4.3.27. Поверхня відгуку

В результаті оцінки значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (4.3.21) отримаємо відповідну діаграму, яка представлена на рис.4.3.28. Аналіз даної діаграми показує, що значущими коефіцієнтами будуть коефіцієнти при наступних комбінаціях:  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_2^2$ .

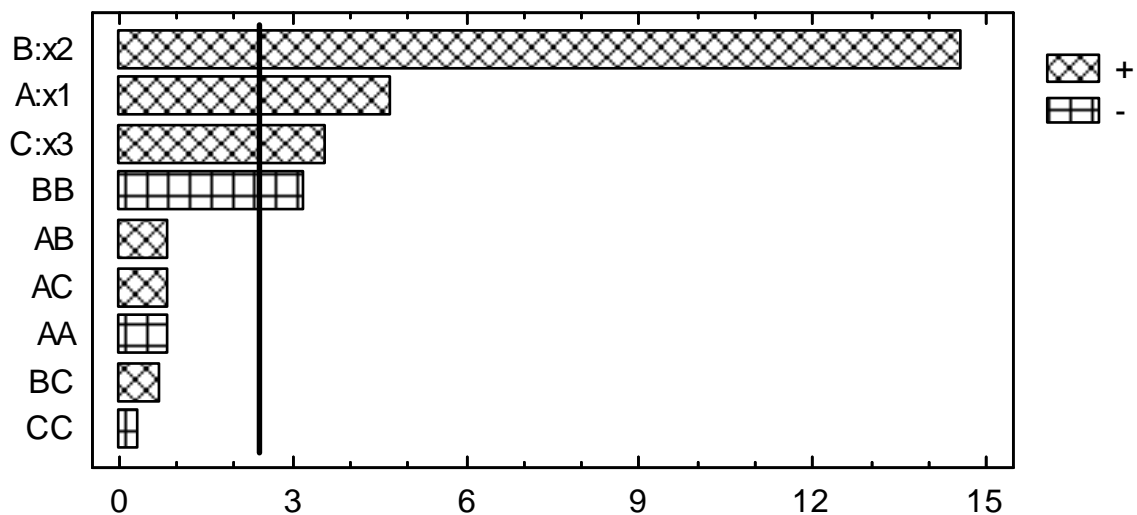


Рис.4.3.28. Діаграма значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії

З урахуванням значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (4.3.21), а також

з урахуванням системи (4.3.12), перейдемо до іменованих значень, остаточно отримаємо

$$P = 4,74P_0 + 1,69R + 3,29\varphi - 0,132P_0^2 - 34,66. \quad (4.3.22)$$

Розрахунки по формулам (4.3.14), (4.3.16), (4.3.18), (4.3.20), (4.3.22) дозволили отримати масив даних (дивись додаток А), використовуючи який були побудовані графічні залежності представлені на рис.4.3.29-4.3.31.

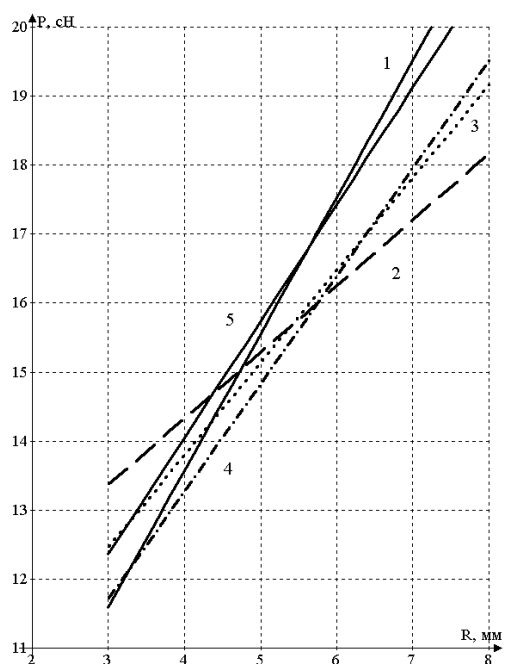


Рис.4.3.29. Залежність натягу ведучої гілки нитки від радіусу кривизни

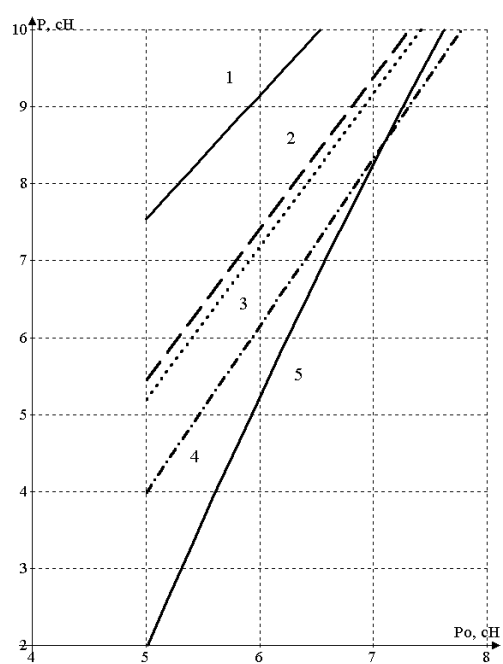


Рис.4.3.30. Залежність натягу ведучої гілки нитки від натягу веденої гілки нитки

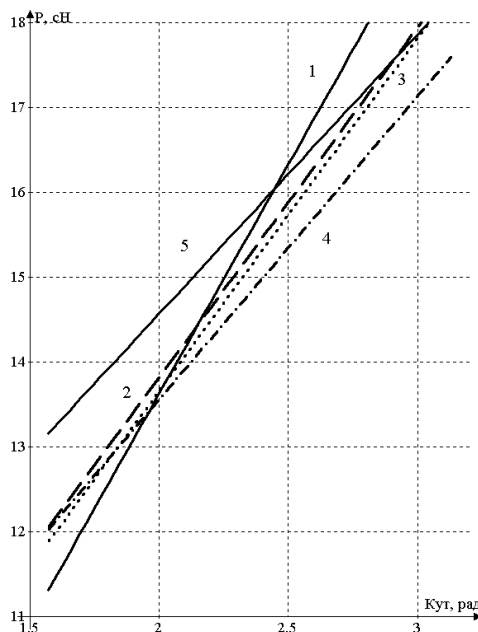


Рис.4.3.31. Залежність натягу ведучої гілки нитки від кута охоплення

Аналіз графічних залежностей на рис.4.3.29-4.3.31 показав, що при збільшенні радіусу кривизни, натягу веденої гілки нитки, кута охоплення натяг ведучої гілки зростає пропорційно.

#### **4.4. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТЕКСТИЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ МІНІМІЗАЦІЇ НАТЯГУ ПРУЖНОЇ СИСТЕМИ ЗАПРАВКИ**

Збільшення випуску продукції підприємствами легкої і текстильної промисловості України повинне проводитися на основі їх технічного переозброєння і реконструкції, модернізації устаткування, впровадження нових високопродуктивних технологічних процесів і засобів комплексної механізації.

Підвищення продуктивності технологічного устаткування в легкій і текстильній промисловості нерозривно пов'язане із зменшенням часу простоїв на ліквідацію обриву ниток. Обриви ниток обумовлені низькою

якістю початкової сировини, недосконалістю окремих вузлів і механізмів, системи ниткоподачі і форми ниткотракту.

Обриви ниток (так звані технологічні відмови) складають до 30% від сумарного часу відновлення всіх відмов технологічного устаткування. Число технологічних відмов унаслідок обривності складає до 80% від їх загального числа.

Таким чином, мінімізація натягу пружної системи заправки технологічного обладнання є актуальною темою, яка має велике значення для удосконалення як технологічних процесів так і обладнання.

### Удосконалення системи ниткоподачі ткацьких верстатів

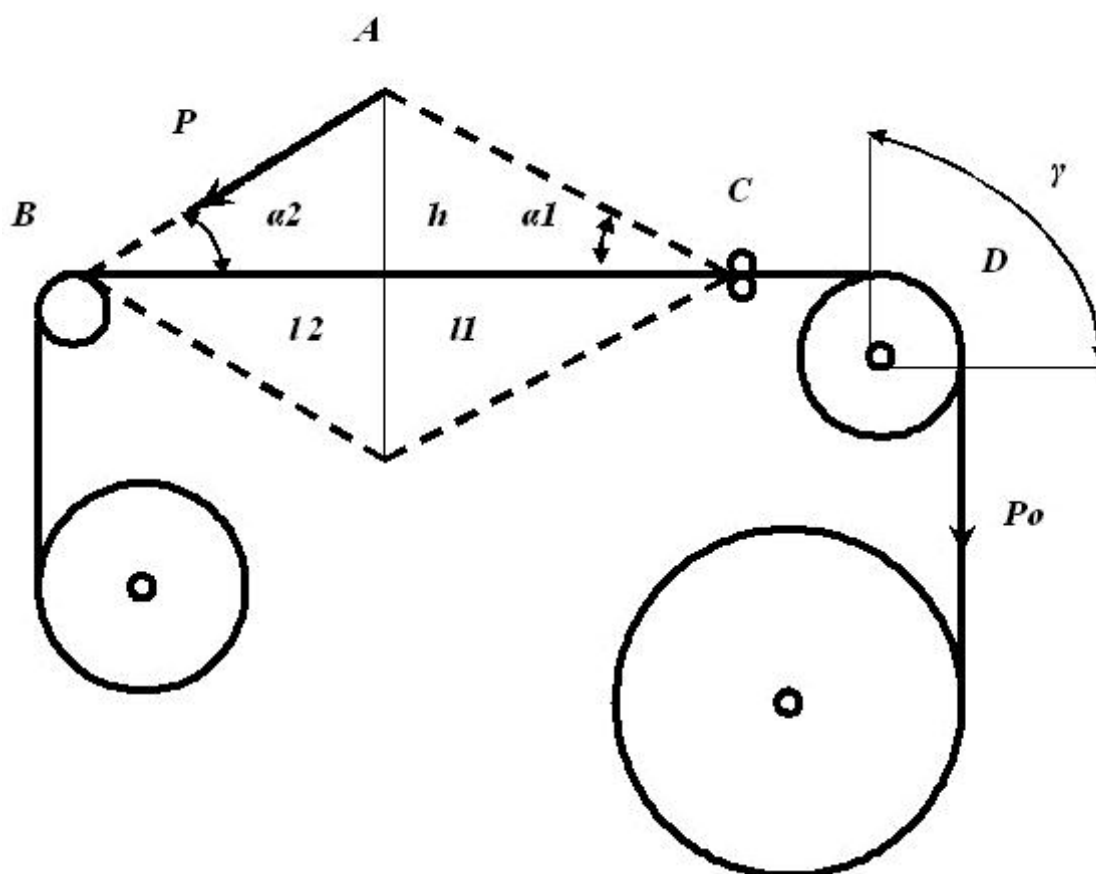


Рис.4.4.1. Схема пружної заправки ткацького верстата

Схема пружної заправки ткацького верстата наведена на рис.4.4.1. Нитка, сходячи з навою, охоплює скало D, проходить ламелі C та, проходячи крізь очка A галев ремізних рамок, надходить в зону B

формування тканини. Після формування тканини вона, проходячи крізь вальєн, намотується на товарний валик. В процесі ткацтва, за рахунок вертикального руху очок А галев ремізних рамок, створюється зів, в який прокладається уточна нитка.

Нитка має попередній натяг  $P_0$ . Огинаючи скало D під кутом  $\gamma$  вона поступає в зевотворюючий пристрій, де величина натягу зростає до  $P$ . Знайдемо закон зміни натягу при цьому. На ділянці DC натяг будемо визначати за формулою [1, 10]

$$P_1 = P_0 e^{\mu_1 \gamma}, \quad (4.4.1)$$

де  $P_1$  - натяг нитки після скала D;

$\mu_1$  - коефіцієнт тертя нитки по поверхні скала.

В подальшому зростання натягу буде здійснюватися за рахунок розтягання нитки при зевотворюванні та відносному ковзанні в очках галев ремізних рамок.

Визначимо поточну величину натягу при зевотворюванні. Очевидно, що це зростання можна визначити за формулою [1-13]

$$P_Z = C_0 \Delta L_0, \quad (4.4.2)$$

де  $P_Z$  - натяг нитки при зевотворюванні;

$C_0$  - коефіцієнт жорсткості основних ниток;

$\Delta L_0$  - деформація основних ниток при зевотворюванні.

Остання величина може бути визначена з наступної системи рівнянь (див.рис.4.4.1)

$$\begin{aligned} l_{AB} &= \sqrt{l_2^2 + h(t)^2}, & l_{AC} &= \sqrt{l_1^2 + h(t)^2}, \\ L_{BAC} &= \sqrt{l_2^2 + h(t)^2} + \sqrt{l_1^2 + h(t)^2}, & (4.4.3) \\ \Delta L_0 &= L_{BAC} - (l_1 + l_2) = \sqrt{l_2^2 + h(t)^2} + \sqrt{l_1^2 + h(t)^2} - (l_1 + l_2), \end{aligned}$$

де  $h(t)$  - поточне значення вертикального зміщення очка галева ремізної рамки;

$t$  - час;

$l_1, l_2$  - винос та глибина зева.

Тоді значення поточної величини натягу при зевотворюванні, з урахуванням (4.4.2),(4.4.3), буде мати вигляд

$$P_Z = C_O [\sqrt{l_2^2 + h(t)^2} + \sqrt{l_1^2 + h(t)^2} - (l_1 + l_2)]. \quad (4.4.4)$$

Зростання натягу нитки за рахунок руху відносно поверхні очка галева ремісної рамки можна визначити за формулою [121]

$$P = P_\Sigma \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} (e^{\mu_2 \alpha} - 1) \right] + \left[ \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}{2[R+r(1-\delta)]^2} \right] - \left[ \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1 K^{u_2})}}{2[R+r(1-\delta_0)]^2} \right] \times \\ \times \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} (e^{\mu_2 \alpha} - 1) \right].$$

де  $\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{j(K)}$  - коефіцієнт жорсткості нитки на згин;

$E$  - модуль пружності нитки на розтягнення;

$d_i$  - діаметри окремих елементарних волокон (філаментів), з яких складається комплексна нитка чи пряжа;

$w$  - кількість філаментів, з яких складається пряжа;

$j(K) = 1 + u_1 K^{u_2}$ , - коефіцієнт, який залежить від крутки  $K$  нитки;

$\delta, \delta_0$  - відносна деформація перетину нитки в точках її сходу та входу на напрямну;

$u_1, u_2$  - деякі сталі коефіцієнти;

$R$  - радіус поверхні очка галева ремісної рамки;

$r$  - розрахунковий радіус нитки;

$\mu_2$  - коефіцієнт тертя між ниткою та поверхнею очка галева ремісної рамки;

$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$  - кут охоплення поверхні очка галева ремісної рамки;

$P_\Sigma = P_1 + P_Z$  - попередній натяг.

Для текстильних ниток, коефіцієнтом жорсткості на вигин яких можна знехтувати  $B=0$ , отримаємо

$$P = P_{\Sigma} \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} (e^{\mu_2 \alpha} - 1) \right]. \quad (4.4.5)$$

Величину кута  $\alpha$ , який входить до формули (4.4.5), визначимо по формулі

$$\alpha_1 = \operatorname{arctg} \left[ \frac{h(t)}{l_1} \right], \quad \alpha_2 = \operatorname{arctg} \left[ \frac{h(t)}{l_2} \right]. \quad (4.4.6)$$

Тоді значення натягу нитки  $P$ , з урахуванням (4.4.1), (4.4.4), (4.4.5)-(4.4.6), прийме вигляд

$$P = \left\{ P_O e^{\mu_1 \gamma} + C_O \left[ \sqrt{l_2^2 + h(t)^2} + \sqrt{l_1^2 + h(t)^2} - (l_1 + l_2) \right] \right\} \times \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} \left( e^{\mu_2 \left\{ \operatorname{arctg} \left[ \frac{h(t)}{l_1} \right] + \operatorname{arctg} \left[ \frac{h(t)}{l_2} \right] \right\}} - 1 \right) \right]. \quad (4.4.7)$$

На рис.4.4.2 та в Додатках представлені результати визначення натягу ниток основи. Вихідні дані бралися для ткацького верстата АТТ-120-5М і дорівнювали (розрахунки проводилися для однієї нитки в заправці):  $P_O = 50$  сН;  $\gamma = 1,57$  рад.;  $\mu_1 = 0,2$ ;  $\mu_2 = 0,4$ ;  $t = 0..0,314$  с (для кутової швидкості головного вала верстата  $\omega = 20$  с<sup>-1</sup>);  $l_1 = 300$  мм;  $l_2 = 400$  мм;  $C_O = 2$  сН/мм;  $h = h_{max} = 100$  мм.

На рис.4.4.2 крива 1 показує зміну натягу основних ниток в процесі зевотворювання. Пряма 2 показує значення попереднього натягу. Аналіз графічної залежності 1 дозволяє стверджувати, що максимальне зростання натягу під час зевотворювання майже в 3 рази більше ніж попередній натяг нитки основи.

Це може призводити до обриву основи, що негативно впливає на продуктивність технологічного обладнання та якість продукції.

Для мінімізації натягу основи в процесі ткацтва в роботі була запропонована конструкція нитконапрямного пристрою ткацького верстата [10]. На рис.4.4.3 представлена його кінематична схема.

Нитконапрямник ткацького верстата містить кривошип ОА, шарнірно закріплений зі станиною, два шатуна ВС, CD, шатун ВС шарнірно з'єднаний з кривошипом ОА, повзунком В, встановленим в горизонтальних



направляючих, та шатуном CD. Шатун CD шарнірно з'єднаний з шатуном BC та повзунком D (скало ткацького верстата), встановленим в горизонтальних направляючих.

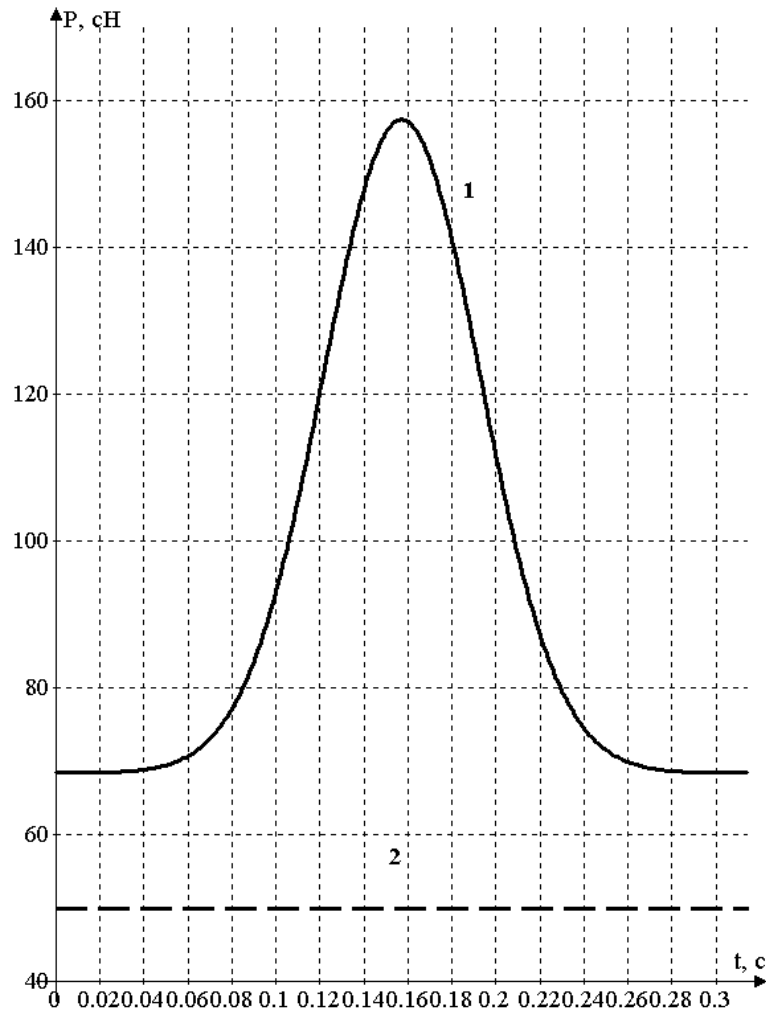


Рис.4.4.2. Графічні залежності натягу основної нитки

Нитконапрямок ткацького верстата працює наступним чином. Кривошип OA отримує обертальний рух від головного валу станка через трансмісію. Він передає рух повзунку D, який виконує зворотно-поступальний рух. Вибір розмірів шатунів BC, CD та кривошипу OA в певній пропорції дозволяє забезпечити висотою повзунка D в крайньому правому положенні в момент прокладання уточної нитки (точка шарнірного з'єднання кривошипа з першим шатуном ділить його у відношенні 3/2,5, а довжина другого шатуна

більше довжини кривошипа в 3,5 разів).

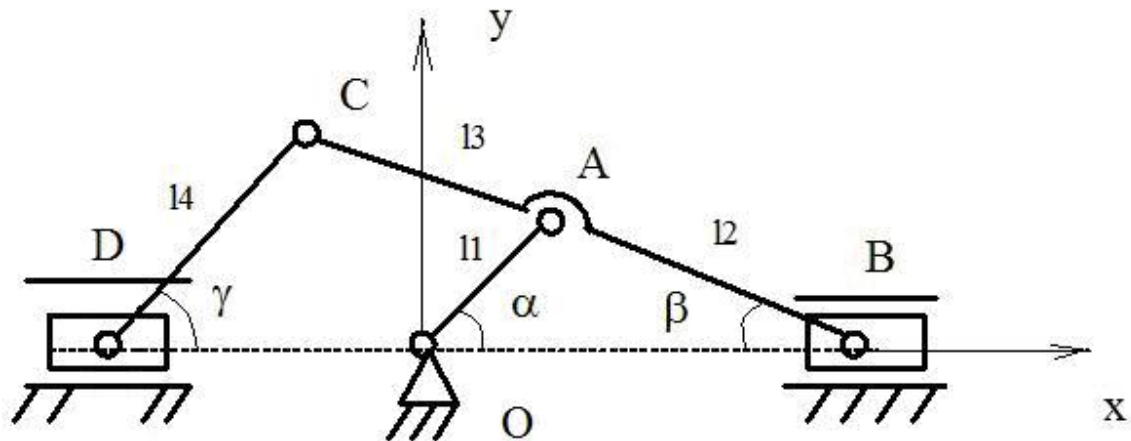


Рис.4.4.3. Кінематична схема нитконапрячника ткацького верстата

Використання даного нитконапрячника, дозволяє стабілізувати натяг ниток основи при зевоутворенні за рахунок забезпечення необхідної функції ниткоподачі, що дає змогу виключити можливість обриву ниток. Використання запропонованого нитконапрячника ткацького верстата дозволяє стабілізувати натяг ниток основи при зевоутворенні за рахунок забезпечення необхідної функції ниткоподачі, що дозволяє вдосконалити технологічні процеси та обладнання текстильної промисловості.

Проведемо кінематичний аналіз роботи даного механізму. Для зручності подальших розрахунків визначимо координати і траєкторії руху точок механізму нитконапрячника ткацького верстата. Для цього розташуємо початок координатної системи  $OXY$  у точці  $O$  – шарніра кріплення кривошипа  $OA$ .

Координати точки  $A$  визначаються по формулах

$$x_A(\alpha) = l_1 \cos(\alpha), \quad y_A(\alpha) = l_1 \sin(\alpha), \quad (4.4.8)$$

де  $x_A(\alpha)$ ,  $y_A(\alpha)$ - координати шарніра  $A$ ;

$l_1$ - довжина кривошипа  $OA$ ;

$\alpha$  - кут повороту кривошипа  $OA$ .

Для визначення координат точки  $B$  прирівняємо вертикальні проекції

кривошипа ОА і ділянки шатуна АВ

$$l_1 \sin(\alpha) = l_2 \sin(\beta),$$

де  $\beta$  - кут нахилу шатуна СВ до горизонтальної осі.

Зведемо праву і ліву частини останнього рівняння в квадрат і визначимо вираз для визначення кута  $\beta$

$$\cos(\beta) = \sqrt{1 - \frac{l_1^2}{l_2^2} \sin^2(\alpha)}. \quad (4.4.9)$$

З урахуванням останньої рівності вираз для визначення координати точки В повзуна визначиться з виразу

$$x_B(\alpha) = l_1 \cos(\alpha) + l_2 \sqrt{1 - \frac{l_1^2}{l_2^2} \sin^2(\alpha)}. \quad (4.4.10)$$

Координати точки С, з урахуванням (4.2), можна визначити по формулах

$$x_C(\alpha) = - \left[ (l_2 + l_3) \sqrt{1 - \frac{l_1^2}{l_2^2} (\sin^2(\alpha) - x_B(\alpha))} \right], \quad (4.4.11)$$

$$y_C(\alpha) = (l_2 + l_3) \frac{l_1 \sin(\alpha)}{l_2},$$

де  $x_C(\alpha), y_C(\alpha)$  - координати точки С.

Для визначення координат точки D прирівняємо вертикальні проекції шатуна СВ і шатуна CD

$$l_4 \sin(\gamma) = (l_2 + l_3) \sin(\beta), \quad (4.4.12)$$

де  $\gamma$  - кут нахилу шатуна CD до горизонтальної осі.

Тоді, формула для визначення кута  $\gamma$ , після зведення в квадрат лівої і правої частин рівності (4.4.12), матиме вигляд

$$\cos(\gamma) = \sqrt{1 - \frac{(l_2 + l_3)^2 l_1^2}{l_4^2 l_2^2} \sin^2(\alpha)}. \quad (4.4.13)$$

З урахуванням виразів (4.4.12) -(4.4.13) переміщення точки D визначається по формулі

$$x_D(\alpha) = - \left[ l_4 \sqrt{1 - \frac{(l_2 + l_3)^2 l_1^2}{l_4^2 l_2^2} (\sin^2(\alpha) + (l_2 + l_3))} \sqrt{1 - \frac{l_1^2}{l_2^2} (\sin^2 \alpha - x_B(\alpha))} \right], \quad (4.4.14)$$

де  $x_D(\alpha)$  - координата переміщення точки D.

Використовуючи формули (4.4.8) -(4.4.14) були побудовані графіки зміни координат точок B, C и D, які представлені на рис.4.4.4.

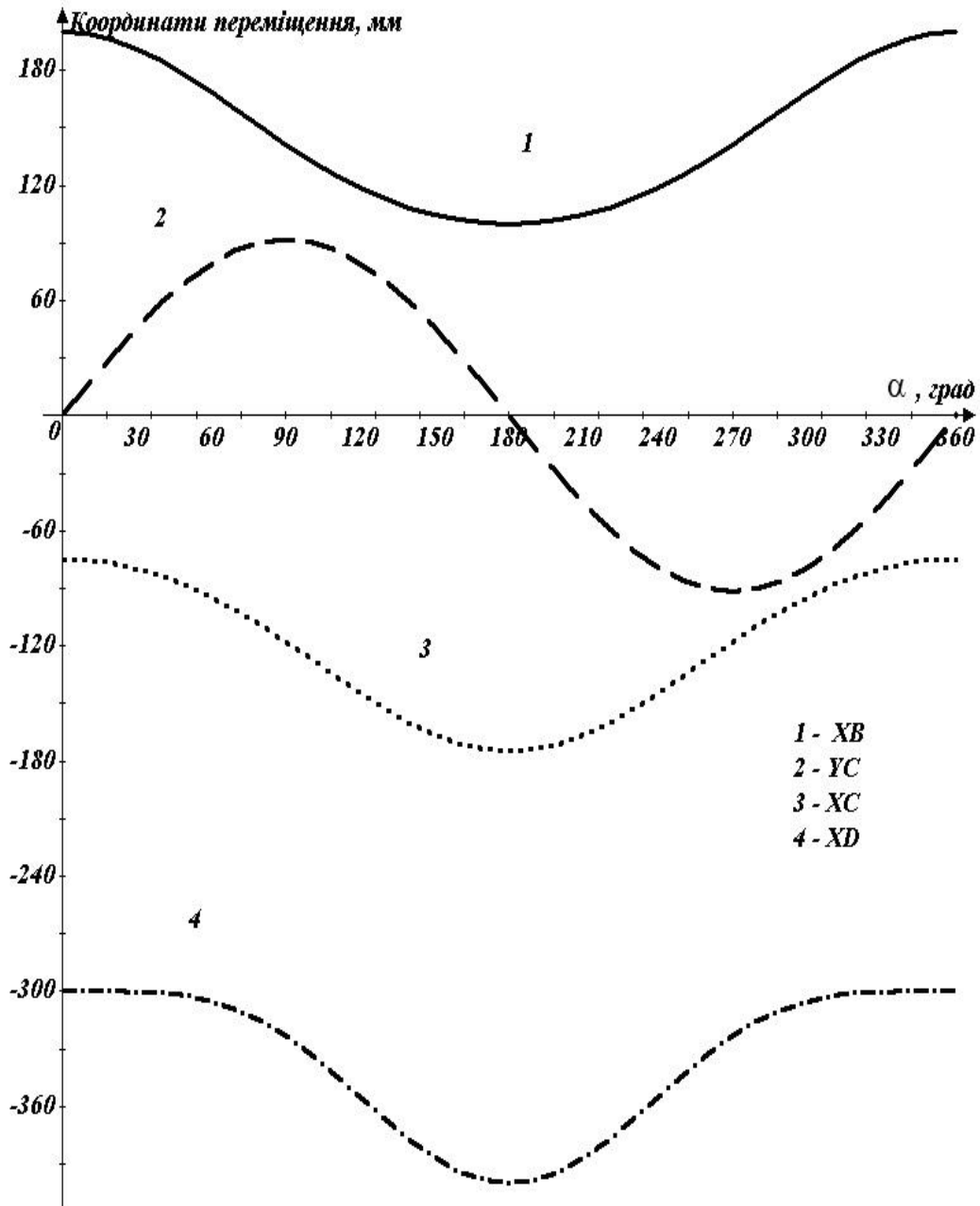


Рис.4.4.4.Графіки зміни координат точок B, C і D

Для визначення швидкості точки B продиференціюємо за часом вираз

(4.4.10). В результаті отримаємо

$$V_B(t) = -\frac{\omega l_1^2 \cos(\omega t) \sin(\omega t)}{l_2 \sqrt{1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2^2}}} - \omega l_1 \sin(\omega t), \quad (4.4.15)$$

де  $V_B(t)$  - швидкість точки В залежно від часу повороту кривошипа.

Для визначення проєкцій вектора швидкості точки С на координатні осі  $X, Y$  продиференціюємо вираз (4.4.11) за часом. Після цього отримаємо систему рівнянь

$$V_{CX}(t) = \frac{\omega l_1^2 \cos(\omega t) \sin(\omega t) (l_2 + l_3)}{l_2^2 \sqrt{1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2^2}}} - \frac{\omega l_1^2 \cos(\omega t) \sin(\omega t)}{l_2^2 \sqrt{1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2^2}}} - \omega l_1 \sin(\omega t), \quad (4.4.16)$$

$$V_{CY}(t) = \frac{\omega l_1 \cos(\omega t) (l_2 + l_3)}{l_2},$$

де  $V_{CX}(t), V_{CY}(t)$  - відповідно проєкції вектора швидкості точки С на координатні осі  $X, Y$ .

Величина швидкості точки С визначиться по формулі

$$V_C = \sqrt{V_{CX}^2(t) + \left[ \frac{\omega l_1 \cos(\omega t) (l_2 + l_3)}{l_2} \right]^2}, \quad (4.4.17)$$

де  $V_C$  - швидкість точки С.

Для визначення швидкості точки D продиференціюємо за часом вираз (4.4.14). В результаті отримаємо

$$V_D(t) = \frac{\omega l_1^2 \cos(\omega t) \sin(\omega t) (l_2 + l_3)}{l_2^2 \sqrt{1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2^2}}} - \frac{\omega l_1^2 \cos(\omega t) \sin(\omega t)}{l_2 \sqrt{1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2^2}}} - \omega l_1 \sin(\omega t) + \frac{\omega l_1^2 \cos(\omega t) \sin(\omega t) (l_2 + l_3)^2}{l_2^2 l_4 \sqrt{1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t) (l_2 + l_3)^2}{l_2^2 l_4^2}}}, \quad (4.4.18)$$

де  $V_D(t)$  - швидкість точки D залежно від часу повороту кривошипа ОА.

Використовуючи залежності (4.4.15) -(4.4.18) були побудовані графічні

залежності, які представлені на рис.4.4.4.4.

Крива 1 відповідає швидкості точки С. Крива 2 відповідає швидкості точки В. Крива 3 відповідає швидкості точки D. Аналіз отриманих кривих показує, що для точки D на ділянці траєкторії точки С, коли вона рухається по колу радіусу CD швидкість дорівнює нулю.

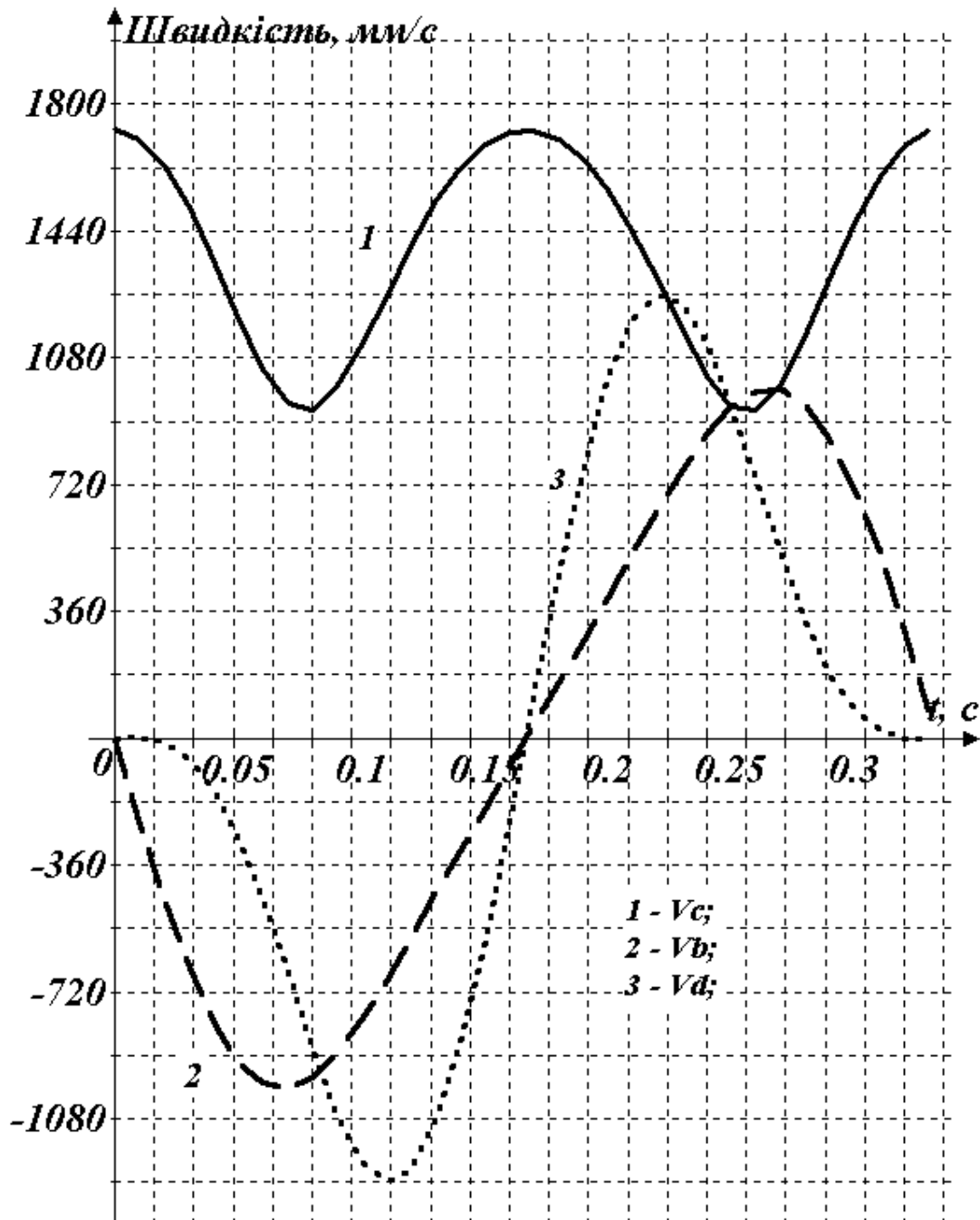


Рис.4.4.4.4. Графічні залежності зміни швидкостей точок механізму нитконапрямника

Для визначення прискорення точки В продиференціюємо за часом вираз (4.4.15). В результаті отримаємо

$$W_B(t) = \frac{\omega^2 l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2 \sqrt{1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2^2}}} - \frac{\omega^2 l_1^2 \cos^2(\omega t)}{l_2 \sqrt{1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2^2}}} - \omega^2 l_1 \cos(\omega t) - \frac{\omega^2 l_1^4 \cos^2(\omega t) \sin^2(\omega t)}{l_2^3 \left(1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2^2}\right)^{\frac{3}{2}}}, \quad (4.4.19)$$

де  $W_B(t)$  - прискорення точки В залежно від часу повороту кривошипа ОА.

Для визначення проєкцій вектора прискорення точки С на координатні осі  $X, Y$  продиференціюємо вираз (4.4.16) за часом. Після цього отримаємо систему рівнянь

$$W_{CX}(t) = \frac{\omega^2 l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2 \sqrt{1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2^2}}} - \frac{\omega^2 l_1^2 \cos^2(\omega t)}{l_2 \sqrt{1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2^2}}} - \omega^2 l_1 \cos(\omega t) + \frac{\omega^2 l_1^2 \cos^2(\omega t)(l_2 + l_3)}{l_2^2 \sqrt{1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2^2}}} - \frac{\omega^2 l_1^2 \sin^2(\omega t)(l_2 + l_3)}{l_2^2 \sqrt{1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2^2}}} - \frac{\omega^2 l_1^4 \cos^2(\omega t) \sin^2(\omega t)}{l_2^3 \left(1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2^2}\right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{\omega^2 l_1^4 \cos^2(\omega t) \sin^2(\omega t)(l_2 + l_3)}{l_2^4 \left(1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2^2}\right)^{\frac{3}{2}}}, \quad (4.4.20)$$

$$W_{CY}(t) = -\frac{\omega^2 l_1 \sin(\omega t)(l_2 + l_3)}{l_2}.$$

де  $W_{CX}(t), W_{CY}(t)$  - відповідно проєкції прискорення точки С на осі  $X, Y$  в залежності від часу повороту кривошипа ОА.

Величина прискорення точки С визначиться по формулі

$$W_C(t) = \sqrt{W_{CX}^2 + \left[\frac{\omega^2 l_1 \sin(\omega t)(l_2 + l_3)}{l_2}\right]^2}. \quad (4.4.21)$$

Для визначення прискорення точки D продиференціюємо за часом вираз (4.4.18). В результаті отримаємо

$$\begin{aligned}
 W_D(t) = & -\frac{\omega^2 l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2 \sqrt{1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2^2}}} - \frac{\omega^2 l_1^2 \cos^2(\omega t)}{l_2 \sqrt{1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2^2}}} - \omega^2 l_1 \cos(\omega t) + \\
 & + \frac{\omega^2 l_1^2 \cos^2(\omega t)(l_2 + l_3)}{l_2^2 \sqrt{1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2^2}}} - \frac{\omega^2 l_1^2 \sin^2(\omega t)(l_2 + l_3)}{l_2^2 \sqrt{1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2^2}}} - \\
 & - \frac{\omega^2 l_1^4 \cos^2(\omega t) \sin^2(\omega t)}{l_2^3 \left(1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2^2}\right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{\omega^2 l_1^4 \cos^2(\omega t) \sin^2(\omega t)(l_2 + l_3)}{l_2^4 \left(1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)}{l_2^2}\right)^{\frac{3}{2}}} + \\
 & + \frac{\omega^2 l_1^2 \cos^2(\omega t)(l_2 + l_3)^2}{l_2^2 l_4 \sqrt{1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)(l_2 + l_3)^2}{l_2^2 l_4^2}}} - \frac{\omega^2 l_1^2 \sin^2(\omega t)(l_2 + l_3)^2}{l_2^2 l_4 \sqrt{1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)(l_2 + l_3)^2}{l_2^2 l_4^2}}} + \\
 & + \frac{\omega^2 l_1^4 \cos^2(\omega t) \sin^2(\omega t)(l_2 + l_3)^4}{l_2^4 l_4^3 \left(1 - \frac{l_1^2 \sin^2(\omega t)(l_2 + l_3)^2}{l_2^2 l_4^2}\right)^{\frac{3}{2}}}.
 \end{aligned} \tag{4.4.22}$$

де  $W_D(t)$  - прискорення точки D залежно від часу повороту кривошипа OA.

Використовуючи залежності (4.4.19) -(4.4.22) були побудовані графічні залежності, які представлені на рис.4.4.6.

Крива 1 відповідає прискоренню точки В. Крива 2 відповідає прискоренню точки С. Крива 3 відповідає прискоренню точки D. Аналіз отриманих кривих показує, що для точки D, на ділянці траєкторії точки С, коли вона рухається по колу радіусу CD прискорення орієнтовано дорівнює нулю.

Результати кінематичних досліджень руху механізму нитконапрячника можуть бути використані при кінетостатичному дослідженні роботи вказаного механізму.



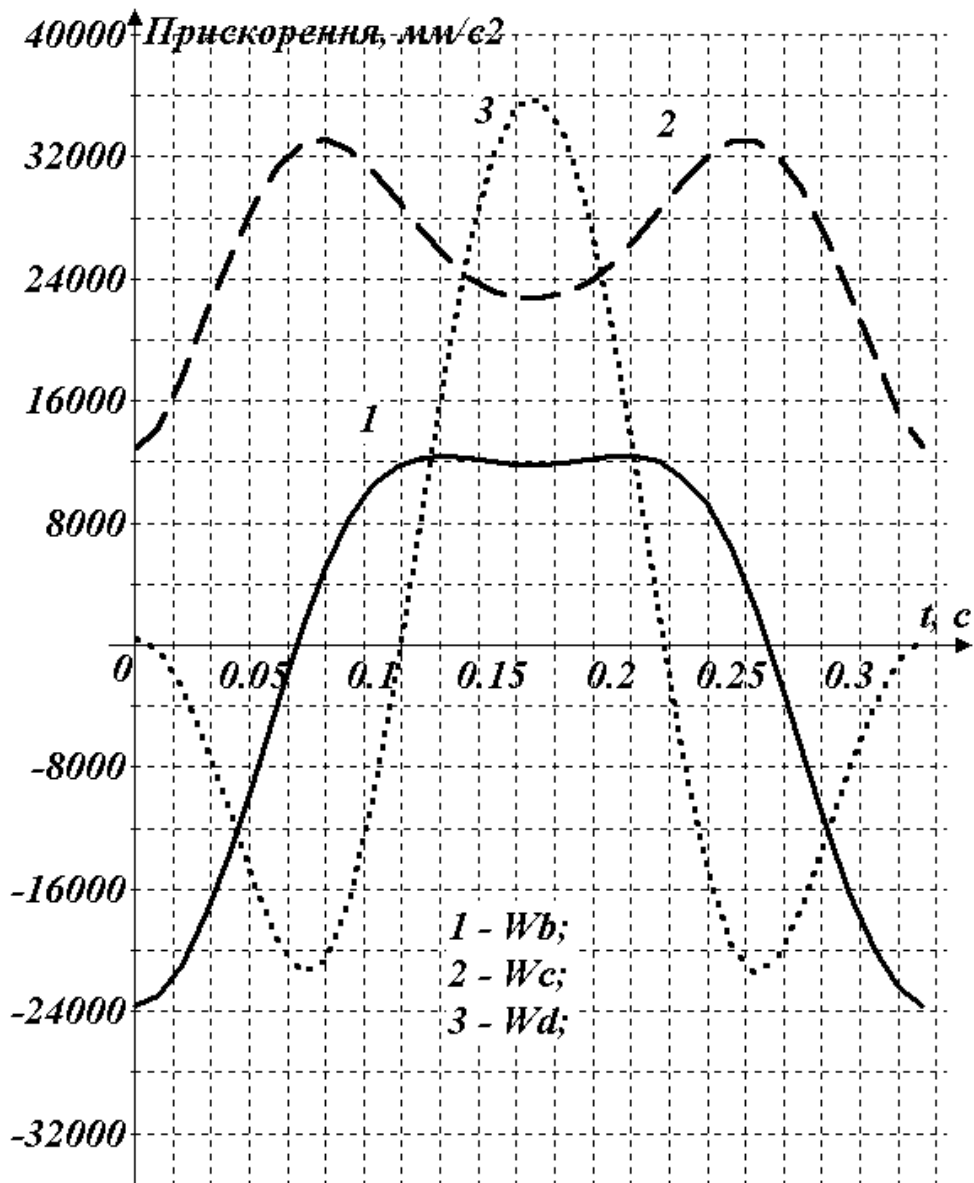


Рис.4.4.6. Графіки зміни прискорень точок механізму нитконапрявника

Використовуючи результати кінематичних досліджень, а також досліджень по вибору оптимальних розмірів циліндричних нитконапрявників [118], представимо формулу (4.4.7) для визначення натягу ниток основи у вигляді

$$P = P_0 e^{\mu_3 \gamma} \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} \left( e^{\mu_2 \left\{ \arctg \left[ \frac{h(t)}{l_1} \right] + \arctg \left[ \frac{h(t)}{l_2} \right] \right\}} - 1 \right) \right], \quad (4.4.23)$$

де  $\mu_3$  - коефіцієнт тертя нитки по поверхні скала у випадку його оптимальних геометричних розмірів. На рис.4.4.7 та в Додатках представлені залежності натягу ниток основи від кута обертання головного вала ткацького верстата.

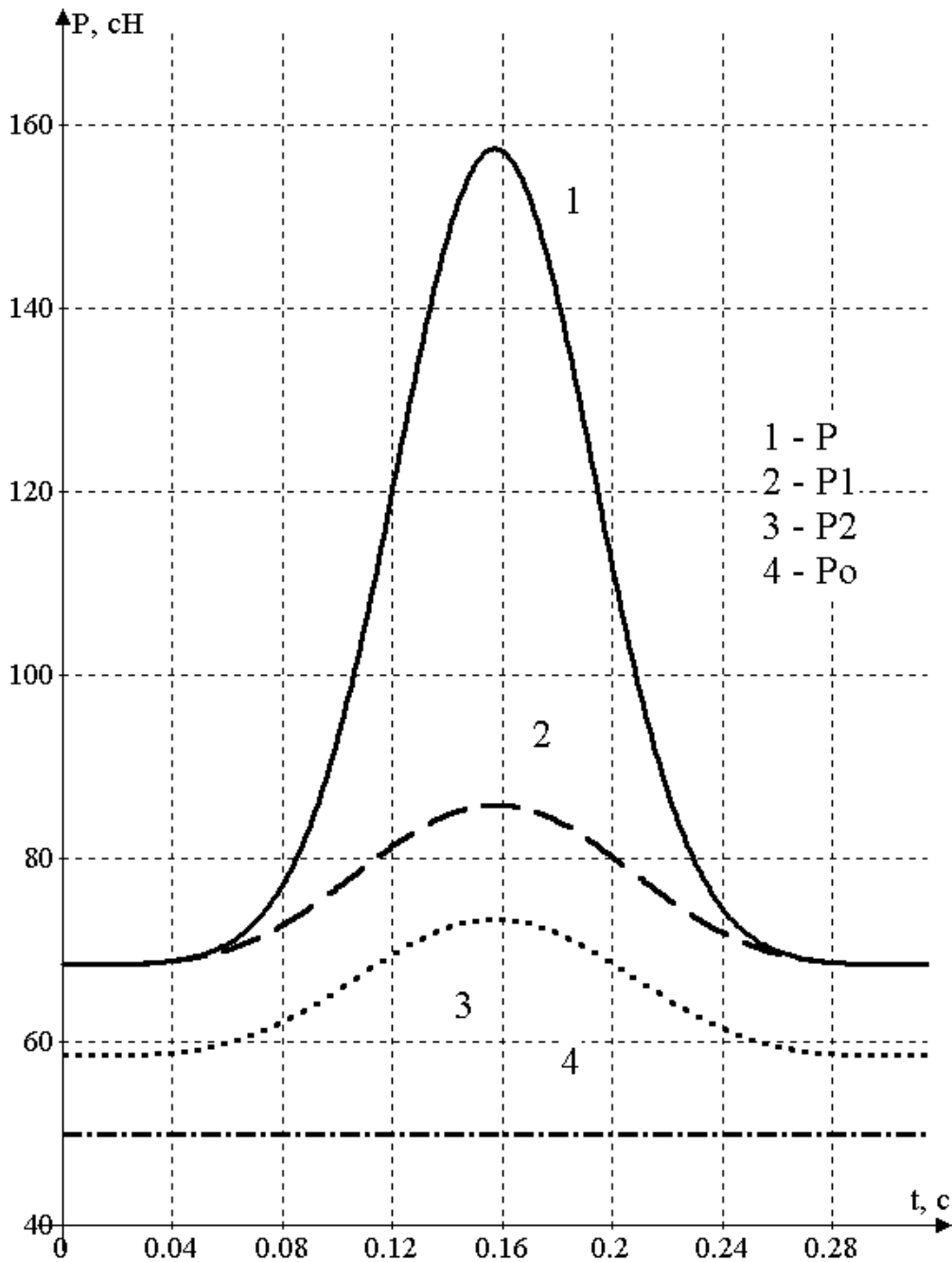


Рис.4.4.7. Графічні залежності натягу ниток основи

Аналіз графічних залежностей показав, що при використанні нитконапрямника натяг ниток основи зменшується на 60-70 сН. При

використанні скала з оптимальними геометричними розмірами натяг основи зменшується на 10-15 сН. Таким чином, загальне зменшення натягу основи буде складати 70-80 сН. Використання запропонованого нитконапрямника ткацького верстата дозволяє мінімізувати натяг ниток основи при зевоутворенні за рахунок забезпечення необхідної функції ниткоподачі, що дозволяє вдосконалити технологічні процеси та обладнання текстильної промисловості.

### **Оптимізація процесу взаємодії нитки з напрямними з урахуванням анізотропії фрикційних властивостей**

Подовжнє і поперечне ковзання ниток по напрямних з постійною кривизною поверхні або по площині має місце при формуванні елементу тканини і трикотажу, при взаємодії ниток з направляючими органами швейних і текстильних машин [1, 13, 38-41]. Визначення натягу і форми осі, з урахуванням анізотропії фрикційних властивостей як ниток [10] так і напрямних, дозволяє на початковому етапі проектування технологічних процесів вибрати їх оптимальні параметри. Таким чином, тема цього підрозділу є актуальною, що має важливе значення для удосконалення технологічних процесів текстильної і трикотажної промисловості.

Удосконалення технологічних процесів легкої і текстильної промисловості, як об'єктів дослідження, повинно базуватися на комплексних дослідженнях процесу взаємодії ниток з направляючими поверхнями великої і малої кривизни [1-14], площинами з урахуванням анізотропії фрикційних властивостей як ниток так і напрямних. Отримані результати дозволять оптимізувати процес взаємодії ниток з напрямними з урахуванням анізотропії фрикційних властивостей як ниток так і напрямних в зоні формування тканини і трикотажу, зменшити відсоток

обривів ниток, поліпшити якість готової продукції.

Будова поверхонь робочих органів трикотажних і текстильних машин (рис.4.4.8), а також самих ниток (рис.4.4.9) свідчать про те, що величина сили тертя в ортогональних напрямках (наприклад дотичній і нормалі до точки на осі нитки) відрізнятимуться. Це дозволяє говорити про необхідність врахування анізотропії фрикційних властивостей. У загальному випадку величина сили тертя визначається з виразу [10]

$$F = N\sqrt{k_1^2 + k_2^2}, \quad (4.4.24)$$

де  $F$  - сила тертя;  $N$  - сила нормального тиску;  $k = \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$  - ефективний коефіцієнт тертя [123].

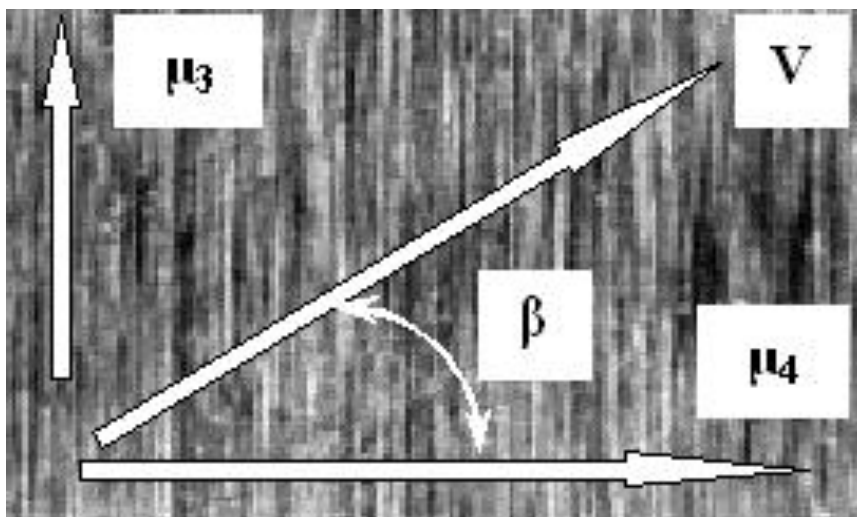


Рис.4.4.8. Анізотропія фрикційних властивостей напрямної

Для двох ортогональних напрямів (дотична і нормаль) вираз ефективного коефіцієнта тертя матиме вигляд

$$k = \sqrt{k_1^2 + k_2^2} = \sqrt{\mu_2^2 \cos^2 \beta + \mu_1^2 \sin^2 \beta}. \quad (4.4.25)$$

де  $\mu_1, \mu_2$  - коефіцієнти тертя нитки в двох ортогональних напрямках;

$\beta$  - кут, який утворює вектор швидкості з дотичною до осі нитки.

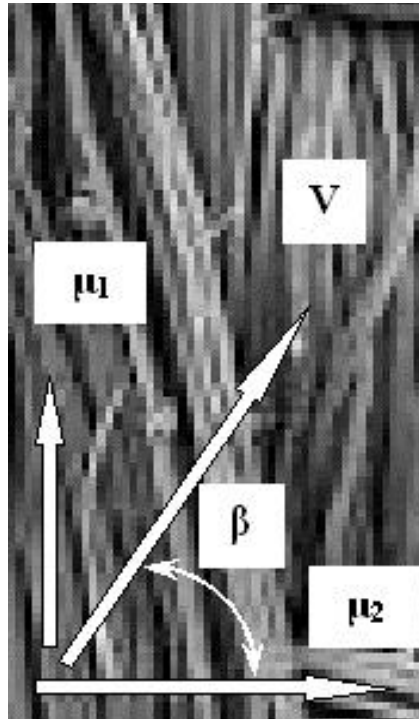


Рис.4.4.9. Анізотропія фрикційних властивостей нитки

Для теоретичного дослідження впливу матеріалу нитки і анізотропії тертя на натяг і форму її осі були вибрані комплексні нитки та пряжа (рис.4.4.9), які мають значну анізотропію фрикційних властивостей в двох ортогональних напрямках – вздовж окремих філаментів та перпендікулярно до них.

Знайдемо похідну від ефективного коефіцієнта тертя по куту  $\beta$  та прирівняємо її до нуля

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \beta} \left( \frac{F}{N} \right) &= \frac{\partial}{\partial \beta} \left( \sqrt{\mu_2^2 \cos^2 \beta + \mu_1^2 \sin^2 \beta} \right) = \\ &= \frac{-\mu_2^2 \cos \beta \sin \beta + \mu_1^2 \cos \beta \sin \beta}{\sqrt{\mu_2^2 \cos^2 \beta + \mu_1^2 \sin^2 \beta}} = 0. \end{aligned} \quad (4.4.26)$$

Це рівняння буде можливим у двох випадках

$$\sin \beta = 0, \quad \beta = 0, \quad \cos \beta = 0, \quad \beta = \pi / 2.$$

Знайдемо другу похідну, для чого рівняння (4.4.26) ще раз продифференціюємо по  $\beta$

$$\frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \left( \frac{F}{N} \right) = \frac{-(\mu_2^2 \cos \beta \sin \beta - \mu_1^2 \cos \beta \sin \beta)^2}{(\mu_2^2 \cos^2 \beta + \mu_1^2 \sin^2 \beta)^{\frac{3}{2}}} - \frac{\mu_2^2 \cos^2 \beta - \mu_2^2 \sin^2 \beta - \mu_1^2 \cos^2 \beta + \mu_1^2 \sin^2 \beta}{\sqrt{\mu_2^2 \cos^2 \beta + \mu_1^2 \sin^2 \beta}}. \quad (4.4.27)$$

В характерних точках  $\beta = 0$ ,  $\beta = \pi/2$  значення других похідних наведено в системі рівнянь (4.4.28). У випадку  $\beta = 0$  ефективний коефіцієнт тертя буде мати своє максимальне значення, а у випадку  $\beta = \pi/2$  - мінімальне значення.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \left( \frac{F}{N} \right) &= \frac{\mu_2^2 - \mu_1^2}{\mu_1}, \quad \beta = \frac{\pi}{2}, & \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \left( \frac{F}{N} \right) &= \frac{-\mu_2^2 + \mu_1^2}{\mu_2}, \quad \beta = 0, & \mu_2 > \mu_1, \\ \beta = 0 \rightarrow \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \left( \frac{F}{N} \right) < 0 &\rightarrow \max, & \beta = \frac{\pi}{2} \rightarrow \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \left( \frac{F}{N} \right) > 0 &\rightarrow \min. \end{aligned} \quad (4.4.28)$$

В загальному випадку, враховуючи структуру направляючої (рис.4.4.8) та самої нитки (рис.4.4.9), анізотропія фрикційних властивостей може бути представлена системою нерівностей  $\mu_1 > \mu_2$ ,  $\mu_3 > \mu_4$ . У разі, коли  $\mu_1 = \mu_2$ ,  $\mu_3 = \mu_4$  фрикційні властивості направляючої поверхні та нитки обраховуються як для ізотропних об'єктів. На рис.4.4.10 представлена загальна розрахункова схема взаємодії двох поверхонь з анізотропними фрикційними властивостями.

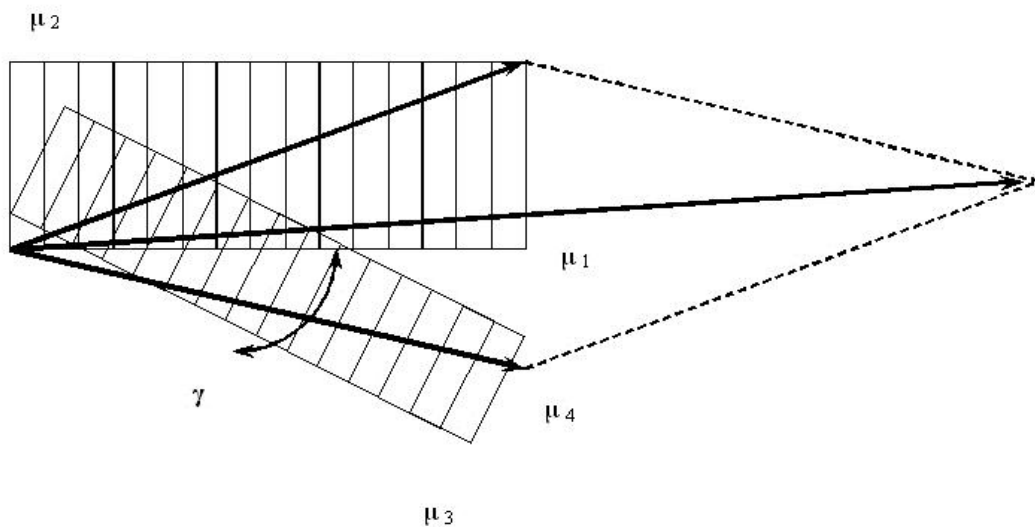


Рис.4.4.10. Розрахункова схема

Два прямокутники, діагоналі яких представляють собою ефективні

коефіцієнти тертя (з кутами відхилення діагоналей від горизонталі  $\beta_{12} = \arctg(\mu_2 / \mu_1)$ ,  $\beta_{34} = \arctg(\mu_4 / \mu_3)$ ), в загальному випадку будемо вважати повернутими один відносно другого на кут  $\gamma$ . Тоді значення ефективного коефіцієнта тертя для цієї пари можна визначити по формулі

$$k = \sqrt{(\mu_3 \cos \gamma + \mu_4 \sin \gamma + \mu_1)^2 \cos^2 \beta + \{\mu_2 - [\mu_3 \sin(\gamma + \pi) - \mu_4 \cos \gamma]\}^2 \sin \beta}. \quad (4.4.29)$$

Для направляючої поверхні коефіцієнт тертя в напрямку найменшого супротиву руху позначимо  $u$ , який характеризуватиме ефект від супротиву зсуву у цьому напрямку. Враховуючи, що  $\mu_3 > \mu_4$  отримаємо

$$\mu_4 = u, \quad \mu_3 = au, \quad a > 1, \quad \frac{\mu_3}{\mu_4} = a, \quad \mu_3 = a\mu_4.$$

Тоді рівняння (6) прийме вигляд

$$k = \sqrt{(au \cos \gamma + u \sin \gamma + \mu_1)^2 \cos^2 \beta + \{\mu_2 - [au \sin(\gamma + \pi) - u \cos \gamma]\}^2 \sin \beta}. \quad (4.4.30)$$

Коли прямокутники не повернуті один відносно другого, при  $\gamma = 0$ , рівняння (4.4.30) прийме вигляд

$$k = \sqrt{(au + \mu_1)^2 \cos^2 \beta + (\mu_2 + u)^2 \sin \beta}. \quad (4.4.31)$$

У випадку, коли  $\gamma = \frac{\pi}{2}$ , рівняння (4.4.31) прийме вигляд

$$k = \sqrt{(u + \mu_1)^2 \cos^2 \beta + (\mu_2 + au)^2 \sin \beta}. \quad (4.4.32)$$

Для ізотропної направляючої поверхні, при  $a = 1$ , рівняння (4.4.32) прийме вигляд

$$k = \sqrt{(u + \mu_1)^2 \cos^2 \beta + (\mu_2 + u)^2 \sin \beta}. \quad (4.4.33)$$

Аналіз рівнянь (4.4.29-4.4.33) дозволяє зробити висновок, що враховуючи фрикційні властивості напрямної і самої нитки, а також напрямок їх відносного переміщення, який характеризується кутом  $\beta$ , можна отримати найбільш оптимальну схему, при якій супротив відносного зсуву нитки відносно напрямної буде мінімальним. На рис.4.4.11 представлені відповідні діаграми ефективного коефіцієнту тертя

$k$ . Результати були отримані для наступних варіантів: 1 -  $\beta=0, \gamma=0, k=0,6$ ; 2 -  $\beta=0, \gamma=\pi/2, k=0,5$ ; 3 -  $\beta=\pi/2, \gamma=0, k=0,2$ ; 4 -  $\beta=\pi/2, \gamma=\pi/2, k=0,3$ . Аналіз отриманих результатів показав, що значення ефективного коефіцієнту тертя (варіант 1) в три рази вище ніж у випадку, коли  $\beta=\pi/2, \gamma=0, k=0,2$  (варіант 3).

Виходячи з цього необхідно при виконанні розрахунків натягу нитки, та визначення форми її осі враховувати значення ефективного коефіцієнту тертя та підбирати відповідні параметри таким чином, щоб отримати мінімальне значення сили тертя .

У випадку руху нитки по поверхні циліндра  $\beta=0, \gamma=0$  залежність для визначення натягу буде мати вираз [1-13, 38-41]

$$\ln P = \ln P_0 + \frac{a\varphi^{1-n_1}}{b(1-n_1)} \left(\frac{R}{P_0}\right)^{1-n} [\ln R(1-n)+1] / \left[1 + \frac{(1-n)a\varphi^{1-n_1}}{b(1-n_1)} \left(\frac{R}{P_0}\right)^{1-n}\right], P = P_0 e^{k\varphi \left(\frac{R}{P_0}\right)^{1-n}}$$

де  $P$  - вихідний натяг нитки;  $P_0$  - вхідний натяг нитки;  $R$  - радіус циліндричної напрямної;  $\varphi$  - кут охоплення ниткою циліндричної напрямної;  $n, a, b, n_1$  - деякі константи, значення яких залежить від виду матеріалів нитки та напрямної та умов взаємодії між ними.

$k$  - ефективний коефіцієнт тертя

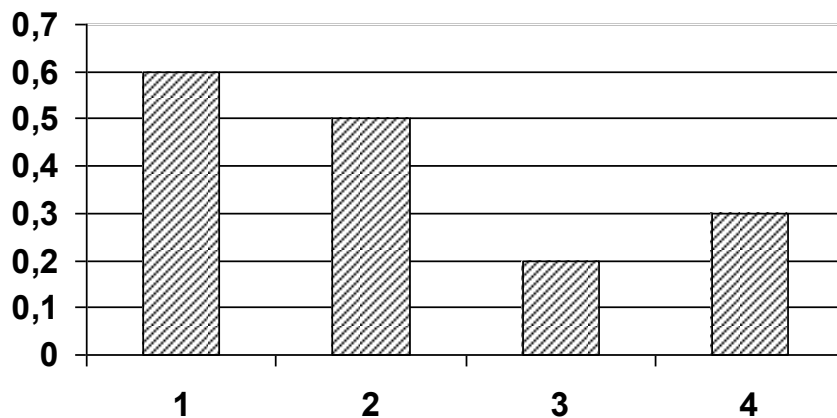


Рис.4.4.11. Значення ефективного коефіцієнту тертя



У випадку руху нитки по поверхні деякої площини  $\beta \neq 0$ ,  $\gamma \neq 0$  було отримано диференціальне рівняння, яке представляє диференціальне рівняння другого порядку і визначає форму осі нитки при поперечному ковзанні з урахуванням анізотропії тертя [10]

$$\left[ 1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{\mu_1}{2\mu_2} - 1} \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{\mu_2 \mu_0^2 g}{P_0}.$$

Отримано основні залежності для оптимізації процесу взаємодії нитки з напрямними з погляду мінімізації величини сили тертя. Це дозволило визначити форму осі нитки і її натяг в довільній точці, удосконалити процес її переробки на технологічному устаткуванні текстильної і трикотажної промисловості.

Найбільший натяг матимуть нитки з найбільшим значенням ефективного коефіцієнта тертя. Реальний натяг, в середньому, у анізотропних ниток в порівнянні з ізотропними буде більше на 20-30%.

### **Удосконалення нитконатягувального пристрою в'язальних машин**

Корисна модель відноситься до області вдосконалення нитконатяжних пристроїв машин легкої та текстильної промисловості, зокрема для вдосконалення конструкції тарілчастих нитконатягувальних пристроїв.

Відомий тарілчастий нитконатягувальний пристрій [1-9], який використовується в трикотажних та швейних машинах. Нитконатягувальний пристрій складається зі стрижня, на який надягнуто дві тарілочки. Тиск між тарілочками створюється пружиною. Силу тиску можна змінювати за допомогою гайки.

Тарілчастий нитконатягувальний пристрій дозволяє забезпечити необхідний натяг для реалізації технологічного процесу. Але даний тарілчастий нитконатягувальний пристрій має суттєвий недолік. При

проходженні вузлів, шишок та локальних потовщень відбувається різке збільшення натягу за рахунок ударної дії, що призводить до обриву нитки. Крім того, різке збільшення натягу призводить до порушення нормального проходження технологічного процесу переробки нитки.

Найбільш близьким по суті та бажаному ефекту до технічного рішення є тарілчастий нитконатягувальний пристрій [42-46].

Нитконатягувальний пристрій містить стрижень з надягнутими на нього двома тарілочками. Тиск між тарілочками створюється пружиною. Силу тиску можна змінювати за допомогою гайки. Для стабілізації натягу пристрій оснащено двоплечовим важелем. Один кінець важеля взаємодіє з пружиною, а з іншим взаємодіє рухома нитка. Вісь двоплечового важеля і стрижень тарілчастого нитконатягувального пристрою перехрещуються під кутом  $90^\circ$ . При зміні натягу відбувається обертання двоплечового важеля, що призводить до зміни ступеня стискання пружини, а це в свою чергу, призводить до зміни тиску тарілочок на нитку в зоні їх контакту.

Але при наявності на нитці вузла, шишки або локального потовщення при взаємодії з двоплечовим важелем відбувається ударний вплив, що призводить до різкого збільшення натягу та обриву нитки. Це спричинено тим, що радіус кривизни направляючої поверхні двоплечового важеля співрозмірний з діаметром вузла, шишки або потовщення. Крім того, наявність двоплечового важеля не виключає ударну взаємодію вузла, шишки або локального потовщення з поверхнею тарілочок нитконатягувального пристрою. Ця обставина негативно впливає на нормальне проходження технологічного процесу.

Метою даної корисної моделі є виключення стрибкоподібного збільшення натягу нитки, що з'являється за рахунок ударного впливу при проходженні вузлів, шишок або локальних потовщень через тарілчасті нитконатягувальні пристрої і, як наслідок, виключення обриву нитки.

Поставлена мета досягається тим, що нитконатягувальний пристрій

містить стрижень з надягнутими на нього двома тарілочками, пружину, яка надягнута на стрижень, яка забезпечує необхідне стискання тарілочок за допомогою гайки [10]. Пристрій містить фігурний вилковий одноплечий важіль, вісь якого паралельна осі стрижня нитконатягувального пристрою, робоча поверхня важеля має ввігнуту форму, що утворена двома півколами, а в точці контакту з тарілочками з неробочої сторони має два клиноподібні штовхачі, обмежувач переміщень верхньої тарілки у вигляді гвинтової пари та пружину стискання. Форма фігурного вилкового одноплечого важеля утворюється з відрізка прямої та двох дуг кола, радіус якого дорівнює зовнішньому радіусу тарілочок.

Порівняльний аналіз з прототипом показує, що заявлений нитконатягувальний пристрій від прототипу тим, що має фігурний одновилковий важіль, вісь якого паралельна вісі стрижня нитконатягувального пристрою. Крім того, робоча поверхня важеля має ввігнуту форму, яка створена двома півколами, а в точці контакту з тарілочками з неробочої сторони має два клиноподібних штовхачі. Нитконатягувальний пристрій також містить обмежувач переміщення верхньої тарілки у вигляді гвинтової пари й пружини стискання, а форма фігурного вилкового одноплечого важеля утворюється з відрізка прямої і двох дуг кіл радіуса, який дорівнює зовнішньому радіусу тарілочок. Перераховані вище ознаки дозволяють виключити стрибкоподібне збільшення натягу нитки, що виникає за рахунок ударного впливу при проходженні вузлів, шишок і локальних потовщень через тарілчасті нитконатягувальні пристрої і, як наслідок, виключити обриви нитки [10].

На рис.4.4.12 зображено нитконатягувальний пристрій, вид збоку; на рис.4.4.13 зображено нитконатягувальний пристрій, вид зверху; на рис.4.4.14 - переріз А-А на рис.4.4.13.

Нитконатягувальний пристрій містить стрижень 1, з двома тарілочками 2 і 3, що надягнуті на нього, пружину 4 і гайку 5, що забезпечують

необхідний ступінь стискання пружини 4. На осі 6 розташовується фігурний вилковий одноплечий важіль 7, що прикріплений до пружини стискання 8 і має два клиноподібних штовхачі 9. Обмежувач 10 переміщення верхньої тарілочка виконаний у вигляді гвинтової пари.

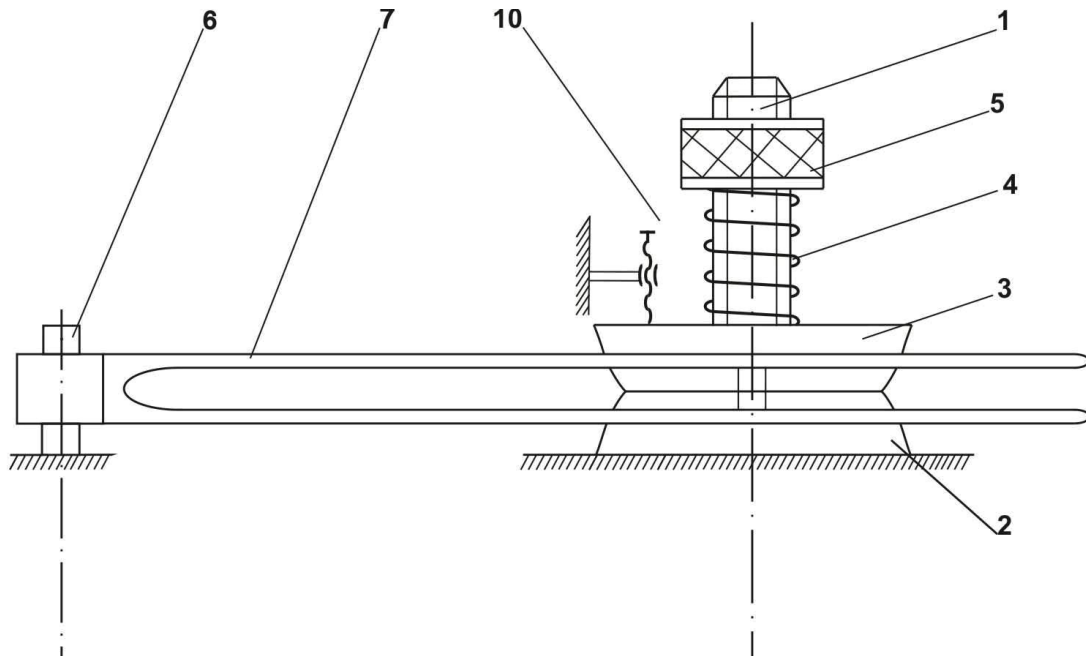


Рис.4.4.12. Нитконатягувальний пристрій (вид збоку)

Нитконатягувальний пристрій працює в такий спосіб. Нитка 11, виходячи із точки, заправляється між зубцями фігурного вилкового одноплечого важеля 7, далі проходить під тарілочками 2, 3, огинає стрижень 1 і надходить у точку С. При відсутності вузлів і потовщень нитка має форму, що показана пунктирною лінією на рис.4.4.13. При наявності вузла або шишки, останні, при переміщенні нитки, починають давити на поверхню одноплечого важеля 7. Відстань між зубцями вилки менша діаметра вузла. Момент, що виникає від сили впливу вузла на робочу поверхню одноплечого важеля 7, викликає стискання пружини 8, при цьому два клиноподібних штовхачі розсовують тарілочку 2 і 3 і вивільняють нитку 11. Величина переміщення верхньої тарілочка регулюється обмежувачем 10. При цьому нитка 11 має поточну форму, показану штрих-пунктирною лінією на рис.4.4.13. Вузол або шишка рухаються по робочій поверхні одноплечого важеля 7 не потрапляючи під тарілочку. Після сходу вузла

або нитки з робочої поверхні одноплечого важеля 7 під дією пружини стискання у вихідний стан.

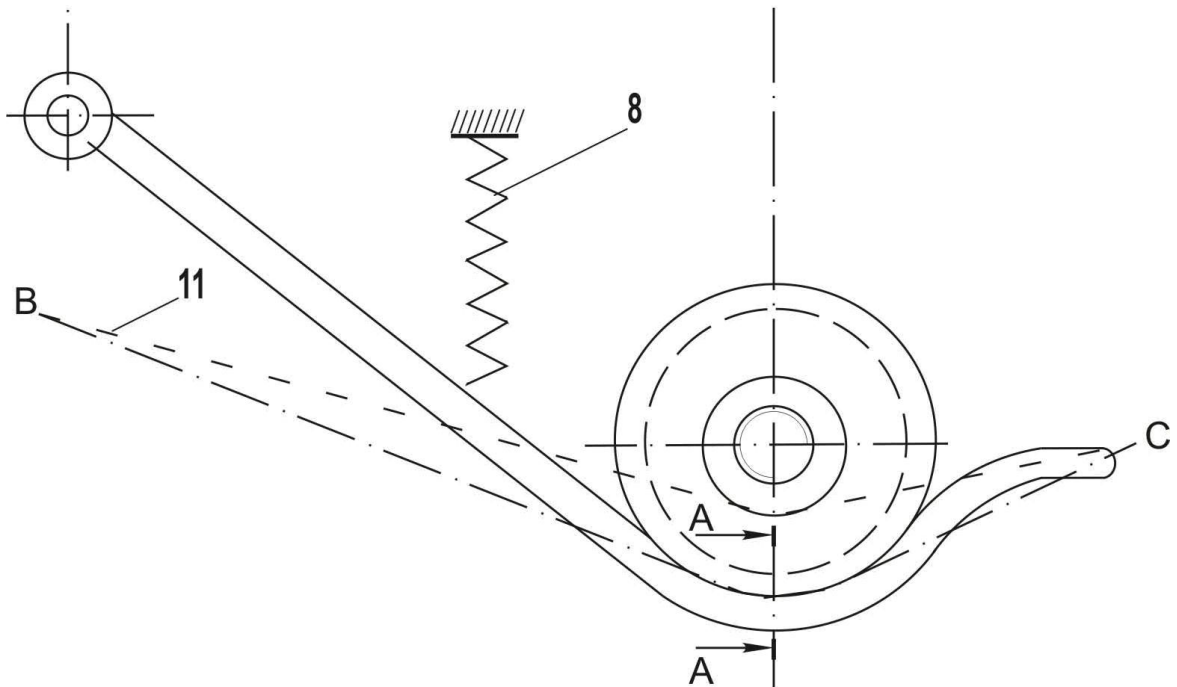


Рис.4.4.13. Нитконатягувальний пристрій (вид зверху)

Використання запропонованого нитконатягувального пристрою дозволяє виключити стрибкоподібне збільшення натягу нитки, що виникає за рахунок ударного впливу при проходженні вузлів, шишок і локальних потовщень і виключити обрив ниток.

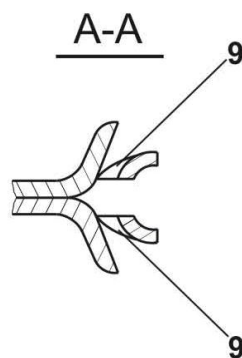


Рис.4.4.14. Перетин А-А

Це дозволить значно підвищити продуктивність технологічного устаткування за рахунок зниження часу простоїв для ліквідації обриву й

підвищити якість продукції, що випускається.

Розрахунок нитконатягувального пристрою за відомою методикою [31, 60] призводить до неточних результатів. При розрахунках необхідно враховувати змінання нитки в зоні контакту з напрямною, її жорсткість на вигин. Виходячи з цього для розрахунку вихідного натягу будемо враховувати результати отримані в 3 розділі. Тоді, з використанням формул (3.1.18)-(3.1.21), отримаємо

$$\begin{aligned}
 P = P_o & \left\{ \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} (e^{f\varphi} - 1) \right] + \left[ \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1K^{u_2})}}{2P_o [R+r(1-\delta)]^2} \right] - \left[ \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1K^{u_2})}}{2P_o [R+r(1-\delta_0)]^2} \right] \right\} \times \\
 & \times \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} (e^{f\varphi} - 1) \right] + \frac{\mu_1 N}{1 + \sin(\beta - \frac{\varphi}{2})} (1 + \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} (e^{f\varphi} - 1) \right] + \\
 & + \left[ \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1K^{u_2})}}{2P_o [R+r(1-\delta)]^2} \right] - \left[ \frac{\left( \frac{E\pi}{64} \sum_{i=1}^w d_i^4 \right)^{(1+u_1K^{u_2})}}{2P_o [R+r(1-\delta_0)]^2} \right] \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} (e^{f\varphi} - 1) \right] \left. \right\}.
 \end{aligned}$$

Для більшості текстильних ниток жорсткістю на вигин можна знехтувати, тоді останнє рівняння прийме вигляд

$$\begin{aligned}
 P = P_o & \left\{ \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} (e^{f\varphi} - 1) \right] \right\} + \\
 & + \frac{\mu_1 N}{1 + \sin(\beta - \frac{\varphi}{2})} (1 + \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} (e^{f\varphi} - 1) \right] \left. \right\}. \tag{4.4.34}
 \end{aligned}$$

На рис.4.4.15 представлені графічні залежності зміни вихідного натягу в нитконатягувальному пристрої за старою методикою (крива 1) та за формулою (4.4.34) (крива 2). Вертикальна лінія 3 показує той момент, коли кут охоплення  $\varphi$  стрижня ниткою буде співпадати с кутом  $\beta = \arcsin(r1/R1)$ , де  $r1$ - радіус стрижня;  $R1$ - контактний радіус тарілок. Порівняльний аналіз

показує, що розрахунки вихідного натягу за старою методикою відрізняються від даних отриманих при розрахунках з урахуванням змінання та жорсткості нитки на згин на 3-22 сН (в середньому різниця складає 20%). Це підтвердили і результати експериментальних досліджень [1, 2-14]. Таке занижене значення натягу може призвести до суттєвих помилок при проектуванні системи ниткоподачі на трикотажних машинах.

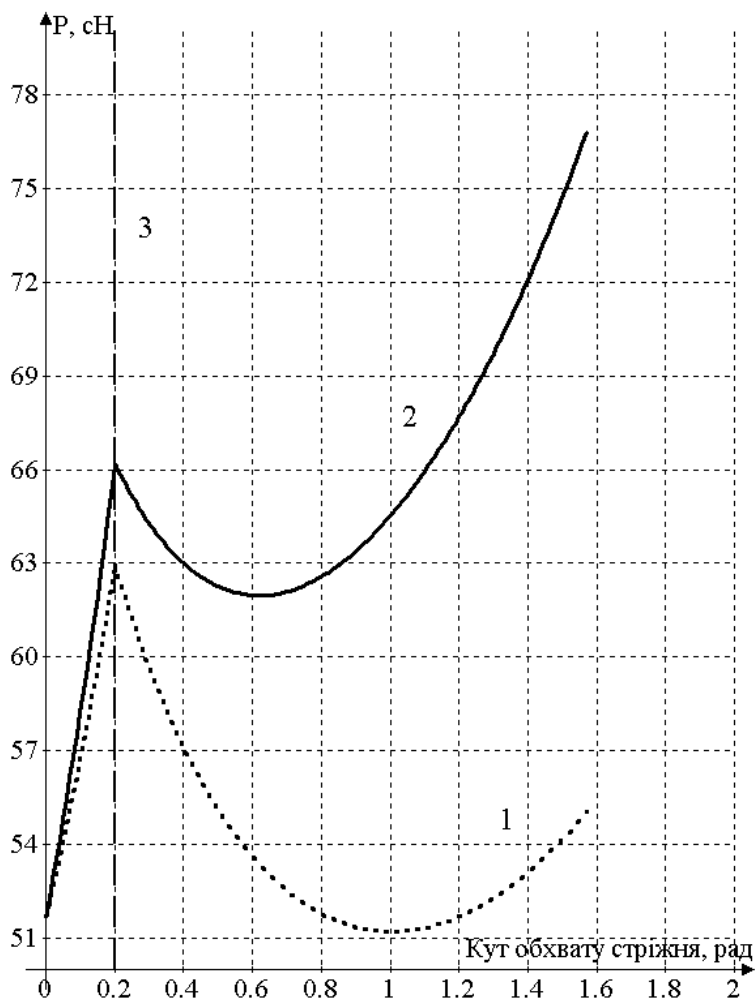


Рис.4.4.14.4. Графік зміни натягу нитки в нитконатягувальному пристрої

### Удосконалення системи ниткоподачі на мотальній машині М-150-2

На рис.4.4.16 представлена схема пружної заправки мотальної машини М-

150-2. На цій схемі можна виділити чотири основні зони: зона А – від бобіни до балоногасника; зона Б – від балоногасника до двозонного нитконатягувача; зона В – включає нитконатягувач і до контрольно-очисного пристрою; зона Г – від контрольно-очисного пристрою до зони намотування.

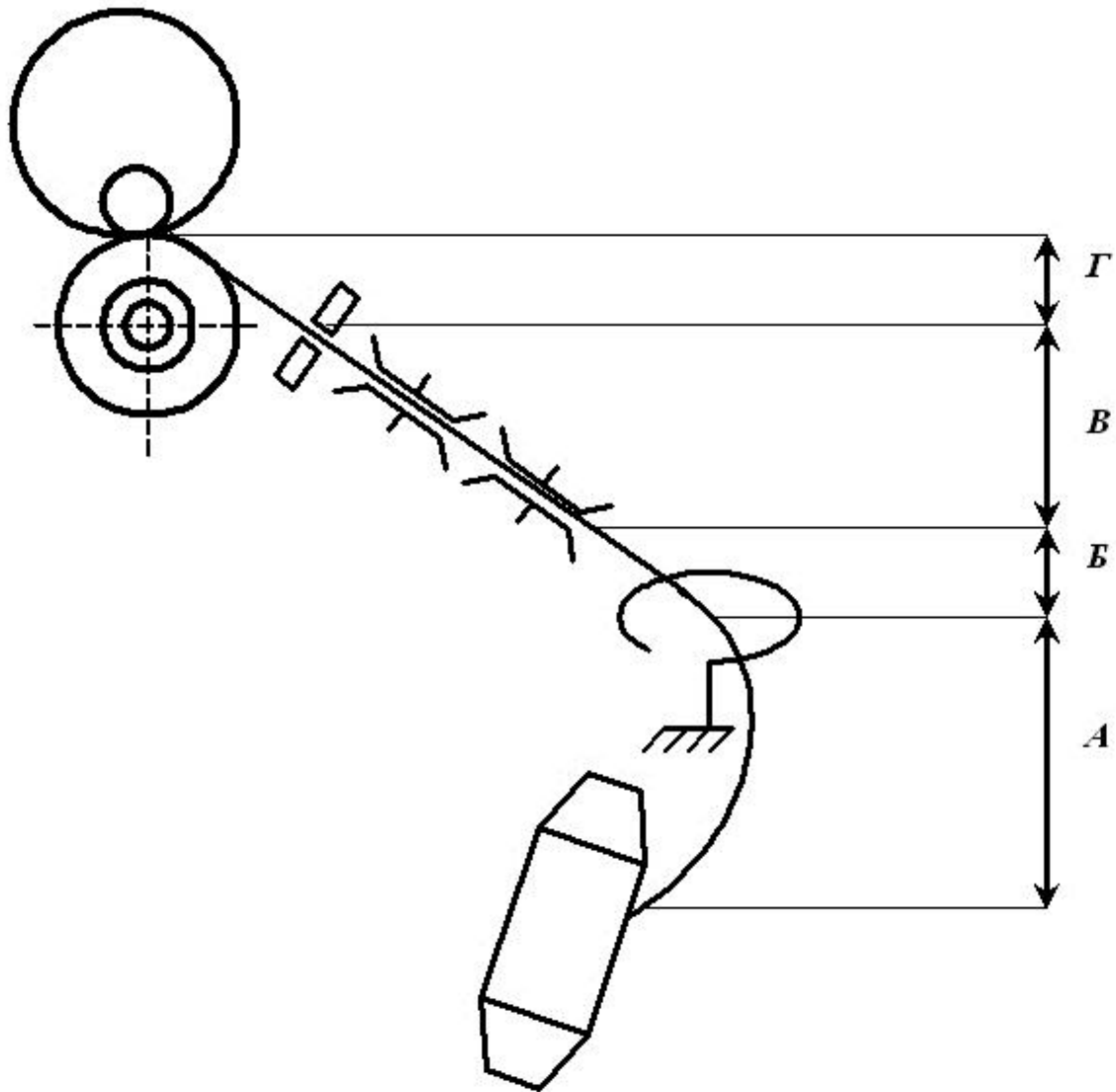


Рис.4.4.16.Схема пружної заправки мотальної машини М-150-2

На рис.4.4.17 представлена діаграма зміни відносного натягу по інтегрованим зонам. Зона А-Б - відношення натягу нитки наприкінці зони А до натягу наприкінці зони Б. Зона Б-В - відношення натягу нитки



наприкінці зони Б до натягу наприкінці зони В. Зона В-Г - відношення натягу нитки наприкінці зони В до натягу наприкінці зони Г. Аналіз даних діаграми показує, що максимальний відносний натяг буде у зоні В-Г – 3,9. Відносний натяг в зонах А-Б та В-Г близький до 1. Таким чином постає задача по модернізації умов переробки нитки в зоні В.

Ця зона представляє собою двозонний нитконатягувач. На рис.4.4.18 представлений один з нитконатягувачів, а на рис.4.4.19 представлена розрахункова схема.

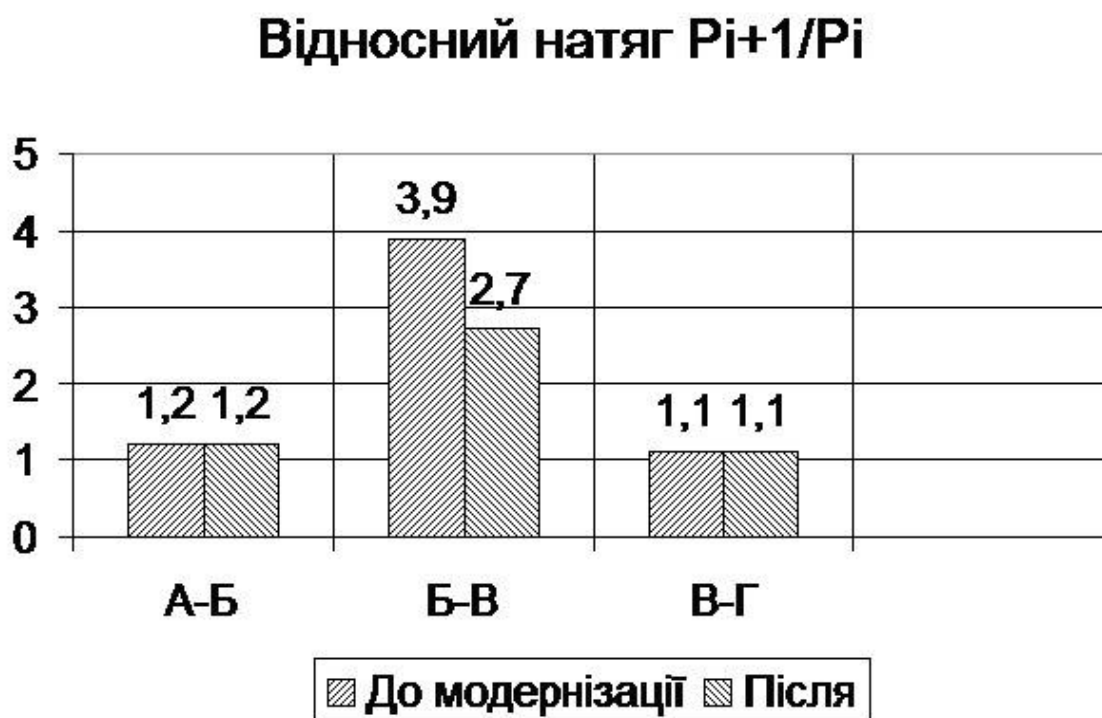


Рис.4.4.17. Діаграма зміни відносного натягу по зонам

З урахуванням (4.4.34) система рівнянь для визначення натягу нитки після зони В матиме вигляд

$$\begin{aligned}
 P_0 = P_B, \quad P_1 = P_B & \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} \left( e^{f\frac{\pi}{2}} - 1 \right) \right] + \\
 + \frac{\mu_1 N}{1 + \sin(\beta - \frac{\pi}{4})} & \left( 1 + \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} \left( e^{f\frac{\pi}{2}} - 1 \right) \right] \right). \\
 & \hspace{20em} (4.4.35) \\
 P = P_B, \quad P_B = P_1 & \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} \left( e^{f\frac{\pi}{2}} - 1 \right) \right] + \\
 + \frac{\mu_1 N}{1 + \sin(\beta - \frac{\pi}{4})} & \left( 1 + \left[ 1 + \frac{(R+r)}{[R+r(1-\delta_0)]} \left( e^{f\frac{\pi}{2}} - 1 \right) \right] \right).
 \end{aligned}$$



Рис.4.4.18. Загальний вигляд нитконатягувального приладу

Після розрахунків при  $N=10$  сН,  $P_B=12$  сН,  $\mu_1=0,2$ ,  $f=0,24$ ,  $r=0,1$  мм,  $R=2$  мм отримаємо значення відносного натягу 3,9.

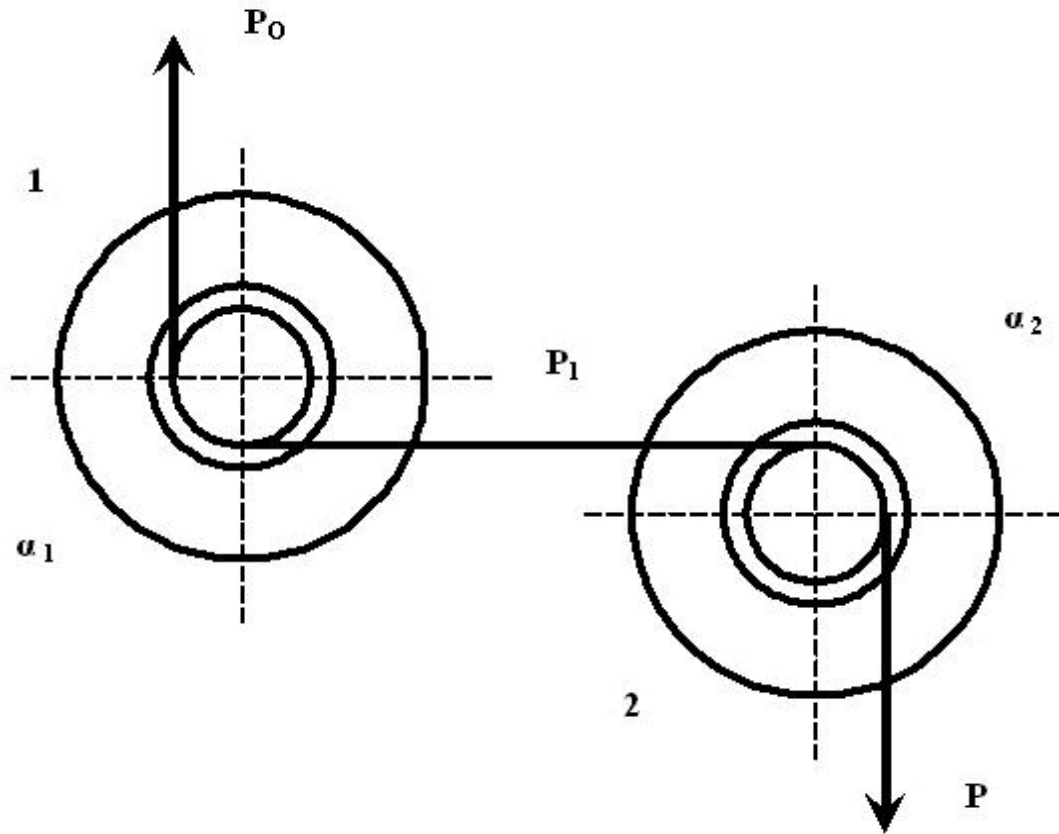


Рис.4.4.19.Розрахункова схема

Використовуючи результати досліджень третього розділу здійснюємо оптимізацію циліндричних нитконатягувачів двозонного нитконатягувача. Для цього визначаємо перші похідні рівнянь системи (4.4.35) та прирівнюємо їх до нуля  $\frac{\partial P_1}{\partial R} = 0$ ,  $\frac{\partial P}{\partial R} = 0$ . Розв'язуючи отриману систему трансцендентних рівнянь підбираємо відповідні значення радіусів циліндричних напрямних. В результаті цього отримаємо значення відносного натягу 2,7 (див. рис.4.4.17). На підставі даної модернізації удосконалено систему ниткоподачі на мотальній машині М-150-2, що дозволило зменшити натяг нитки в пружній системі заправки на 15-30%.

## **5. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В 'ЯЗАНЬ ТА ТКАЦТВА З УРАХУВАННЯМ АНІЗОТРОПІЇ ФРИКЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НИТКИ**

Поперечне ковзання ниток зустрічається в багатьох технологічних процесах текстильної та трикотажної промисловості. При цьому можна поділяти поперечне ковзання по направляючим великої і малої кривизни. Перший випадок можна розглядати як ковзання нитки по поверхні, у якої радіус кривизни дорівнює нескінченності. У подальших дослідженнях, у розрахунках, будемо вважати, що направляюча поверхня має постійний радіус кривизни.

Поперечне ковзання нитки по плоскій поверхні зустрічається, наприклад, при прибої утокової нитки, коли вона ковзає по поверхні основних ниток. Під дією сил тертя відбувається її втягування між зубами берда. Це спостерігається при використанні берд низьких номерів, при великій кількості ниток основи ввібраних в один зуб берда і при роботі з заступом. Цей процес призводить до збільшення довжини утокової нитки по ширині заправки ткацького верстата, що не дозволяє отримувати тканини заданої поверхневої щільності.

### **5.1 ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОПЕРЕЧНОГО РУХУ НИТОК З УРАХУВАННЯМ АНІЗОТРОПІЇ ТЕРТЯ**

У разі коли відстань між зубами берда сумірна з розрахунковим радіусом поперечного перерізу нитки, а також при використанні монониток, необхідно в розрахунках враховувати фізико-механічні характеристики нитки: жорсткість нитки на вигин, м'яття в зоні контакту з направляючою.

Поперечне ковзання ниток по направляючим з постійною кривизною поверхні широко зустрічається в трикотажній промисловості, коли відбувається відносне переміщення голок і ниток один щодо

одного. При цьому має місце і поздовжній рух нитки щодо своєї осі, що пояснюється перетяжками нитки зі старих петель в нові.

При взаємодії ниток з направляючими трикотажних машин, коли радіус їх кривизни сумарний з розрахунковим радіусом нитки також необхідно враховувати фізико-механічні властивості ниток.

Теоретичні дослідження процесу взаємодії ниток з направляючими при поперечному ковзанні ставлять перед собою мету визначення форми осі нитки та її натяг в довільній точці, що дозволить удосконалити процес її переробки на технологічному обладнанні.

**Дослідження поперечного руху нитки по площині з  
урахуванням анізотропії тертя у випадку, коли розрахунковий радіус  
поперечного перерізу нитки незрівнянно малий в порівнянні з  
відстанню між опорами**

На рис.5.1.1 показана загальна розрахункова схема. Нитка закріплюється в точках А і В. Тут необхідно зазначити, що ці точки дозволяють нитці рухатися уздовж своєї осі. У довільній точці М на нитку буде діяти сила тертя, сила тяжіння, нормальна реакція опори.

На рис.5.1.2 показаний нескінченно малий елемент нитки довжиною  $ds$  з діючими на нього силами. У центрі цього елемента (точка М) розміщуємо натуральний тригранник, який складають дотична, нормальна і бінормальна осі. Їх напрямок визначається відповідними одиничними ортами  $\vec{t}, \vec{v}, \vec{\beta}$ . Використання натурального тригранника вигідно відрізняється від декартової координатної системи, оскільки дозволяє отримати системи диференціальних рівнянь в найбільш простій формі. Дотична вісь в точці М становить поточний кут  $\varphi$  з позитивним напрямом осі  $x$ . Проектуємо сили, що діють на елементарний елемент

нитки, на осі натурального тригранника з урахуванням позитивного напрямку одиничних ортів, отримаємо

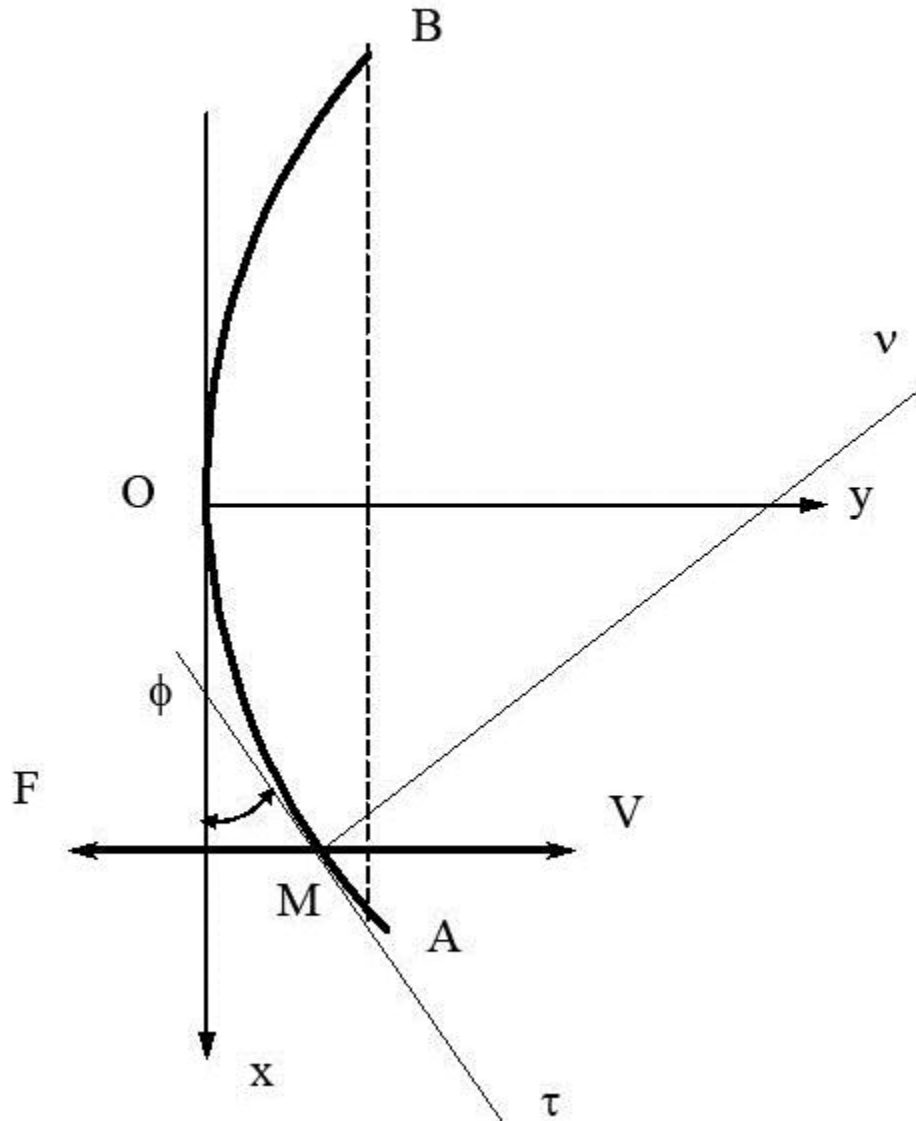


Рис.5.1.1. Загальна розрахункова схема

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n R_{\alpha_i} &= -P \cos \frac{d\alpha}{2} + P \cos \frac{d\alpha}{2} + dP \cos \frac{d\alpha}{2} - F_{\tau} ds = 0, \\ \sum_{i=1}^n R_{\beta_i} &= P \sin \frac{d\alpha}{2} + P \sin \frac{d\alpha}{2} + dP \sin \frac{d\alpha}{2} - F_{\nu} ds = 0, \\ \sum_{i=1}^n R_{\beta_i} &= N ds - \mu_0 g ds = 0, \end{aligned} \quad (5.1.1)$$

де  $R_{\alpha}, R_{\nu}, R_{\beta i}$  - алгебраїчні суми проєкцій сил, що діють на елементарний відрізок нитки, відповідно на дотичну, нормаль і бінормаль;

$P$  - натяг нитки, Н;

$d\alpha$  - значення центрального кута для нескінченно малого елемента  $ds$ , рад;

$F_{\tau}, F_{\nu}$  - проєкції сили тертя  $F$  на дотичну і нормаль;

$s$  - дугова координата, м;

$N$  - питома нормальна реакція, Н;

$\mu_0$  - лінійна щільність нитки до розтягування, кг / м;

$g$  - прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

Зважаючи на порядок невеликого розміру елементарного відрізка нитки  $ds$  замінюємо  $\sin \frac{d\alpha}{2} \cong \frac{d\alpha}{2}$ ,  $\cos \frac{d\alpha}{2} \cong 1$ , тоді система (5.1.1) прийме

вигляд

$$\begin{aligned} dP - F_{\tau} ds &= 0, \\ Pd\alpha - F_{\nu} ds &= 0, \\ N &= \mu_0 g. \end{aligned} \tag{5.1.2}$$

З урахуванням розтягування нитки, за законом збереження маси можна записати наступну пропорцію

$$\frac{ds}{ds_0} = \frac{\mu_0}{\mu} = f, \tag{5.1.3}$$

де  $ds_0$  - довжина елемента нитки до розтягування, м;

$ds$  - довжина елемента нитки після розтягнення, м;

$\mu$  - лінійна щільність елемента нитки після розтягнення, кг/м;

$f$  - коефіцієнт, який характеризує розтяжність нитки.

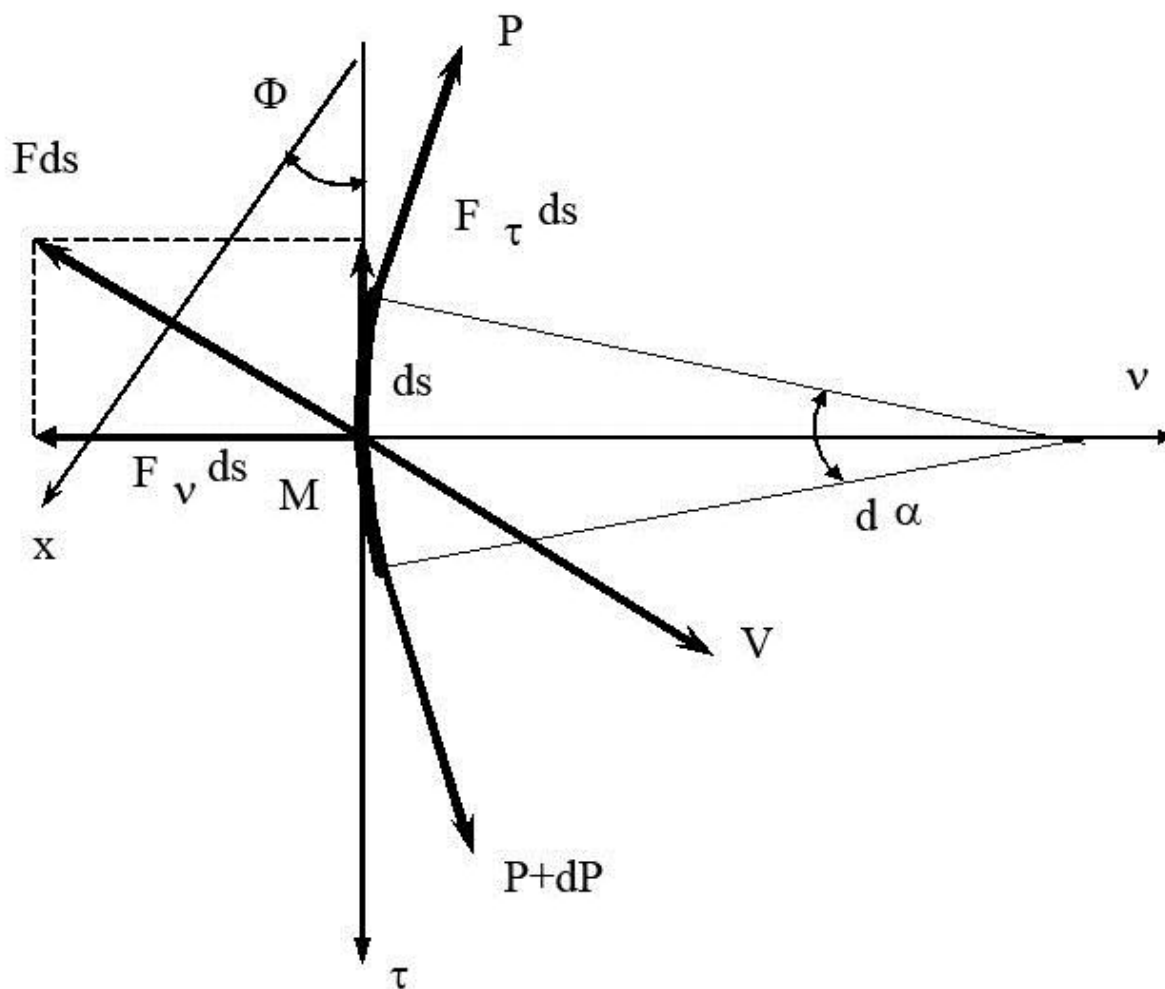


Рис.5.1.2. Схема сил, що діють на елементарний відрізок нитки

Перетворимо систему диференціальних рівнянь (5.1.2), розділивши ліві і праві частини на  $ds$

$$\begin{aligned} \frac{dP}{ds} &= F_{\tau}, \\ \frac{Pd\alpha}{ds} &= F_v, \\ N &= \mu_0 g. \end{aligned} \quad (5.1.4)$$

Величина

$$\rho = \frac{d\alpha}{ds}, \quad (5.1.5)$$



являє собою радіус кривизни. Тоді з урахуванням (5.1.3) система диференціальних рівнянь (5.1.4) матиме вигляд

$$\begin{aligned}\frac{f}{\mu_0} \frac{dP}{ds} &= F_\tau, \\ \frac{f}{\mu_0} \frac{P}{\rho} &= F_\nu, \\ N &= \mu_0 g.\end{aligned}\tag{5.1.6}$$

Складові сили тертя визначаються за наступними формулами

$$\begin{aligned}F_\tau &= F_1 \sin \varphi, \\ F_\nu &= F_2 \cos \varphi,\end{aligned}\tag{5.1.7}$$

де  $\varphi$  - кут нахилу дотичної в точці М до осі  $x$ , рад.

Величини, що складають силу тертя  $F_1, F_2$  визначаються за формулами

$$F_1 = k_1 N, \quad F_2 = k_2 N,\tag{5.1.8}$$

де  $k_1, k_2$  - відповідно коефіцієнти тертя нитки об направляючу в напрямку дотичної та нормалі.

Тоді, з урахуванням виразів (5.1.7) - (5.1.8), система диференціальних рівнянь (5.1.6) прийме вигляд

$$\begin{aligned}\frac{f}{\mu_0} \frac{dP}{ds} &= k_1 N \sin \varphi, \\ \frac{f}{\mu_0} \frac{P}{\rho} &= k_2 N \cos \varphi, \\ N &= \mu_0 g.\end{aligned}$$

Використовуючи третє рівняння даної системи, отримаємо

$$\begin{aligned}\frac{f}{\mu_0} \frac{dP}{ds} &= k_1 \mu_0 g \sin \varphi, \\ \frac{f}{\mu_0} \frac{P}{\rho} &= k_2 \mu_0 g \cos \varphi.\end{aligned}\tag{5.1.9}$$

У випадку, коли можна знехтувати розтягуванням нитки ( $f = 1$ ), одержимо

$$\begin{aligned} \frac{dP}{ds} &= k_1 \mu_0 g \sin \varphi, \\ \frac{P}{\rho} &= k_2 \mu_0 g \cos \varphi. \end{aligned} \quad (5.1.10)$$

Розділимо перше рівняння системи (5.1.10) на друге

$$\frac{dP\rho}{Pds} = \frac{k_1 \sin \varphi}{k_2 \cos \varphi}, \quad (5.1.11)$$

При розв'язуванні диференціального рівняння (5.1.11) будемо враховувати, що

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}{\frac{d^2y}{dx^2}}, \quad \sin \varphi = \frac{\frac{dy}{dx}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}}, \\ ds &= \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx, \quad \cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}}, \end{aligned}$$

де  $x, y$  - координати точки  $M$ ,  $m$ .

Підставляємо останні залежності в рівняння (5.1.11), отримаємо

$$\frac{dP \left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \frac{d^2y}{dx^2} P} = \frac{k_1 dy \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}}{k_2 dx \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}}.$$

Після перетворень отримаємо наступне диференціальне рівняння

$$\frac{dP \left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]}{P} = \frac{k_1 dy}{k_2 dx} \frac{d^2y}{dx^2} dx.$$

Або

$$\frac{dP}{P} = \frac{k_1}{k_2} \frac{\frac{dy}{dx} d\left(\frac{dy}{dx}\right)}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]}. \quad (5.1.12)$$

Інтегруємо останнє диференціальне рівняння, з урахуванням  $\frac{dy_0}{dx_0} = 0$   
(дотична в точці О паралельна осі  $x$ )

$$\int_{P_0}^P \frac{dP}{P} = \frac{k_1}{k_2} \int_0^{\frac{dy}{dx}} \frac{\frac{dy}{dx} d\left(\frac{dy}{dx}\right)}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]}.$$

Тоді

$$\ln \frac{P}{P_0} = \frac{k_1}{2k_2} \ln \left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right].$$

В остаточному вигляді

$$P = P_0 \left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{k_1}{2k_2}}. \quad (5.1.13)$$

Підставляємо вираз (5.1.13) у друге рівняння системи (5.1.10)

$$\frac{P_0 \left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{k_1}{2k_2}} \frac{d^2 y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} = \frac{k_2 \mu_0 g}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}}.$$

Після перетворень отримаємо

$$\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{k_1}{2k_2} - 1} \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{k_2 \mu_0 g}{P_0}. \quad (5.1.14)$$

Перетворимо диференціальне рівняння (5.1.14) до виду

$$\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{k_1}{2k_2} - 1} d\left(\frac{dy}{dx}\right) = \frac{k_2 \mu_0 g}{P_0} dx. \quad (5.1.15)$$

У випадку, коли  $k_1 = k_2$ , отримуємо диференціальне рівняння, яке зводиться до еліптичних інтегралів 1-го роду (форма осі буде ланцюгова лінія).

$$\int_0^{\frac{dy}{dx}} \frac{d\left(\frac{dy}{dx}\right)}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} = \frac{k_2 \mu_0 g}{P_0} x.$$

У нашому випадку, для вирішення диференціального рівняння (5.1.14) необхідно використовувати чисельне інтегрування. Опис алгоритму, структури програми наведено в третьому розділі.

Чисельне інтегрування дозволить отримати масив даних, які апроксимувались з використанням програмного забезпечення написаного на мові Object Pascal в середовищі Delphi.

Для чисельного інтегрування використовувався метод Рунге-Кутта-Мерсона з автоматичним вибором кроку інтегрування (програма наведена в Додатку до дисертації). Даний метод має більшу стійкість до виникнення нестійкості рішення.

Для апроксимації використовувалася поліноміальна апроксимація з автоматичним вибором ступеня полінома (програма наведена в Додатку до дисертації).

**Визначення натягу і форми пружної на вигин нитки при поперечному ковзанні**

Цей вид взаємодії відбувається, коли розрахунковий радіус поперечного перерізу нитки сумарний з відстанню між направляючими дугами А і В (див.рис.5.1.1). У цьому випадку необхідно враховувати згинальну жорсткість нитки. При виведенні залежностей будемо вважати, що згинальний момент пропорційний кривизні осі нитки, а швидкість зміни величини перерізуючої сили по дуговій координаті дуже мала, що пояснюється незначною величиною відхилення осі нитки від лінії з'єднує точки А і В. Крім того, будемо вважати, що маса нитки рівномірно розподілена по її довжині.

На рис.5.1.2.1 представлена відповідна розрахункова схема.

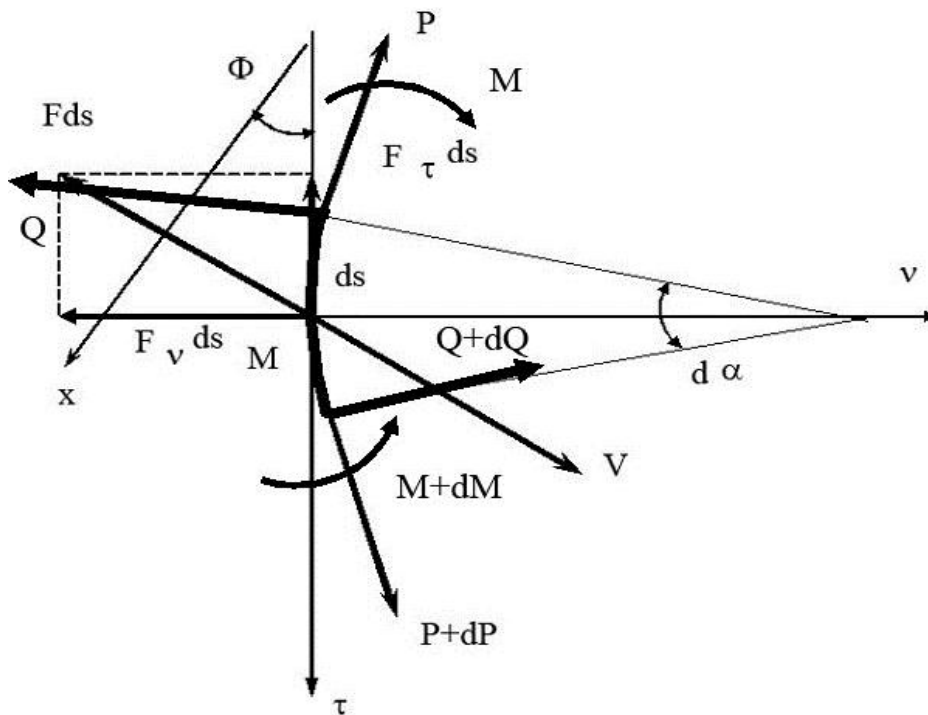


Рис.2.5.1. Розрахункова схема для визначення натягу і форми жорсткої на вигин нитки з урахуванням анізотропії фрикційних властивостей

З урахуванням анізотропії фрикційних властивостей нитки, спроектуємо всі діючі на елементарний відрізок нитки  $ds$  сили на осі натурального тригранника, а також складемо рівняння рівноваги моментів усіх сил відносно точки центру елементарного відрізка.

У результаті одержимо наступну систему диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned} \frac{dP}{ds} - qQ - F_{\tau} &= 0, \\ \frac{dQ}{ds} + Pq - F_{\nu} &= 0, \\ \frac{dM}{ds} + Q &= 0, \quad M = Bq, \\ N = \mu_0 g, \quad q &= \frac{d\varphi}{ds}, \end{aligned} \tag{5.1.2.1}$$

де  $P$  - натяг нитки, Н;

$s$  - дугова координата, м;

$q$  - кривизна осі нитки, 1/м;

$F_{\tau}, F_{\nu}$  - проекції сили тертя на осі натурального тригранника;

$Q$  - перерізуюча сила, Н;

$M$  - згинальний момент, Нм;

$B$  - коефіцієнт згинальної жорсткості, Нм<sup>2</sup>;

$\varphi$  - кут нахилу дотичної в точці  $M$  до осі  $x$ , рад.;

$N$  - питома нормальна реакція поверхні, Н;

$\mu_0$  - лінійна щільність нитки, кг/м;

$g$  - прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

При вирішенні завдання будемо вважати, що нитка нерозтяжна ( $f = 1$ ).

Складові сили тертя визначаються за наступними формулами

$$\begin{aligned} F_{\tau} &= F_1 \sin \varphi, \\ F_{\nu} &= F_2 \cos \varphi. \end{aligned} \tag{5.1.2.2}$$

Величини складових сили тертя визначаються за формулами

$$F_1 = k_1 N, \quad F_2 = k_2 N, \quad (5.1.2.3)$$

де  $k_1, k_2$  - коефіцієнти тертя відповідно при русі в напрямку дотичної і нормальної осей.

Тоді, з урахуванням (5.1.2.2) - (5.1.2.3), система диференціальних рівнянь (5.1.2.1) прийме вигляд

$$\begin{aligned} \frac{dP}{ds} - qQ - k_1 \mu_0 g \sin \varphi &= 0, \\ \frac{dQ}{ds} + Pq - k_2 \mu_0 g \cos \varphi &= 0, \\ \frac{dM}{ds} + Q &= 0, \quad M = Bq, \\ N = \mu_0 g, \quad q &= \frac{d\varphi}{ds}, \end{aligned} \quad (5.1.2.4)$$

Коефіцієнт згинальної жорсткості визначається за формулою

$$B = EI,$$

де  $E$  - модуль пружності нитки при розтягуванні, Н/м<sup>2</sup>;

$I$  - момент інерції перерізу нитки, м<sup>4</sup>;

З урахуванням останнього виразу система диференціальних рівнянь (5.1.2.4) прийме вигляд

$$\begin{aligned} \frac{dP}{ds} - qQ - k_1 \mu_0 g \sin \varphi &= 0, \\ \frac{dQ}{ds} + Pq - k_2 \mu_0 g \cos \varphi &= 0, \\ \frac{dM}{ds} + Q &= 0, \quad M = EIq, \\ N = \mu_0 g, \quad q &= \frac{d\varphi}{ds}, \end{aligned} \quad (5.1.2.5)$$

З третього рівняння системи (5.1.2.5) отримуємо

$$Q = -\frac{dM}{ds}. \quad (5.1.2.6)$$

Підставляємо (5.1.2.6) в четверте рівняння системи диференціальних рівнянь (5.1.2.5) (тут вважаємо, що коефіцієнт згинальної жорсткості нитки на вигин є постійною величиною)

$$Q = -\frac{Bdq}{ds}. \quad (5.1.2.7)$$

Отриманий результат підставляємо в перше рівняння системи (5.1.2.5), отримуємо

$$\frac{dP}{ds} + \frac{Bqdq}{ds} - k_1\mu_0g \sin \varphi = 0.$$

Помножимо ліву і праву частини останнього диференціального рівняння на  $ds$

$$dP + Bqdq - k_1\mu_0g \sin \varphi ds = 0. \quad (5.1.2.8)$$

У рівнянні (5.1.2.8) рівняння

$$\sin \varphi ds = dy.$$

З урахуванням цього матимемо

$$dP + Bqdq - k_1\mu_0g dy = 0.$$

Зінтегруємо останнє диференціальне рівняння

$$P = C - B\frac{q^2}{2} + k_1\mu_0gy, \quad (5.1.2.9)$$

де  $C$  - довільна стала інтегрування,  $H$ .

При наступних початкових умовах (в точці  $O$  -

рис.5.1.1)  $P = P_0$ ,  $y = y_0$ ,  $q = q_0$ , отримаємо

$$C = P_0 + B\frac{q_0^2}{2}.$$

Підставляючи останній вираз в (5.1.2.9), отримаємо

$$P = P_0 + \frac{B}{2}(q_0^2 - q^2) + k_1\mu_0gy. \quad (5.1.2.10)$$

У другому рівнянні системи (5.1.2.5) можна знехтувати першим членом в лівій частині (швидкість зміни перерізуючої сили по дуговій координаті незначна). Отже



$$P = \frac{k_2 \mu_0 g \cos \varphi}{q}. \quad (5.1.2.11)$$

Підставляємо отриманий результат в перше рівняння системи (5.1.2.5)

$$\frac{k_2 \mu_0 g d(\cos \varphi)}{q ds} - \frac{k_2 \mu_0 g \cos \varphi dq}{q^2 ds} + \frac{Bq^2 dq}{ds} - k_1 \mu_0 g \sin \varphi = 0.$$

Перетворимо останній вираз до наступного вигляду

$$-k_2 \mu_0 g \sin \varphi - \frac{k_2 \mu_0 g \cos \varphi dq}{q d\varphi} + \frac{Bq^2 dq}{d\varphi} - k_1 \mu_0 g \sin \varphi = 0.$$

Згрупуємо в останньому рівнянні подібні члени

$$-(k_1 + k_2) \mu_0 g \sin \varphi - \frac{k_2 \mu_0 g \cos \varphi dq}{q d\varphi} + \frac{Bq^2 dq}{d\varphi} = 0.$$

Множачи праву і ліву частини останнього рівняння на  $d\varphi$ , розділимо на  $\cos \varphi$  і  $\mu_0 g$ , отримаємо

$$-(k_1 + k_2) \mu_0 g \sin \varphi - \frac{k_2 q}{q} + \frac{Bq^2 dq}{\mu_0 g \cos \varphi} = 0.$$

Після інтегрування одержимо

$$\ln(\cos \varphi)^{(k_1+k_2)} - \ln q^{k_2} + \frac{Bq^3}{3\mu_0 g \cos \varphi_*} = \ln C_1, \quad (5.1.2.12)$$

де  $C_1$  довільна постійна інтегрування. Тут необхідно зазначити, що при інтегруванні останнього члена використовувалася перша теорема про середню. Значення  $\cos \varphi_*$  досліджується на інтервалі від 0 до кута нахилу дотичної в точці закріплення А (отримуємо  $\varphi_* = 0$ ).

Визначаємо довільну постійну інтегрування при наступних граничних умовах при  $\varphi = 0 \quad q = q_0$ .

Тоді з (5.1.2.12) отримаємо

$$\ln C_1 q_0^{k_2} = \frac{Bq_0^3}{3\mu_0 g},$$

або

$$C_1 q_0^{k_2} = e^{\frac{Bq_0^3}{3\mu_0 g}}.$$

Остаточно

$$C_1 = \frac{e^{\frac{Bq_0^3}{3\mu_0 g}}}{q_0^{k_2}}. \quad (5.1.2.13)$$

Підставляємо (5.1.2.13) в рівняння (5.1.2.12)

$$\ln \frac{\cos \varphi^{(k_1+k_2)} q_0^{k_2}}{q^{k_2} e^{\frac{Bq_0^3}{3\mu_0 g}}} = -\frac{Bq_0^3}{3\mu_0 g}. \quad (5.1.2.14)$$

Перетворимо рівняння (5.1.2.14) у вигляд

$$\frac{\cos \varphi^{(k_1+k_2)} q_0^{k_2}}{q^{k_2}} = \frac{e^{\frac{Bq_0^3}{3\mu_0 g}}}{e^{\frac{Bq_0^3}{3\mu_0 g}}}.$$

Остаточно

$$\cos \varphi = \frac{q^{k_2}}{q_0^{k_2}} e^{\frac{B}{3\mu_0 g} (q_0^3 - q^3)}. \quad (5.1.2.15)$$

Якщо в рівнянні (5.1.2.15) знехтувати анізотропією тертя і жорсткістю на вигин, то отримаємо класичне рівняння ланцюгової лінії.

На рис.5.1.2.2 представлені розрахунки залежності кута нахилу дотичної і натягу нитки від величини кривизни осі нитки. Розрахунки виконувалися для наступних значень:  $q_0=1 \text{ м}^{-1}$ ,  $B=17 \cdot 10^{-8} \text{ Нм}^2$ ,  $\mu_0 g=3 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ ,  $k_1=0,1$ ,  $k_2=0,35$ .

Аналіз представлених графічних залежностей показує, що зі зменшенням кривизни (збільшенням радіуса кривизни) кут нахилу дотичної до осі  $x$  зростає. Така ж тенденція спостерігається і з натягом.

**Дослідження поперечного ковзання нитки по направляючій поверхні малої кривизни з урахуванням анізотропії тертя**

Цей вид взаємодії нитки з направляючою поверхнею зустрічається в багатьох технологічних процесах текстильної та трикотажної промисловості. Тут мається на увазі, що радіус кривизни направляючої поверхні значно перевищує значення розрахункового радіуса поперечного перерізу нитки.

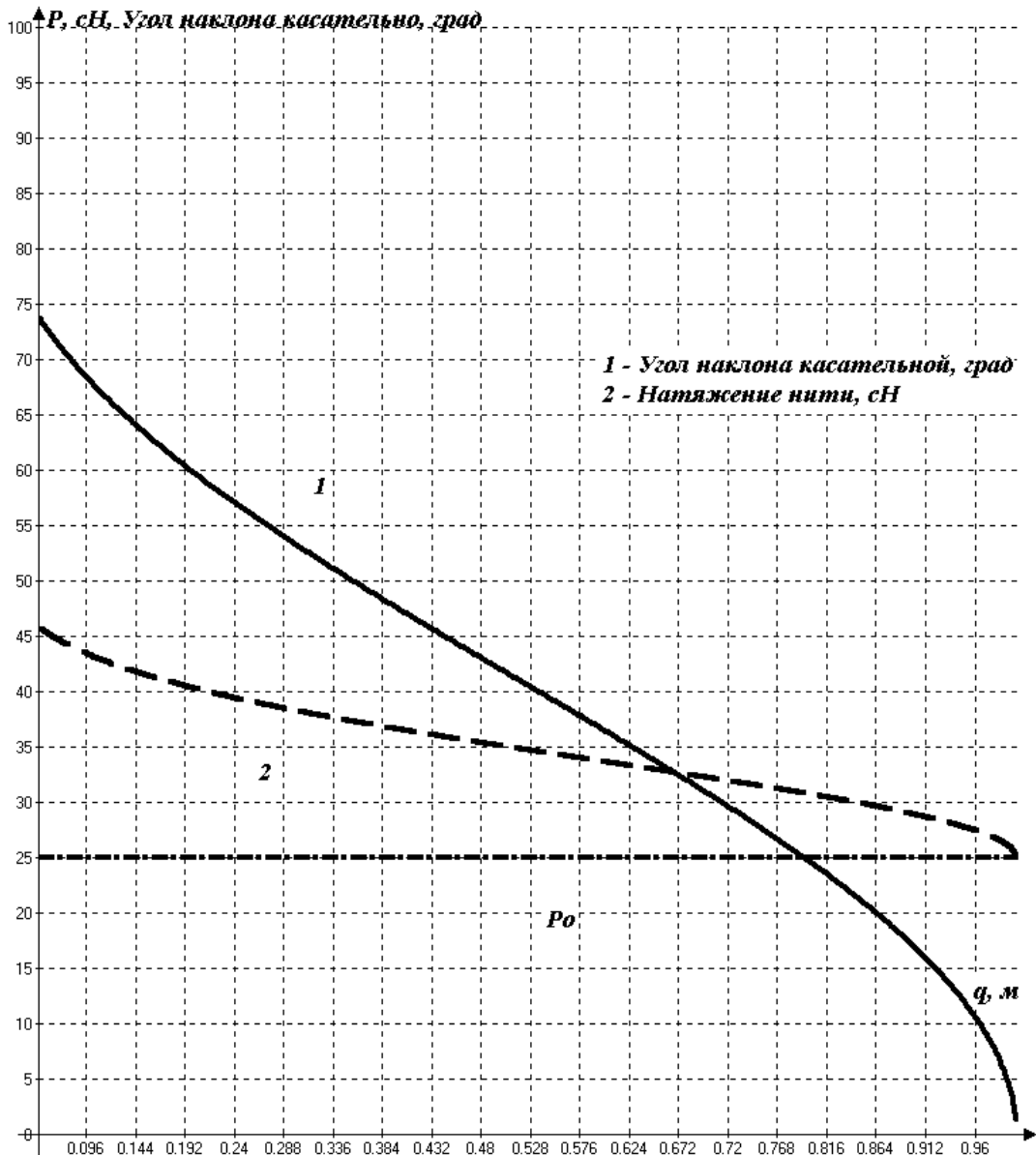


Рис.5.1.2.2. Графічні залежності зміни кута нахилу дотичної та натягу від кривизни

В якості допущення будемо вважати, що направляюча поверхня являє собою циліндричну поверхню. Також будемо вважати, що силами ваги елемента нитки можна знехтувати (натяг нитки, сили тертя перевищують силу ваги елемента нитки на один два порядки). На рис.5.1.3.1 представлена розрахункова схема.

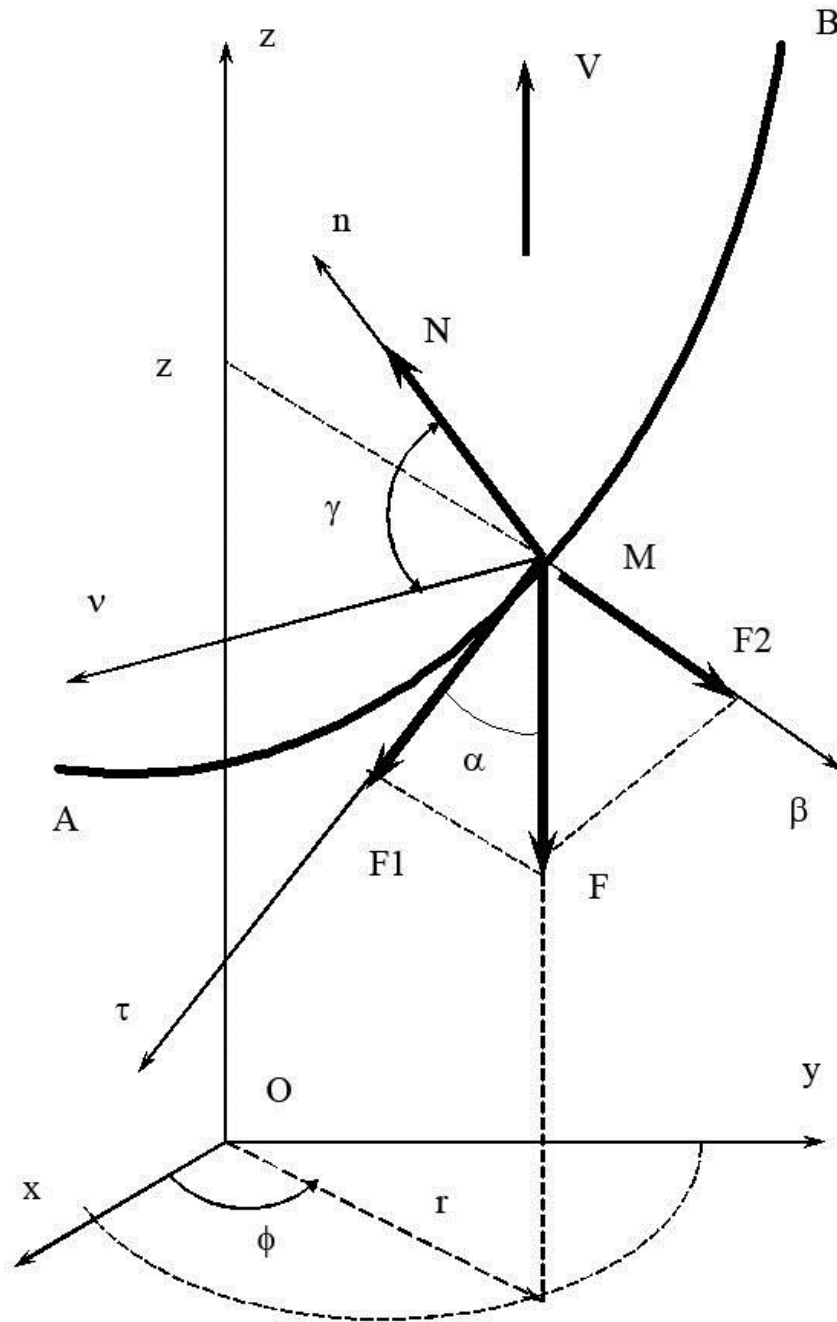


Рис.5.1.3.1. Розрахункова схема

Мета даного дослідження - визначити натяг і форму осі нитки як функцій дугової координати  $s$ . Виділяємо на ділянці нитки  $AB$  нескінченно малий елемент  $ds$  з точкою  $M$  у центрі його ваги.

При поперечному ковзанні по циліндричній поверхні на нього діятиме повна реакція, віднесена до одиниці довжини (надалі для простоти просто сила або реакція)  $Rds$ , яка розкладається на дві складові: нормальну реакцію поверхні  $Nds$  і силу тертя  $Fds$ . Тут необхідно зазначити, що вектор сили тертя завжди буде спрямований протилежно вектору швидкості.

Сила тертя і одиничний орт дотичної  $\tau$  розташовуються в дотичній площині. Натуральний тригранник розташовується таким чином, щоб і одиничний орт бінормалі також розташовувався в дотичній площині. Кут між нормаллю натурального тригранника і нормаллю  $n$  до поверхні в точці  $M$  (кут геодезичного відхилення) позначимо  $\gamma$ .

Найбільш зручною системою координат, в даному випадку, буде циліндрична координатна система. В якості координат використовуються  $r, \varphi, z$ . Зв'язок між декартовими координатами і циліндричними показаний на рис.5.1.3.1.

Сила тертя, розташована в дотичній площині, визначається з наступної системи рівнянь

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2, \quad F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}, \quad (5.1.3.1)$$

де  $F_1 = k_1 N$  - проекція сили тертя  $F$  на дотичну вісь натурального тригранника;

$F_2 = k_2 N$  - проекція сили тертя  $F$  на бінормальну вісь натурального тригранника;

$k_1, k_2$  - коефіцієнти тертя нитки в подовжньому і поперечному напрямку, котрі характеризують анізотропію фрикційних властивостей.

Тоді величину сили тертя, з урахуванням (5.1.3.1), можна визначити за наступною формулою

$$F = N\sqrt{k_1^2 + k_2^2}. \quad (5.1.3.2)$$

Основна система диференціальних рівнянь в циліндричних координатах, що описує поперечне ковзання нитки по направляючій з урахуванням анізотропії фрикційних властивостей, буде мати вигляд

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds} \left( P \frac{dr}{ds} \right) - Pr \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 + N &= 0, \\ \frac{d}{ds} \left( Pr \frac{d\varphi}{ds} \right) &= 0, \\ \frac{d}{ds} \left( P \frac{dz}{ds} \right) - \sqrt{k_1^2 + k_2^2} N &= 0, \\ \left( \frac{dr}{ds} \right)^2 + r^2 \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 + \left( \frac{dz}{ds} \right)^2 &= 1, \end{aligned} \quad (5.1.3.3)$$

де  $s$  - дугова координата, м;

$P$  - натяг нитки, Н;

$r$  - радіус поперечного перерізу направляючої поверхні, м;

$\varphi$  - циліндрична координата, яка визначає кут повороту радіуса  $r$  по відношенню до позитивного напрямку осі  $x$  (див.рис.5.1.3.1), рад;

$N$  - нормальна реакція поверхні, Н;

$z$  - циліндрична координата, вісь якої паралельна вектору швидкості, м.

Враховуючи, що в якості направляючої поверхні був обраний циліндр ( $r = const$ ), система диференціальних рівнянь (5.1.3.3) прийме вигляд

$$\begin{aligned} - Pr \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 + N &= 0, \\ \frac{d}{ds} \left( Pr \frac{d\varphi}{ds} \right) &= 0, \\ \frac{d}{ds} \left( P \frac{dz}{ds} \right) - \sqrt{k_1^2 + k_2^2} N &= 0, \\ r^2 \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 + \left( \frac{dz}{ds} \right)^2 &= 1. \end{aligned} \quad (5.1.3.4)$$

З другого рівняння системи (5.1.3.4) отримаємо

$$r \frac{d}{ds} \left( P \frac{d\varphi}{ds} \right) = 0.$$

Або

$$\frac{d}{ds} \left( P \frac{d\varphi}{ds} \right) = 0.$$

В остаточному вигляді

$$P \frac{d\varphi}{ds} = C_1 = \text{const.} \quad (5.1.3.5)$$

З рівняння (5.1.3.5) визначимо значення похідної

$$\frac{d\varphi}{ds} = \frac{C_1}{P}. \quad (5.1.3.6)$$

З першого рівняння системи (5.1.3.4) визначаємо значення нормальної реакції

$$N = Pr \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2. \quad (5.1.3.7)$$

Підставляємо вираз (5.1.3.7) у третє диференціальне рівняння системи (5.1.3.4)

$$\frac{d}{ds} \left( P \frac{dz}{ds} \right) - \sqrt{k_1^2 + k_2^2} Pr \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 = 0, \quad (5.1.3.8)$$

Перетворимо рівняння (5.1.3.8) у вигляд

$$\frac{dP}{ds} \frac{dz}{ds} + P \frac{d^2 z}{ds^2} - \sqrt{k_1^2 + k_2^2} Pr \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 = 0. \quad (5.1.3.9)$$

З четвертого диференціального рівняння системи (5.1.3.4) визначимо

$$\left( \frac{dz}{ds} \right)^2 = 1 - r^2 \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2. \quad (5.1.3.10)$$

З виразу (5.1.3.10) визначаємо значення першої похідної циліндричної координати по дуговій координаті

$$\frac{dz}{ds} = \sqrt{1 - r^2 \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2}. \quad (5.1.3.11)$$

Диференціюємо рівняння (5.1.3.11) по дуговій координаті  $s$  і визначимо значення другої похідної

$$\frac{d}{ds} \left( \frac{dz}{ds} \right) = \frac{d^2 z}{ds^2} = - \frac{r^2 \left( \frac{d^2 \varphi}{ds^2} \frac{d\varphi}{ds} \right)}{\sqrt{1 - r^2 \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2}}. \quad (5.1.3.12)$$

Для визначення значення другої похідної циліндричної координати  $\varphi$  по дуговій координаті  $s$  диференціюємо вираз (5.1.3.6) і отримуємо

$$\frac{d^2 \varphi}{ds^2} = - \frac{C_1 \frac{dP}{ds}}{P^2}. \quad (5.1.3.13)$$

Підставляємо вираз (5.1.3.13) в диференціальне рівняння (5.1.3.12), отримуємо

$$\frac{d^2 z}{ds^2} = - \frac{r^2 \left( - \frac{C_1 \frac{dP}{ds}}{P^2} \frac{d\varphi}{ds} \right)}{\sqrt{1 - r^2 \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2}}. \quad (5.1.3.14)$$

В остаточному вигляді матимемо

$$\frac{d^2 z}{ds^2} = \frac{r^2 C_1^2}{P^3 \sqrt{1 - r^2 \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2}} \frac{dP}{ds}. \quad (5.1.3.15)$$

Підставляємо вираз (5.1.3.15) в диференціальне рівняння (5.1.3.9) і з урахуванням (5.1.3.11) отримуємо

$$\frac{dP}{ds} \sqrt{1 - r^2 \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2} + \frac{r^2 C_1^2}{P^2 \sqrt{1 - r^2 \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2}} \frac{dP}{ds} - \sqrt{k_1^2 + k_2^2} Pr \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 = 0. \quad (5.1.3.16)$$

З урахуванням виразу (5.1.3.6) перетворимо диференціальне рівняння (5.1.3.16) до вигляду

$$\frac{dP}{ds} \sqrt{1 - r^2 \left( \frac{C_1}{P} \right)^2} + \frac{r^2 C_1^2}{P^2 \sqrt{1 - r^2 \left( \frac{C_1}{P} \right)^2}} \frac{dP}{ds} - \sqrt{k_1^2 + k_2^2} \frac{C_1^2 r}{P} = 0.$$

Перетворимо останній вираз

$$\frac{dP}{ds} \left[ \sqrt{1 - r^2 \left( \frac{C_1}{P} \right)^2} + \frac{r^2 C_1^2}{P^2 \sqrt{1 - r^2 \left( \frac{C_1}{P} \right)^2}} \right] - \sqrt{k_1^2 + k_2^2} \frac{C_1^2 r}{P} = 0.$$



З останнього виразу визначаємо значення першої похідної натягу нитки як функції дугової координати

$$\frac{dP}{ds} = \frac{\sqrt{k_1^2 + k_2^2} \frac{C_1^2 r}{P}}{\sqrt{1 - r^2 \left(\frac{C_1}{P}\right)^2} + \frac{r^2 C_1^2}{P^2 \sqrt{1 - r^2 \left(\frac{C_1}{P}\right)^2}}}. \quad (5.1.3.17)$$

Перетворимо диференціальне рівняння (5.1.3.17) і остаточно отримаємо

$$\frac{dP}{ds} = \frac{\sqrt{k_1^2 + k_2^2} C_1^2 r P \sqrt{1 - r^2 \left(\frac{C_1}{P}\right)^2}}{\{P^2 [1 - r^2 \left(\frac{C_1}{P}\right)^2] + r^2 C_1^2\}}. \quad (5.1.3.18)$$

Отримане диференціальне рівняння першого порядку дозволяє одержати залежність натягу нитки від дугової координати з урахуванням анізотропії тертя при поперечному ковзанні. Його важко проінтегрувати. Тому для його вирішення будемо використовувати чисельні методи, зокрема метод Рунге-Кутта-Мерсона. Програма для реалізації цього методу наведена в Додатку.

Чисельно вирішуючи диференціальне рівняння (5.1.3.18), отримаємо масив даних, який дозволяє визначати значення натягу нитки залежно від дугової координати.

Цілком очевидно, що для зручності користування отриманими даними їх необхідно представити у вигляді деякої функції. Для цього в роботі було здійснено апроксимацію даних з використанням спеціального програмного забезпечення, описаного в третьому розділі. Апроксимація здійснювалася з використанням степеневого полінома. Ця програма дозволяє здійснювати апроксимацію або із заданою точністю (ступінь полінома визначається автоматично) або користувач сам задає ступінь полінома.

У результаті отримаємо деяку нову функцію

$$P = V(s) = a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n, \quad (5.1.3.19)$$

де  $a_0, a_1, a_2 \dots a_n$  - коефіцієнти степеневого полінома.

Перейдемо до визначення залежностей  $\varphi(s)$  та  $z(s)$ . З (5.1.3.11), з урахуванням (5.1.3.6) отримаємо

$$\frac{dz}{ds} = \sqrt{1 - r^2 \left(\frac{C_1}{P}\right)^2}.$$

Підставляємо в останній вираз (5.1.3.19)

$$\frac{dz}{ds} = \sqrt{1 - r^2 \left(\frac{C_1}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n}\right)^2}. \quad (5.1.3.20)$$

Залежність циліндричної координати від дугової координати визначимо з урахуванням (5.1.3.6) і (5.1.3.19)

$$\frac{d\varphi}{ds} = \frac{C_1}{P} = \frac{C_1}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n}. \quad (5.1.3.21)$$

Таким чином, чисельне інтегрування системи трьох диференціальних рівнянь першого порядку

$$\frac{dP}{ds} = \frac{\sqrt{k_1^2 + k_2^2} C_1^2 r P \sqrt{1 - r^2 \left(\frac{C_1}{P}\right)^2}}{\{P^2 [1 - r^2 \left(\frac{C_1}{P}\right)^2] + r^2 C_1^2\}},$$

$$\frac{dz}{ds} = \sqrt{1 - r^2 \left(\frac{C_1}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n}\right)^2},$$

$$\frac{d\varphi}{ds} = \frac{C_1}{P} = \frac{C_1}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n},$$

дозволяє одержати залежності натягу і форми осі нитки при поперечному ковзанні по направляючій малої кривизни з урахуванням анізотропії тертя.

### **Взаємодія жорсткої на вигин нитки з циліндричною направляючою великої кривизни**

Певний інтерес представляє дослідження процесу взаємодії жорстких на вигин ниток з циліндричними направляючими великої кривизни з урахуванням анізотропії тертя. До жорстких на вигин ниток

відносяться мононитки, комплексні нитки і пряжа з високим скручуванням.

При виведенні основних рівнянь необхідно зробити кілька допущень. По-перше, будемо вважати, що нитка на поверхні буде розташовуватися в дотичній площині (див.рис.5.1.4.1a), тобто кут нахилу площини  $\alpha$  до горизонтальної осі  $z$  визначається кутом нахилу ведучих голок нитки. Обґрунтованість прийняття такого припущення визначається тим, що під дією згинальних моментів в нормальній і направляючій площинах, за рахунок жорсткості на вигин нитка буде прагнути зайняти положення, яке забезпечить їй найменше значення потенційної енергії, необхідної для забезпечення стаціонарного положення рівноваги в процесі переміщення.

Друге припущення полягає в тому, що масою елемента нитки, який взаємодіє з направляючою поверхнею можна знехтувати. Поєднаємо з віссю циліндра циліндричну координатну систему. Вісь  $z$  буде збігатися з віссю циліндра. Її позитивний напрямок буде протилежний напрямку вектора швидкості (тут ми будемо використовувати метод зверненого руху).

Тоді, форма осі жорсткої нитки (див.рис.5.1.4.1б) представлятиме собою еліпс. Велика і мала півосі визначаються з виразів

$$a = \frac{r}{\sin \alpha}, \quad b = r, \quad (5.1.4.1)$$

де  $r$  - радіус циліндра, м;

$a, b$  - відповідно велика і мала півосі еліпса.

Використовуючи основні положення диференціальної геометрії можна отримати дві очевидні диференціальні рівності

$$\begin{aligned} r \frac{d\varphi}{ds} &= \sin \alpha, \\ \frac{dz}{ds} &= \cos \alpha, \end{aligned} \quad (5.1.4.2)$$

де  $r, \varphi, z$  - відповідні циліндричні координати;

$s$  - дугова координата, м;

$\alpha$  - кут нахилу дотичної площини до осі  $z$ , рад.

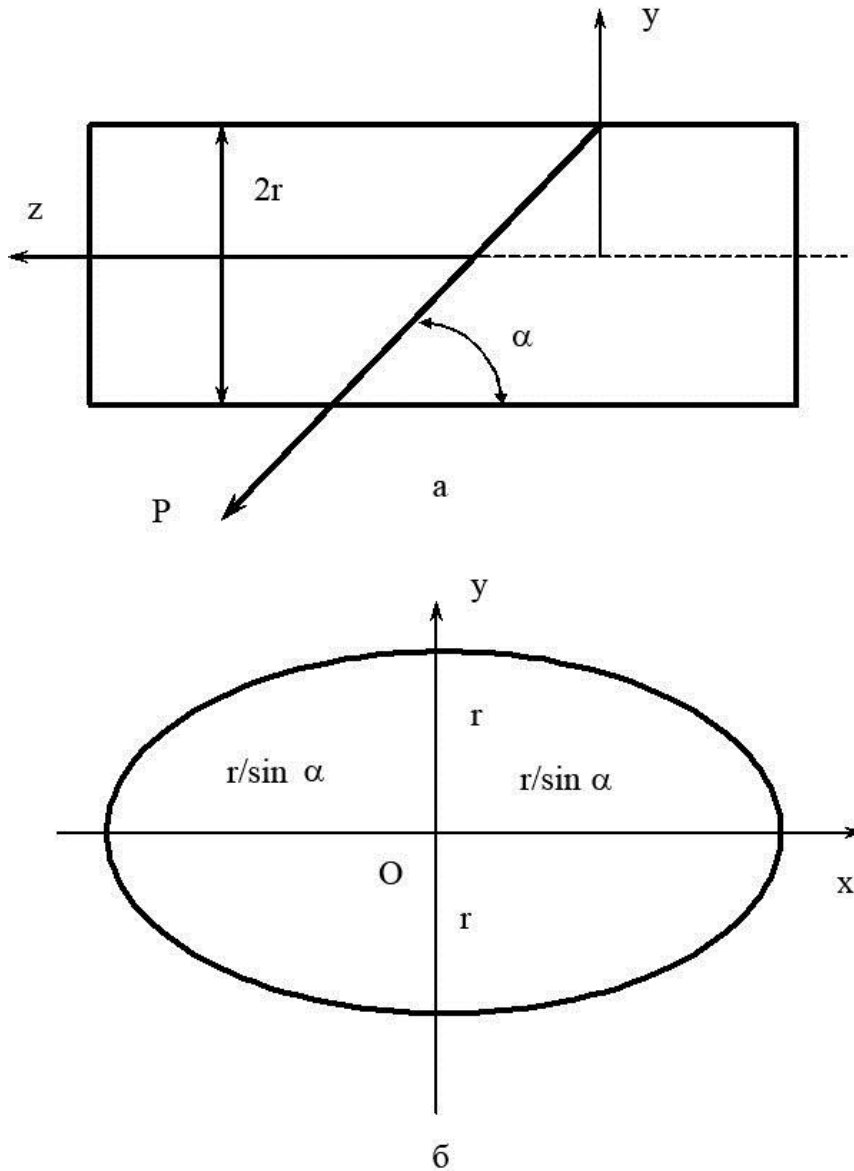


Рис.5.1.4.1. Розрахункова схема для визначення натягу жорсткої на вигин нитки

Сила тертя, розташована в дотичній площині, визначається з наступної системи рівнянь

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 \quad , \quad F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}, \quad (5.1.4.3)$$

де  $F_1 = k_1 N$  - проекція сили тертя  $F$  на дотичну вісь натурального тригранника;  $F_2 = k_2 N$  - проекція сили тертя  $F$  на бінормальну вісь натурального тригранника;

$k_1, k_2$  - - коефіцієнти тертя нитки в подовжньому і поперечному напрямку, які характеризують анізотропію фрикційних властивостей.

Тоді величину сили тертя, з урахуванням (2. 4. 3), можна визначити за наступною формулою

$$F = N\sqrt{k_1^2 + k_2^2}. \quad (5.1.4.4)$$

Основна система диференціальних рівнянь в циліндричних координатах, що описує поперечне ковзання жорсткої на вигин нитки по направляючій з урахуванням анізотропії фрикційних властивостей, буде мати вигляд

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds} \left( P \frac{dr}{ds} \right) - Pr \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 + N &= 0, \\ \frac{d}{ds} \left( Pr \frac{d\varphi}{ds} \right) &= 0, \\ \frac{d}{ds} \left( P \frac{dz}{ds} \right) - \sqrt{k_1^2 + k_2^2} N &= 0, \\ \left( \frac{dr}{ds} \right)^2 + r^2 \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 + \left( \frac{dz}{ds} \right)^2 &= 1, \end{aligned} \quad (5.1.4.5)$$

де  $P$  - натяг нитки, Н;

$N$  - нормальна реакція поверхні, Н.

Враховуючи, що в якості направляючої поверхні був обраний циліндр ( $r = const$ ), система диференціальних рівнянь (2. 4. 5) набуде вигляду

$$\begin{aligned}
 -Pr\left(\frac{d\varphi}{ds}\right)^2 + N &= 0, \\
 \frac{d}{ds}\left(Pr\frac{d\varphi}{ds}\right) &= 0, \\
 \frac{d}{ds}\left(P\frac{dz}{ds}\right) - \sqrt{k_1^2 + k_2^2}N &= 0, \\
 r^2\left(\frac{d\varphi}{ds}\right)^2 + \left(\frac{dz}{ds}\right)^2 &= 1.
 \end{aligned}
 \tag{5.1.4.6}$$

Підставимо в останню систему диференціальних рівнянь (5.1.4.6) вирази (5.1.4.2), отримаємо

$$\begin{aligned}
 -Pr\left(\frac{\sin\alpha}{r}\right)^2 + N &= 0, \\
 \frac{d}{ds}(P\sin\alpha) &= 0, \\
 \frac{d}{ds}(P\cos\alpha) - \sqrt{k_1^2 + k_2^2}N &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{5.1.4.7}$$

Перетворимо систему диференціальних рівнянь (5.1.4.7) до виду

$$\begin{aligned}
 N &= Pr\left(\frac{\sin\alpha}{r}\right)^2, \\
 \frac{d}{ds}(P\sin\alpha) &= 0, \\
 \frac{d}{ds}(P\cos\alpha) &= \sqrt{k_1^2 + k_2^2}N.
 \end{aligned}
 \tag{5.1.4.8}$$

Підставляємо з першого рівняння системи диференціальних рівнянь (5.1.4.8) значення нормальної реакції поверхні в третє рівняння, отримаємо

$$\cos\alpha\frac{dP}{ds} = P\frac{\sin^2\alpha}{r}\sqrt{k_1^2 + k_2^2}.$$

Перетворимо останнє диференціальне рівняння до вигляду

$$\frac{dP}{P} = \frac{\sin^2\alpha}{r\cos\alpha}\sqrt{k_1^2 + k_2^2}ds.$$

Останнє диференціальне рівняння є диференціальним рівнянням із перемінними. Проігноруємо його

$$\frac{dP}{P} = \frac{\sin^2\alpha}{r\cos\alpha}\sqrt{k_1^2 + k_2^2}ds.$$

$$\int_{P_0}^{P_1} \frac{dP}{P} = \frac{\sin^2\alpha}{r\cos\alpha}\sqrt{k_1^2 + k_2^2} \int_0^s ds.$$

Або

$$\ln \frac{P_1}{P_0} = \frac{\sin^2 \alpha}{r \cos \alpha} \sqrt{k_1^2 + k_2^2} s,$$

де  $P_1$  - натяг нитки в точці сходу з циліндра, Н;

$P_0$  - натяг нитки в крайній правій точці на траєкторії (див.рис.5.1.4.1), Н;

$s$  - довжина дуги нитки від точки сходу з направляючої до крайньої правої точки, м.

В остаточному вигляді отримаємо

$$P_1 = P_0 e^{\frac{\sin^2 \alpha}{r \cos \alpha} \sqrt{k_1^2 + k_2^2} s}. \quad (5.1.4.9)$$

Для визначення довжини дуги нитки  $s$  скористаємося наступною системою диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned} ds &= \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dy}\right)^2} dy, \\ \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} &= 1, \\ a &= \frac{r}{\sin \alpha}, \quad b = r. \end{aligned} \quad (5.1.4.10)$$

З другого рівняння системи (5.1.4.10) отримаємо

$$x = a \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}}. \quad (5.1.4.11)$$

Диференціюємо рівняння (5.1.4.11) по  $y$ , отримаємо

$$\frac{dx}{dy} = -\frac{ay}{b^2 \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}}}. \quad (5.1.4.12)$$

Підставляємо (5.1.4.12) в перше рівняння системи (5.1.4.10), отримаємо

$$ds = \sqrt{1 + \frac{a^2 y^2}{b^4 \left(1 - \frac{y^2}{b^2}\right)}} dy. \quad (5.1.4.13)$$

В остаточному вигляді отримаємо

$$ds = \sqrt{\frac{b^4 + y^2(a^2 - b^2)}{b^4 - b^2 y^2}} dy. \quad (5.1.4.14)$$

Проінтегрувати рівняння (5.1.4.14) в елементарних функціях не представляється можливим. Для цієї мети необхідно використовувати відповідні чисельні методи.

У цій роботі ми будемо використовувати метод Сімпсона, суть якого полягає в інтерполяції функції  $f(x)$  в  $n$  проміжках поліномом Лагранжа. Блок-схема реалізації алгоритму методу Сімпсона наведена на рис.5.1.4.2. Після розбиття відрізка  $[a, b]$  на  $m$  рівних частин формула Сімпсона буде мати наступний вигляд

$$I = \int_a^b f(x)dx \cong \frac{H}{3}[f(a) + 4f(a+H) + 2f(a+2H) + \dots + 4f(b-H) + f(b)] - \frac{mH^5}{90} f^{IV}(\xi), \quad (5.1.4.15)$$

де  $f^{IV}(\xi)$  - значення четвертої похідної функції  $f(x)$  в точці  $x = \xi$ , де вона максимальна.

Для реалізації методу Сімпсона в роботі була розроблена спеціальна прикладна програма на мові Object Pascal в середовищі Delphi (дивися Додаток). Ця програма включає в себе три форми ІМТ 1, ІМТ 2, UErrors. Перші дві форми наведені на рис.5.1.4.3. Для введення підінтегральної функції  $f(x)$  на другій формі розміщений стандартний елемент Memo1: Tmemo.

Для коректного введення підінтегральної функції у вікно Memo1: Tmemo в програмі був реалізований спеціально розроблений транслятор Synt.

Основні компоненти форми ІМТ 2 мають вигляд

$$\begin{aligned} \text{TfrmIMT2} &= \text{class(TForm)} \\ \text{lb1IMT2: TLabel; } &\text{lb2IMT2: TLabel;} \\ \text{lb3IMT2: TLabel; } &\text{edt1IMT2: TEdit;} \end{aligned} \quad (5.1.4.16)$$



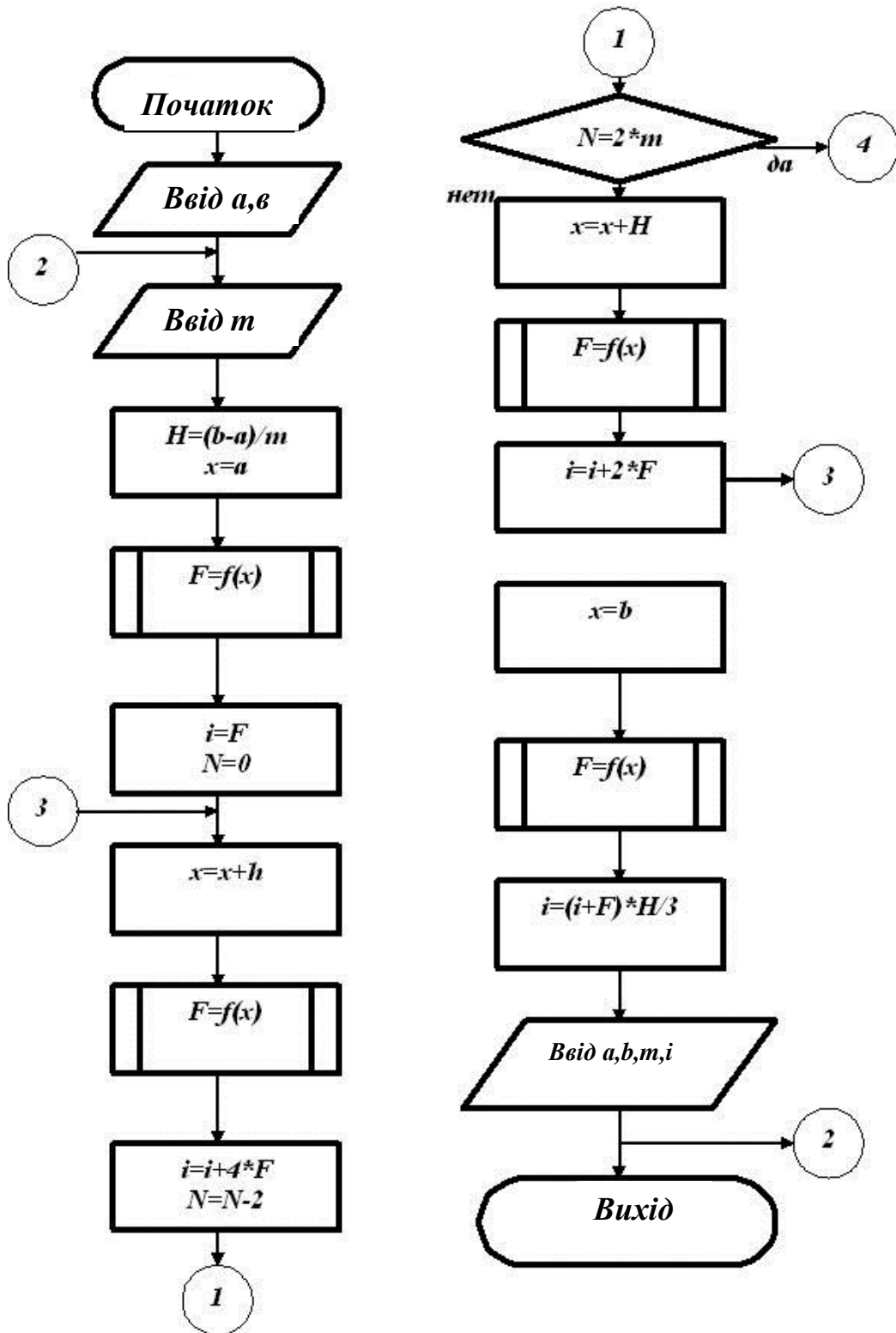


Рис.5.1.4.2. Блок-схема алгоритму методу Сімпсона

Форма Uerrors призначена для повідомлень про помилки при введенні підінтегральною функції. Основні компоненти форми ІМТ1 мають вигляд

```
lbl1IMT1: TLabel;  
lbl2IMT1: TLabel;  
  lbl3IMT1: TLabel;  
lbl4IMT1: TLabel;  
  lbl5IMT1: TLabel;  
btn1IMT1: TButton; (5.1.4.17)  
img1IMT1: TImage;  
  Label1: TLabel;  
  Label2: TLabel;  
  Label3: TLabel
```



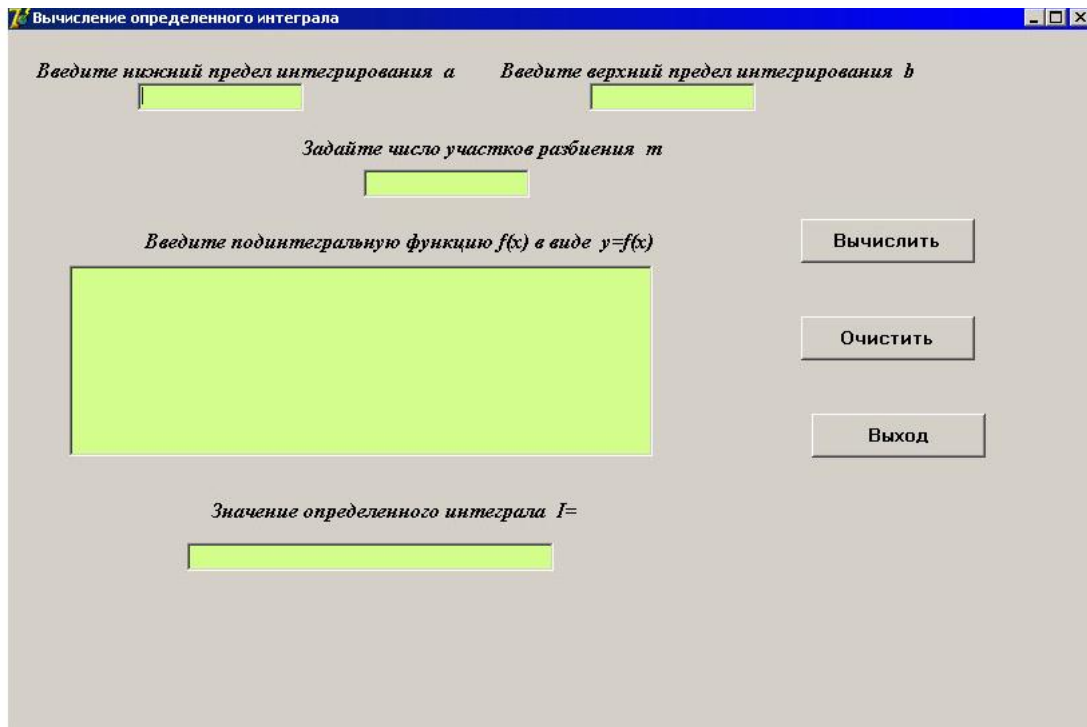


Рис.5.1.4.3. Основні форми програми для обчислення певного інтегралу

Використовуючи розроблену програму обчислюємо значення інтеграла (5.1.4.14)

$$\int_0^s ds = \int_0^y \sqrt{\frac{b^4 + y^2(a^2 - b^2)}{b^4 - b^2 y^2}} dy.$$

Отриманий масив даних апроксимували з використанням спеціальної програми (опис алгоритму і самої програми наведено в розділі 3). В результаті отримуємо степеневий поліном виду

$$s = b_0 + b_1 y + b_2 y^2 + \dots + b_n^n, \quad (5.1.4.18)$$

де  $b_0, b_1, b_2 \dots b_n$  - коефіцієнти апроксимаційного полінома.

Тоді вираз (5.1.4.9) для визначення натягу нитки жорсткої на вигин з урахуванням анізотропії тертя прийме вигляд

$$P_1 = P_0 e^{\frac{\sin^2 \alpha}{r \cos \alpha} \sqrt{k_1^2 + k_2^2} (b_0 + b_1 y + b_2 y^2 + \dots + b_n^n)}. \quad (5.1.4.19)$$

## 5.2. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МАТЕРІАЛУ НИТКИ І АНІЗОТРОПІЇ ТЕРТЯ НА ЇЇ НАТЯГ І ФОРМУ ОСІ

Для теоретичного дослідження впливу матеріалу нитки і анізотропії тертя на натяг і форму її осі були обрані віскозна комплексна нитка 16,7 Текс, капронова комплексна нитка 31,2 Текс, бавовняна гребінна кручена пряжа 23,6 Текс, вовняна гребінна кручена пряжа 36 Текс.

Вибір даного асортименту, в першу чергу, пояснюється приблизно однаковим тексом ниток. Крім того, цей вид сировини широко використовується для виготовлення текстильних і трикотажних виробів. За результатами експериментальних досліджень (див. розділ 4) коефіцієнти тертя в поздовжньому і поперечному напрямках для цього виду сировини відповідно дорівнювали: віскозна комплексна нитка  $k_1 = 0,16$ ,  $k_2 = 0,21$ ; капронова комплексна нитка  $k_1 = 0,18$ ,  $k_2 = 0,24$ ; бавовняна гребінна кручена пряжа  $k_1 = 0,17$ ,  $k_2 = 0,22$ ; вовняна гребінна кручена пряжа  $k_1 = 0,14$ ,  $k_2 = 0,18$  (при виборі значень визначальним була величина в нульовій точці плану експерименту при можливому варіюванні до 10%).

Будова поверхонь робочих органів трикотажних і текстильних машин, а також самих ниток свідчать про те, що величина сили тертя в ортогональних напрямках (наприклад дотичній і нормалі до точки на осі нитки) відрізнятимуться. Це дозволяє говорити про необхідність врахування анізотропії фрикційних властивостей. У загальному випадку величина сили тертя визначається з виразу [10]

$$F = N\sqrt{k_1^2 + k_2^2},$$

де  $F$  - сила тертя;

$N$  - сила нормального тиску;

$\sqrt{k_1^2 + k_2^2}$  - ефективний коефіцієнт тертя [38-41].

Для розкриття його суті представимо силу тертя як функцію швидкості

$$\vec{F} = -\frac{NA\vec{v}}{v},$$

де  $A$  - матриця, яка задає лінійне переміщення;

$v$  - швидкість точки на осі нитки.

Для двох ортогональних напрямів (дотична і нормаль) вираз для даної матриці матиме вигляд

$$A = \begin{pmatrix} \mu_1 \cos \varphi & 0 \\ 0 & \mu_2 \sin \varphi \end{pmatrix},$$

де  $\mu_1, \mu_2$  - коефіцієнти тертя нитки в двох ортогональних напрямках;

$\varphi$  - кут, який утворює вектор швидкості з дотичної до осі нитки.

Тоді ефективний коефіцієнт тертя визначимо по формулі

$$\sqrt{k_1^2 + k_2^2} = \sqrt{\mu_1^2 \cos^2 \varphi + \mu_2^2 \sin^2 \varphi}.$$

**Програмне забезпечення е для про визначення форми осі та натягу нитки при поперечному ковзанні з урахуванням фізико-механічних характеристик у випадку, коли відстань між опорами значно перевищує діаметр нитки**

У розділі 5.1 було отримано диференціальне рівняння (5.1.15), яке представляє диференціальне рівняння другого порядку і визначає собою форму осі нитки при поперечному ковзанні з урахуванням анізотропії тертя. Виконуючи стандартну процедуру зниження ступеня диференціального рівняння прийдемо до системи диференціальних рівнянь першого порядку. Для вирішення цієї системи диференціальних рівнянь будемо використовувати метод Рунге-Кутта-Мерсона з автоматичною

зміною кроку інтегрування. Блок-схема алгоритму представлена на рис.5.2.1.

Даний метод забезпечує наближену оцінку похибки на кожному кроці інтегрування. Похибка інтегрування диференціальних рівнянь визначається порядком  $h^5$  [10,20-31]. При високій точності і рішенні у вигляді кривих з різко відрізною крутизною автоматична зміна кроку забезпечує зменшення загального числа кроків в кілька разів, різко зменшує ймовірність числової нестійкості, дає більш рівномірне розташування точок графіка кривих.

Для реалізації методу Рунге-Кутта-Мерсона з автоматичною зміною кроку інтегрування реалізується наступний алгоритм [10]. На початковому етапі необхідно задати число диференціальних рівнянь першого порядку  $N$ , похибка обчислень  $\varepsilon = E$ , початковий крок інтегрування диференціальних рівнянь  $h = H$  і початкове значення аргументу  $x_0$ , Початкове значення функцій системи диференціальних рівнянь  $y_{10}, y_{20} \dots y_{N0}$ . Обчислюємо коефіцієнти  $K_{0j}, K_{1j}, K_{2j}, K_{3j}, K_{4j}$  шляхом організації п'яти циклів з керуючою змінною  $j = 1, 2, \dots, N$ . Система рівнянь буде мати наступний вигляд

$$\begin{aligned}
 K_{0j} &= hF_j(x_i; Y_{ji}), \\
 K_{1j} &= hF_j(x_i + \frac{1}{3}h; Y_{ji} + \frac{1}{3}K_{0j}), \\
 K_{2j} &= hF_j(x_i + \frac{1}{3}h; Y_{ji} + \frac{1}{6}K_{0j} + \frac{1}{6}K_{1j}), \\
 K_{3j} &= hF_j(x_i + \frac{1}{2}h; Y_{ji} + \frac{1}{8}K_{0j} + \frac{3}{8}K_{2j}), \\
 K_{4j} &= hF_j(x_i + h; Y_{ji} + \frac{1}{2}K_{0j} - \frac{3}{2}K_{2j} + 2K_{3j})
 \end{aligned}
 \tag{5.2.1}$$

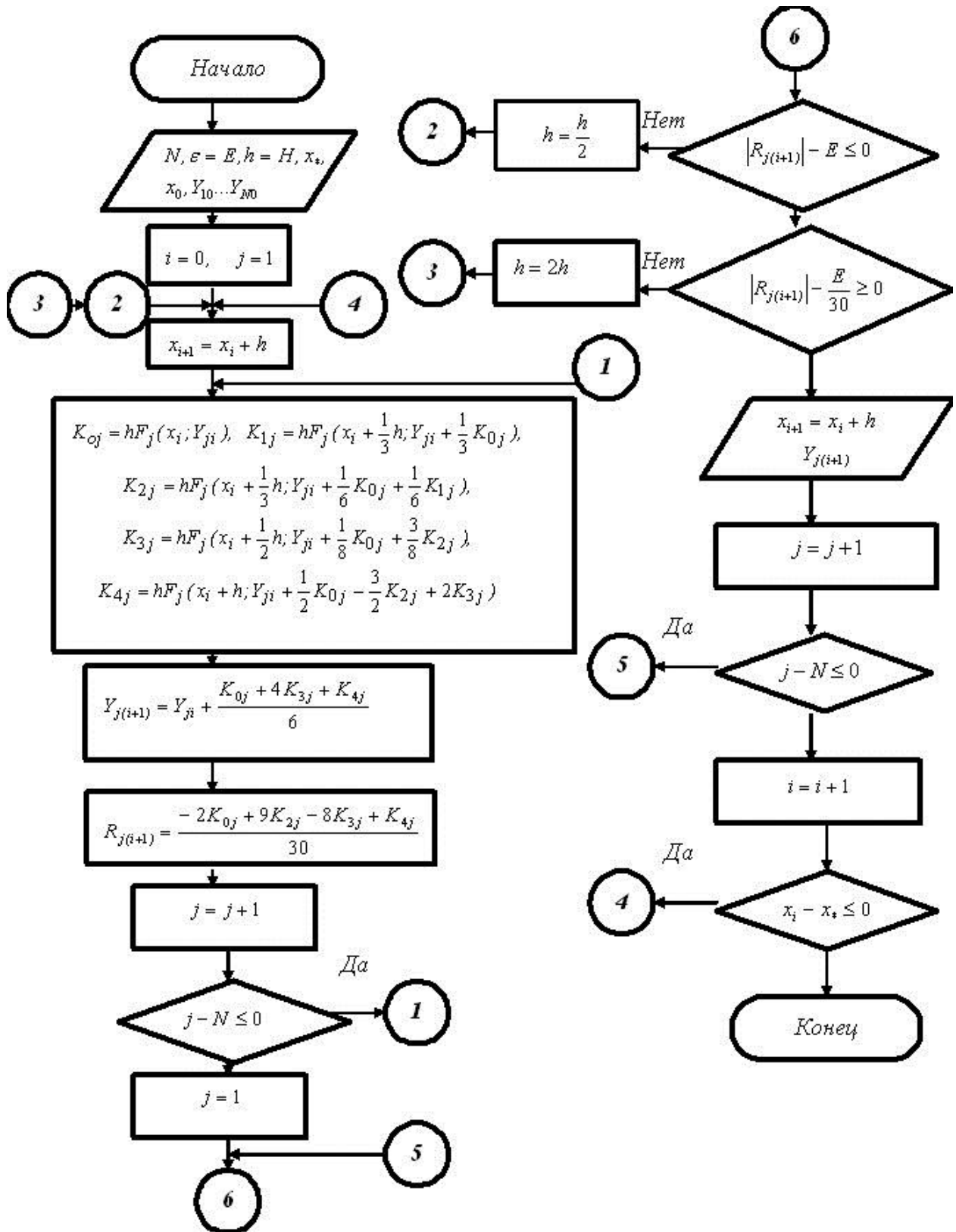


Рис.5.2.1.Блок-схема алгоритму Рунге-Кутта-Мерсона з автоматичною зміною кроку інтегрування

В останньому циклі знаходимо значення

$$Y_{j(i+1)} = Y_{ji} + \frac{K_{0j} + 4K_{3j} + K_{4j}}{6}. \quad (5.2.2)$$

Похибку обчислень визначаємо за формулою

$$R_{j(i+1)} = \frac{-2K_{0j} + 9K_{2j} - 8K_{3j} + K_{4j}}{30}. \quad (5.2.3)$$

На наступному етапі необхідно здійснити перевірку умов

$$|R_{j(i+1)}| - E \leq 0, \quad (5.2.4)$$

і

$$|R_{j(i+1)}| - \frac{E}{30} \geq 0. \quad (5.2.5)$$

Якщо умова (5.2.4) не виконується, то необхідно крок інтегрування диференціальних рівнянь  $h$  розділити на 2 і повторити обчислення коефіцієнтів  $K_{0j}, K_{1j}, K_{2j}, K_{3j}, K_{4j}$  за формулами (5.2.1) відновивши початкові значення  $y_{10}, y_{20} \dots y_{N0}$ . Якщо умова (5.2.4) виконується і виконується умова (5.2.5), то значення  $x_{i+1} = x_i + h$  і  $y_{j(i+1)}$  виводяться на друк.

Якщо умова (5.2.5) не виконується, то крок інтегрування  $h$  збільшують удвічі і повторюють обчислення коефіцієнтів  $K_{0j}, K_{1j}, K_{2j}, K_{3j}, K_{4j}$  за формулами (5.2.1).

Для реалізації даного алгоритму була написана програма на мові Object Pascal в середовищі Delphi. Програма наведена в додатку.

На рис.5.2.2 представлена перша форма TfrmSDU1 = class (TForm) програми для інтегрування системи диференціальних рівнянь з використанням алгоритму Рунге-Кутта-Мерсона з автоматичною зміною кроку інтегрування. На даній формі розташовані 11 міток: lbl1SDU1: TLabel; lbl2SDU1: TLabel; lbl4SDU1: TLabel; lbl 5 SDU 1: TLabel; lbl 6 SDU 1: TLabel; lbl 7 SDU 1: TLabel; Label1: TLabel; Label 2: TLabel; Label 3: TLabel; Label 4: TLabel; Label5: TLabel. Кнопка btn1SDU1: Tbutton



призначена для переходу на другу, основну форму програми, яка представлена на рис.5.2.3. Також на цій формі розташований компонент Image1: Timage для розміщення малюнку.



Рис.5.2.2. Перша форма TfrmSDU1 = class (TForm) програми

На другій основній формі TfrmSDU2 = class (TForm) вісім міток lbl1SDU2: TLabel; lbl 2 SDU 2: TLabel; lbl 3 SDU 2: TLabel; lbl 4 SDU 2: TLabel; lbl 5 SDU 2: TLabel; lbl 6 SDU 2: TLabel; lbl 7 SDU 2: TLabel; lbl8SDU2: TLabel і п'ять однорядкових вікон редагування edt1SDU2: TEdit; edt 2 SDU 2: TEdit; edt 3 SDU 2: TEdit; edt 4 SDU 2: TEdit; edt5SDU2: Tedit.

Вікно edt1SDU2: Tedit призначене для завдання числа диференціальних рівнянь першого порядку. Вікно edt2SDU2: Tedit призначено для введення початкового значення аргументу  $x_0$ . Вікно edt3SDU2: Tedit призначене для введення кінцевого значення аргументу  $E$ . Вікно edt 4 SDU 2: Tedit призначене для завдання похибки

обчислення. Вікно edt5SDU2: Tedit призначене для введення початкового значення кроку інтегрування.

Багаторядкове вікно редагування Memo1: Tmemo призначене для введення, з використанням транслятора, диференціальних рівнянь першого порядку.

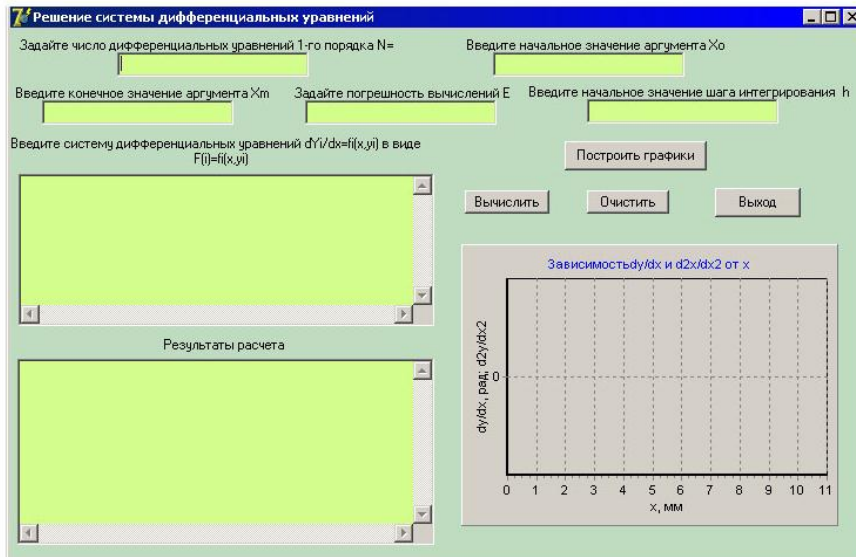


Рис.5.2.3. Основная форма TfrmSDU2 = class (TForm) программы

Багаторядкове вікно редагування mem1SDU2: Tmemo призначене для виведення результатів розрахунку. На рис.5.2.4 представлена форма TfrmSDU2 = class (TForm) з введеними даними.

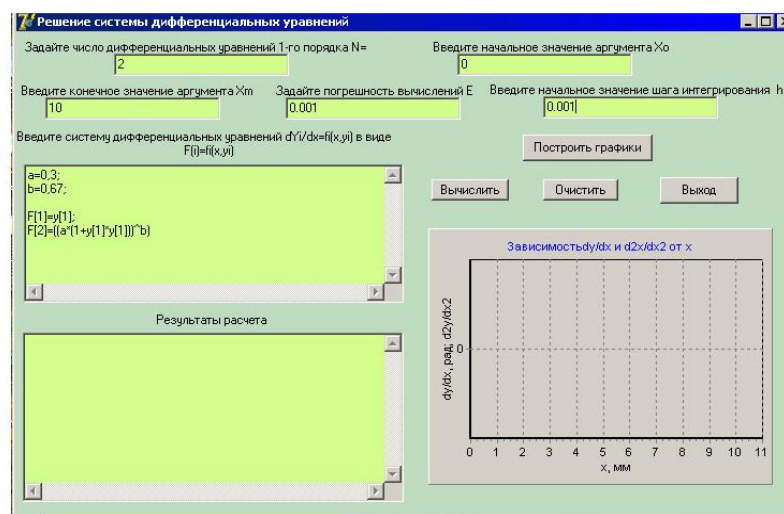


Рис.5.2.4. Ввід даних

Компонент Chart1: Tchart призначений для виведення графічних залежностей обчислюваних величин.

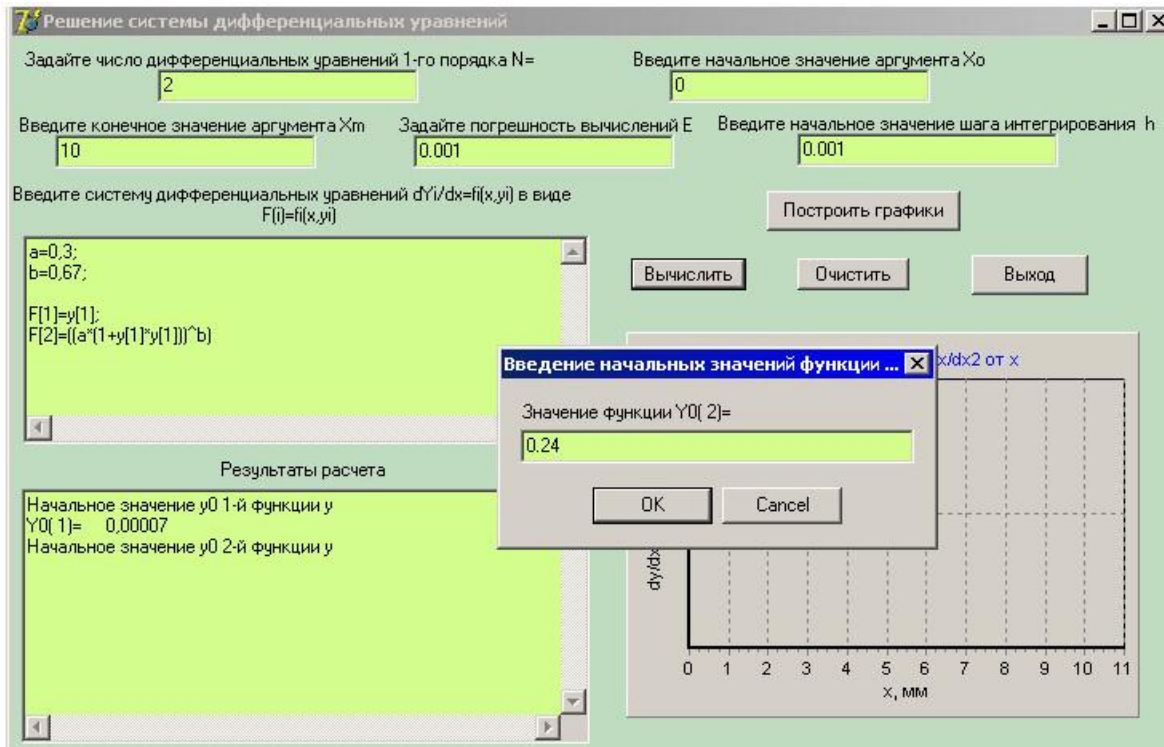


Рис.5.2.5. Задання початкових значень для інтегрування систем

На цій формі розміщені чотири кнопки btn1SDU2: Tbutton; btn2SDU2: TButton; btn3SDU2: Tbutton; Button1: Tbutton. Кнопка btn1SDU2: Tbutton призначена для початку обчислень. Кнопка btn2SDU2: Tbutton призначена для очищення всіх вікон від даних. Кнопка btn3SDU2: Tbutton призначена для виходу з програми. Кнопка Button1: Tbutton призначена для побудови графіків обчислюваних величин.

Для введення початкових значень аргументу і функцій реалізується цикл

```
for i:=1 to N do
```

```
begin
```

```
ii:= format('%2.0d',[i]);
```

```
mem1SDU2.Lines.Add ('Початкове значення y0'+ii+'-й
```

```
функції y');
```

```
Y0[i]:=InputBox ('Введення початкових значень функції
```

```
Y0(i)', 'Значення функціїY0('+ii+')=';");
```

```
Val(Y0[i],w[i],code);
```

```
y[i]:=w[i];
```

```
xx[i]:=format('% 12.5f',[w[i]]);
```

```
mem1SDU2.Lines.Add('Y0('+ii+')='+xx[i]);
```

```
end.
```

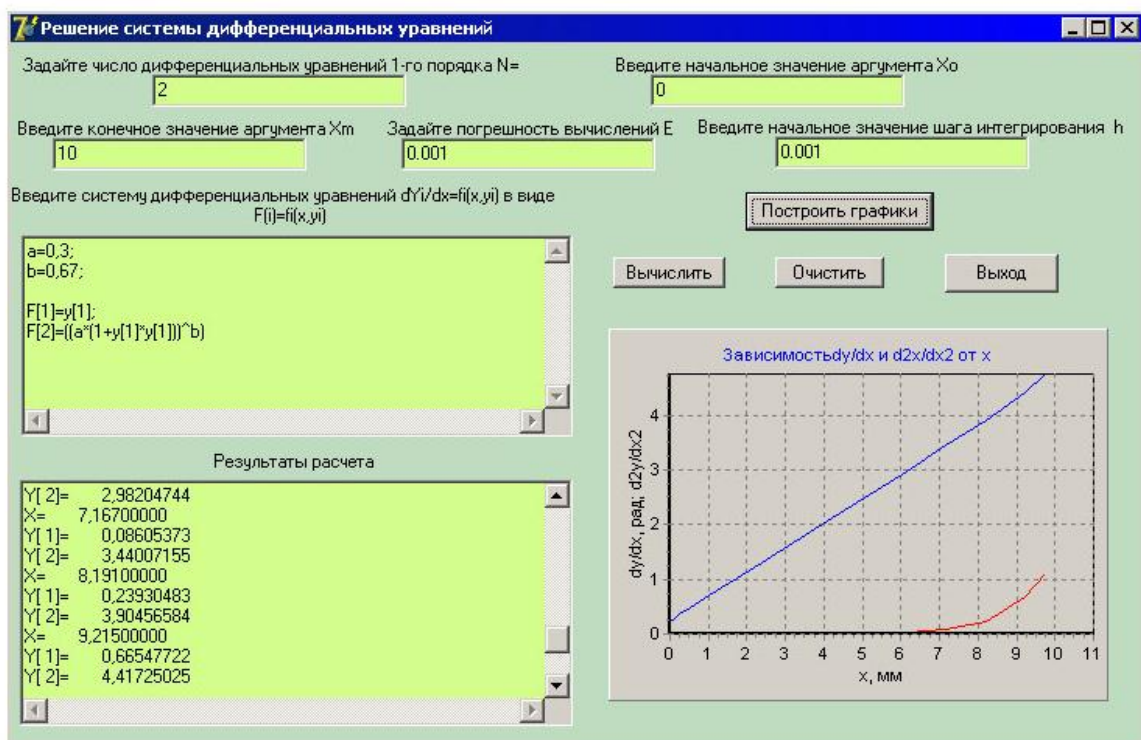


Рис.5.2.6. Висновок результатів інтегрування системи диференціальних рівнянь

Для проведення обчислень використовувалися дані: для віскозної комплексної нитки 16,7 Текс (коефіцієнти тертя дорівнювали  $k_1 = 0,16$ ,  $k_2 = 0,21$ ); для капронової комплексної нитки 31,2 Текс (коефіцієнти тертя дорівнювали 0,18, 0,24); для бавовняної пряжі (гребінного прядіння, кручена) 23,6 Текс (коефіцієнти тертя дорівнювали  $k_1 = 0,17$ ,  $k_2 = 0,22$ ); для вовняної пряжі (гребінного прядіння, кручена) 36 Текс (коефіцієнти тертя дорівнювали  $k_1 = 0,14$ ,  $k_2 = 0,18$ ).

При виборі сировини керувалися тим, що ці нитки і пряжа широко використовуються при виготовленні полотен і окремих виробів на трикотажних машинах і в ткацтві. Крім того, ці чотири групи мають різні фрикційні характеристики.

У таблицях 5.2.1-5.2.4 представлені результати визначення першої та другої похідної  $y_1 = \frac{dy}{dx}$ ,  $y_2 = \frac{dy_1}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2}$  від абсциси  $x$  в результаті чисельного інтегрування диференціального рівняння (5.1.15) другого порядку.

Таблиця 5.2.1

**Визначення першої та другої похідної  $y_1 = \frac{dy}{dx}$ ,  $y_2 = \frac{dy_1}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2}$  від абсциси  $x$  для віскозної комплексної нитки**

Віскозна комплексна нитка 16,7 Текс					
Ізотропна			Анізотропна		
$x$	$y_1$	$y_2$	$x$	$y_1$	$y_2$
0	0	0,21	0	0	0,21
0,001	0,00004004	0,2104	0,001	0,0000600	0,2103
0,003	0,0000401	0,211	0,003	0,0000601	0,211
0,007	0,0000402	0,213	0,007	0,0000604	0,212
0,01	0,000040	0,21	0,01	0,000060	0,21

Механіка нитки

0,03	0,000041	0,22	0,03	0,000061	0,22
0,06	0,000042	0,23	0,06	0,000063	0,23
0,12	0,00004	0,26	0,12	0,00006	0,25
0,25	0,00005	0,32	0,25	0,00007	0,30
0,51	0,00006	0,44	0,51	0,00010	0,40
1,02	0,0001	0,67	1,02	0,00016	0,59
2,04	0,0003	1,14	2,04	0,0004	0,98
4,09	0,002	2,08	4,09	0,003	1,76
6,14	0,017	3,02	6,14	0,026	2,54
8,19	0,133	3,96	7,16	0,073	2,93
9,21	0,371	4,44	8,19	0,205	3,32
10,23	1,033	5,01	10,23	1,588	4,35

Таблиця 5.2.2

**Визначення першої та другої похідної  $y_1 = \frac{dy}{dx}$ ,  $y_2 = \frac{dy_1}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2}$  від абсциси  $x$  для капронової комплексної нитки**

Капронова комплексна нитка 31,2 Текс					
Ізотропна			Анізотропна		
$x$	$y_1$	$y_2$	$x$	$y_1$	$y_2$
0	0	0,24	0	0	0,24
0,001	0,00006006	0,2404	0,001	0,00008008	0,240
0,003	0,000060	0,241	0,003	0,0000802	0,241
0,007	0,000060	0,243	0,007	0,0000805	0,242
0,01	0,000060	0,24	0,015	0,000081	0,24
0,03	0,000061	0,25	0,03	0,000082	0,25
0,06	0,000063	0,27	0,06	0,000085	0,26

Механіка нитки

0,12	0,000068	0,30	0,12	0,000090	0,29
0,25	0,000077	0,36	0,25	0,000103	0,34
0,51	0,000100	0,49	0,51	0,0001	0,44
1,02	0,0001	0,74	1,02	0,0002	0,65
2,04	0,0004	1,24	2,04	0,0006	1,07
4,09	0,0035	2,24	4,09	0,004	1,90
6,14	0,0265	3,24	6,14	0,035	2,74
7,16	0,0737	3,75	7,16	0,098	3,15
8,19	0,205	4,25	8,19	0,273	3,58
9,21	0,570	4,79	9,21	0,760	4,06
10,23	1,586	5,50	10,23	2,117	4,86

Таблиця 5.2.3

**Визначення першої та другої похідної  $y_1 = \frac{dy}{dx}$ ,  $y_2 = \frac{dy_1}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2}$  від абсциси  $x$  для бавовняної крученої пряжі**

Бавовняна кручена пряжа (гребінного прядіння) 23,6 Текс					
Ізотропна			Анізотропна		
$x$	$y_1$	$y_2$	$x$	$y_1$	$y_2$
0	0	0,22	0	0	0,22
0,001	0,00005	0,220	0,001	0,00007007	0,2204
0,003	0,0000501	0,221	0,003	0,0000702	0,221
0,007	0,0000503	0,223	0,007	0,0000704	0,22
0,01	0,0000507	0,22	0,015	0,000071	0,22
0,03	0,000051	0,23	0,031	0,000072	0,23
0,06	0,000053	0,24	0,063	0,000074	0,24

Механіка нитки

0,12	0,00005	0,27	0,127	0,00007	0,27
0,25	0,00006	0,33	0,255	0,00009	0,32
0,511	0,00008	0,45	0,511	0,0001	0,42
1,02	0,0001	0,69	1,023	0,0002	0,63
2,04	0,0003	1,18	2,047	0,0005	1,04
4,09	0,002	2,14	4,095	0,004	1,87
6,14	0,022	3,10	6,143	0,030	2,69
7,16	0,061	3,58	7,167	0,086	3,11
8,19	0,170	4,06	8,191	0,239	3,52
9,21	0,475	4,56	9,215	0,665	3,98
10,23	1,321	5,19	10,239	1,852	4,68

Таблиця 5.2.4

**Визначення першої та другої похідної  $y_1 = \frac{dy}{dx}$ ,  $y_2 = \frac{dy_1}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2}$  від абсциси  $x$  для вовняний крученої пряжі**

Вовняна кручена пряжа (гребінного прядіння) 36 Текс					
Ізотропна			Анізотропна		
$x$	$y_1$	$y_2$	$x$	$y_1$	$y_2$



0	0	0,18	0	0	0,18
0,001	0,00002002	0,1804	0,001	0,0000400	0,1803
0,003	0,0000200	0,181	0,003	0,0000401	0,181
0,007	0,0000201	0,182	0,007	0,0000402	0,182
0,01	0,0000203	0,186	0,015	0,0000406	0,185
0,03	0,0000206	0,19	0,03	0,000041	0,19
0,06	0,0000213	0,20	0,06	0,000042	0,20
0,12	0,0000227	0,23	0,12	0,00004	0,22
0,25	0,00002	0,28	0,25	0,00005	0,26
0,511	0,00003	0,39	0,51	0,00006	0,35
1,02	0,00005	0,61	1,02	0,00011	0,53
2,04	0,00015	1,04	2,04	0,00039	0,89
4,09	0,0011	1,91	4,09	0,002	1,61
6,14	0,008	2,78	6,14	0,017	2,33
8,19	0,066	3,65	8,19	0,133	3,05
9,21	0,185	4,09	9,21	0,371	3,43
10,23	0,516	4,55	10,23	1,033	3,88

За формулою (5.1.13) визначаємо значення натягу нитки з урахуванням значень першої похідної  $\frac{dy}{dx}$ , яку беремо з таблиць 5.2.1-5.2.4. На рис.5.2.7 представлені результати розрахунку.

Аналіз отриманих графічних залежностей показав, що для всіх ниток найбільший натяг матимуть нитки з анізотропними фрикційними властивостями. Реальний натяг, в середньому, у анізотропних ниток в порівнянні з ізотропним буде більше на 20-30%.

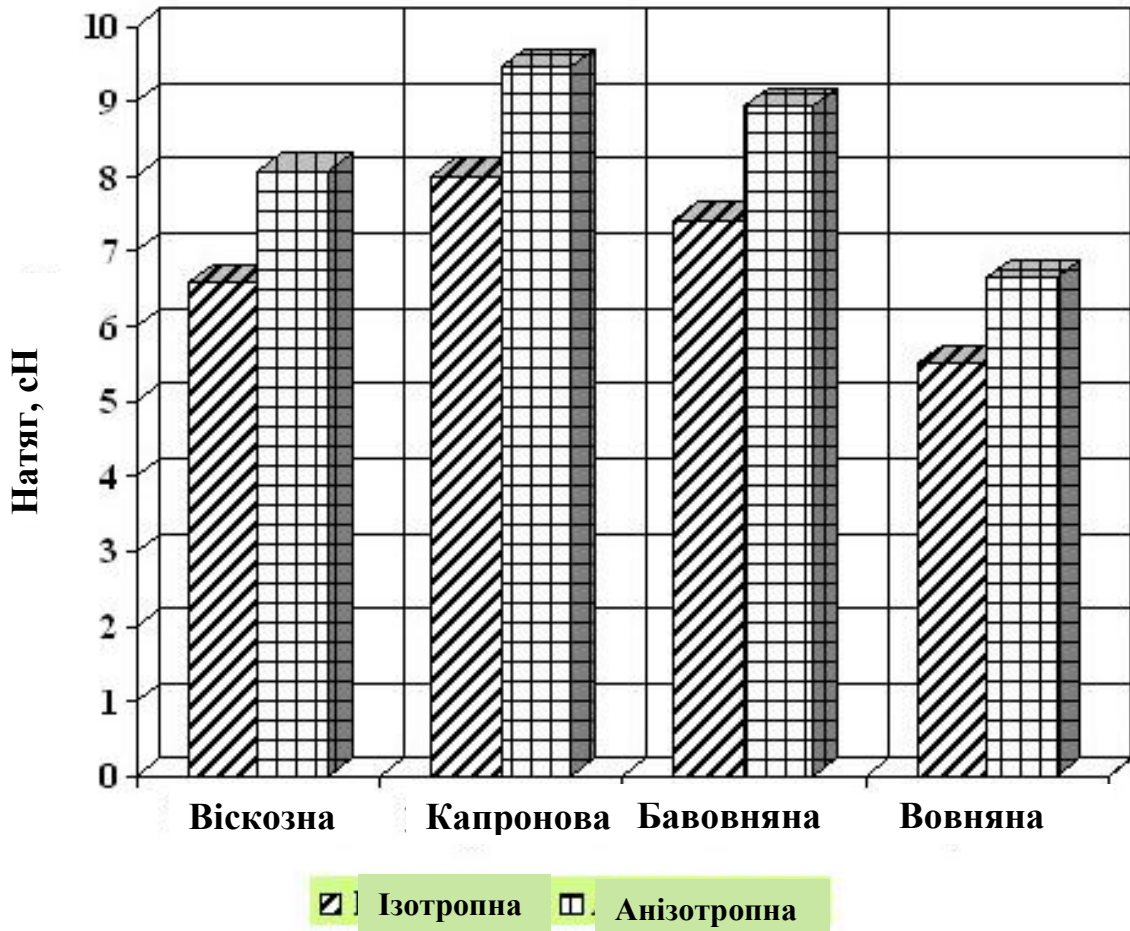


Рис.5.2.5. Визначення натягу ниток з урахуванням анізотропії фрикційних властивостей

**Апроксимаційні залежності для визначення форми осі нитки при поперечному ковзанні по площині**

Апроксимація розрахункових (експериментальних) даних передбачає перебування коефіцієнтів полінома

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m, \quad (5.2.2.1)$$

де  $y(x)$  - значення апроксимуючої функції;

$a_0, a_1 \dots a_m$  - значення постійних коефіцієнтів шуканого полінома.

На рис.5.2.2.1 представлена блок-схема алгоритму апроксимації та інтерполяції за методом найменших квадратів з можливістю автоматичного вибору ступеня полінома.

Поліноміальна регресія з автоматичним вибором ступеня полінома виконується за наступним алгоритмом. Спочатку задається число пар  $N$  і задається середньоквадратична похибка  $E_1$ . Після цього задається ступінь полінома  $m = 1$  (на початковому етапі приймаємо лінійну регресію).

На наступному етапі вводимо значення  $x_i, y_i$  для кожної пари. Після цього визначаємо корені системи лінійних рівнянь методом Гауса з вибором головного елемента

$$\begin{aligned} c_0 a_0 + c_1 a_1 + c_2 a_2 + \dots + c_m a_m &= d_0, \\ c_1 a_0 + c_2 a_1 + c_3 a_2 + \dots + c_{m+1} a_m &= d_1, \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ c_m a_0 + c_{m+1} a_1 + c_{m+2} a_2 + \dots + c_{2m} a_m &= d_m, \end{aligned} \quad (5.2.2.2)$$

$$c_j = \sum_{i=1}^N x_i^j, \quad j = 0, 1, 2, \dots, 2m,$$

$$d_k = \sum_{i=1}^N x_i^k y_i, \quad k = 0, 1, 2, \dots, m.$$

На наступному етапі визначаємо мінімальну середньоквадратичну похибку за формулою

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{\varepsilon_i^2}{(N+1)}}. \quad (5.2.2.3)$$

Отримане значення (5.2.2.3) порівнюємо із заданою середньоквадратичною похибкою  $E_1$ . У разі якщо  $E > E_1$  ступінь полінома збільшуємо на 1 і повторюємо обчислення коренів системи лінійних рівнянь методом Гаусса. В разі  $E < E_1$  обчислення закінчуються і результати видаються на друк.

Якщо  $m = N$ , то має місце звичайна інтерполяція. У цьому випадку значення  $y(x)$  при  $x = x_i$  точно збігаються із заданими  $y_i$ . При  $m < N$  такого збігу немає.

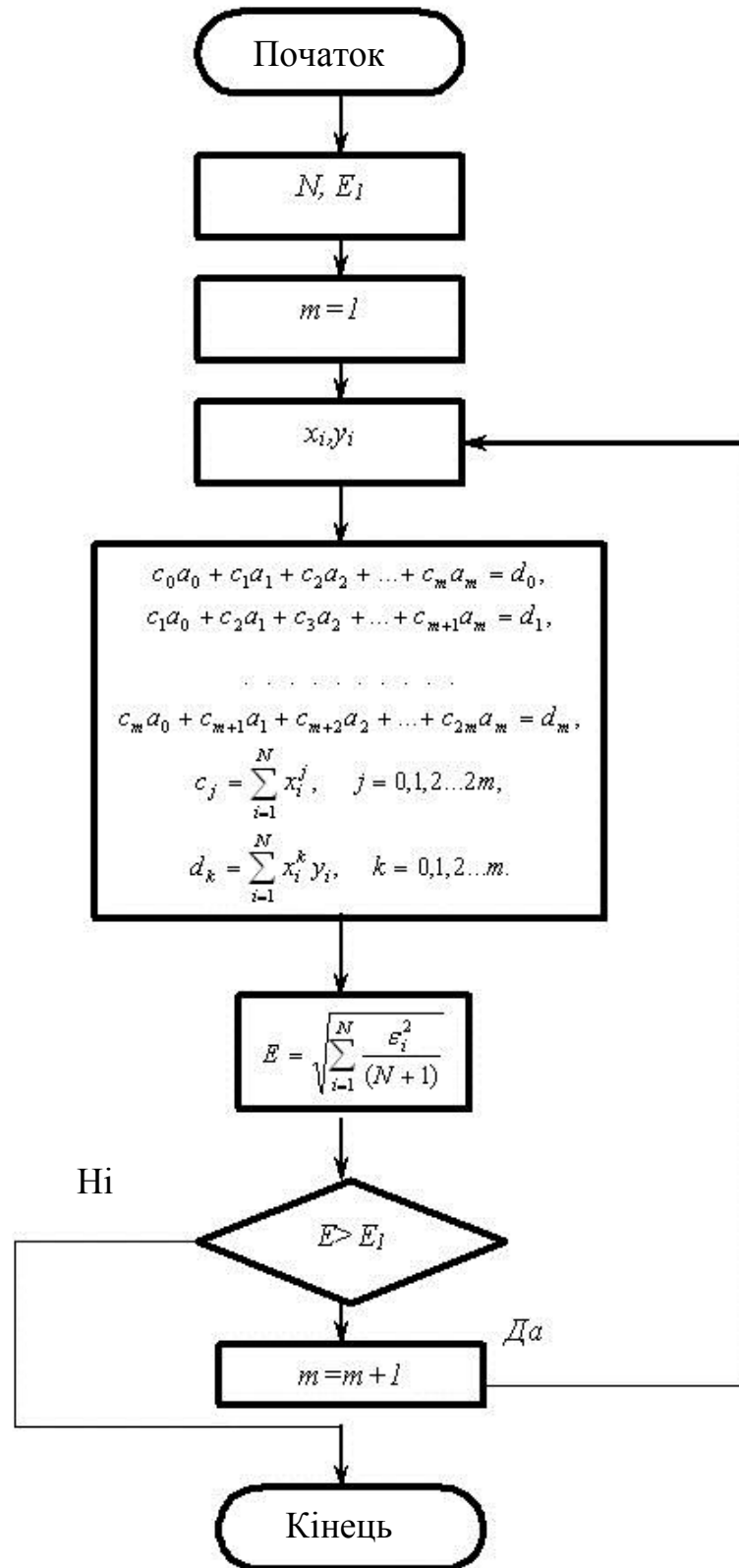


Рис.5.2.2.1. Блок-схема алгоритму апроксимації та інтерполяції

Для реалізації даного алгоритму була написана програма на мові Object Pascal в середовищі Delphi. Програма наведена в додатку Б. На рис.5.2.2.2 представлена перша форма TfrmAPIN1 = class (TForm).



Рис.5.2.2.2. Перша форма TfrmAPIN1 = class (TForm) програми

На цій формі розташовано вісім міток: lbl1APIN1: TLabel; lbl2APIN1: TLabel; lbl3APIN1: TLabel; lbl4APIN1: TLabel; lbl5APIN1: TLabel; lbl6APIN1: TLabel; lbl7APIN1: TLabel; Label1: TLabel Компонент img1APIN1: Timage призначений для розміщення малюнка. Кнопка btn1APIN1: Tbutton призначена для переходу на другу основну форму.

На рис.5.2.2.3 представлена друга основна форма TfrmAPIN2 = class (Tform). На цій формі розташовано п'ять міток: lbl1APIN2: TLabel; lbl2APIN2: TLabel; lbl3APIN2: TLabel; lbl4APIN2: TLabel; lbl5APIN2: TLabel. Для введення даних використовуються три однорядкових вікна редагування: edt1APIN2: TEdit; edt2APIN2: TEdit; edt3APIN2: Tedit.

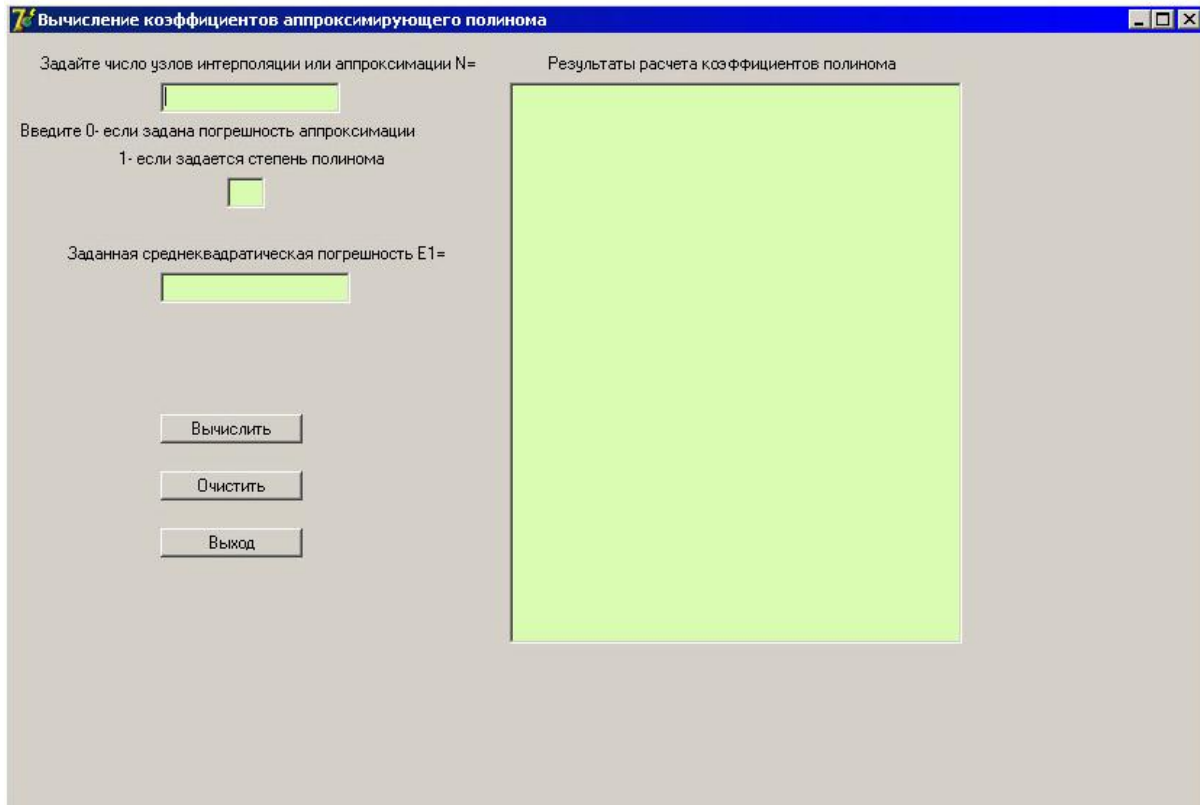


Рис.5.2.2.3. Друга, основна форма  $TfrmAPIN2 = class(Tform)$  програми

Вікно  $edt1APIN2$ : Tedit призначене для введення числа вузлів апроксимації або інтерполяції. Вікно  $edt2APIN2$ : Tedit призначене для введення значень 0 або 1, коли задається похибка апроксимації або ступінь апроксимаційного полінома.

Третє вікно  $edt3APIN2$ : Tedit призначене для введення середньоквадратичної похибки. Багаторядкове вікно редагування  $mem1APIN2$ : Tmemo призначене для виведення результатів розрахунку.

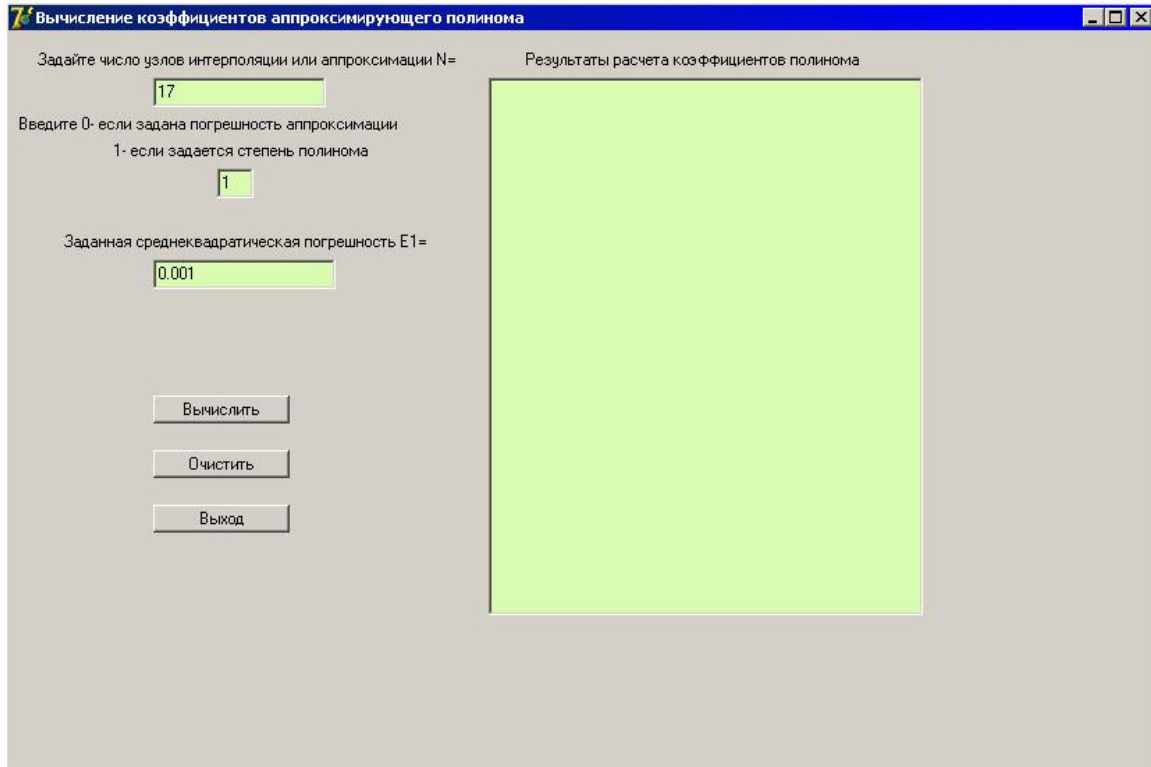


Рис .5.2.2.4. Форма TfrmAPIN 2 = class (Tform) з введеними даними

На формі розташовані три кнопки btn1APIN2: TButton; btn2APIN2: TButton; btn3APIN2: Tbutton. Перша кнопка btn1APIN2: Tbutton призначена для запуску процесу обчислення. Друга кнопка btn2APIN2: Tbutton призначена для очищення всіх вікон. Третя кнопка btn3APIN2: Tbutton призначена для виходу з програми.

Опис всіх типів даних, що застосовуються в програмі, має вигляд

```

var
    frmAPIN2: TfrmAPIN2;
    i,H,VV,N,j,k,N1,k1,j1,M,L,M2,code:Integer;
    E1,R,F,U,S,E,p,Q1:Real;
    X:array[1..50]of Real;
    Y:array[1..50]of Real;
    Z:array[1..50]of Real;
    B:array[1..50]of Real;
    G:array[1..50]of Real;
    A:array[1..50,1..50]of Real;
    C:array[1..50,1..50]of Real;
    D:array[1..100]of Real;
    vv7,EE1,EE2,NN1,EEE,ikpl,kpl:String;
    aa:array[1..50]of String;
    
```

aa1:array[1..50]of String

На рис.5.2.2.5 представлена основна форма для введення пар даних  $x_i, y_i$  Застосований для цього код має вигляд

```

begin
    vv7:=format('%3.0d',[i]);
    aa[i]:=InputBox('Введення даних,' X['+vv7+']='');
    Val(aa[i],X[i],code);
    mem1APIN2.Lines.Add('X('+vv7+)'='+aa[i]);
    aa1[i]:=InputBox('Введення значень,' Y['+vv7+']='');
    Val(aa1[i],Y[i],code);
    mem1APIN2.Lines.Add('Y('+vv7+)'='+aa1[i]);
end;

```

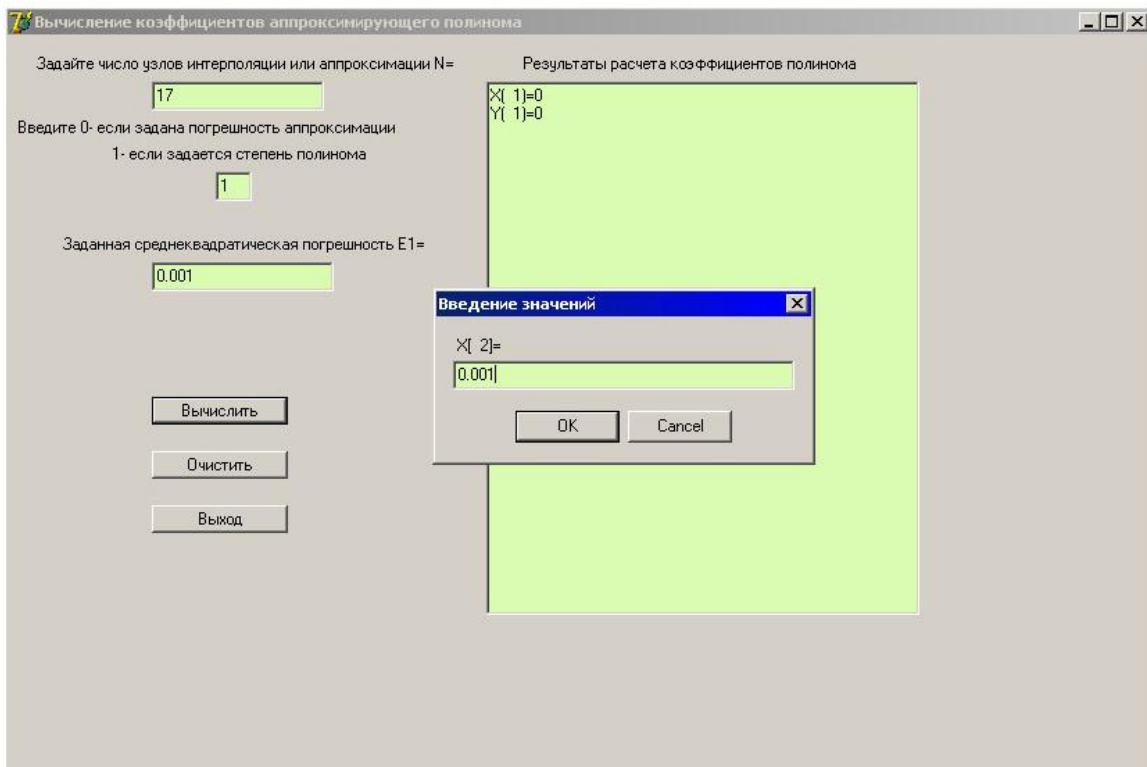


Рис.5.2.2.5. Введення пар даних



На рис.5.2.2.6 показана основна форма з результатами розрахунків коефіцієнтів в рівнянні регресії.

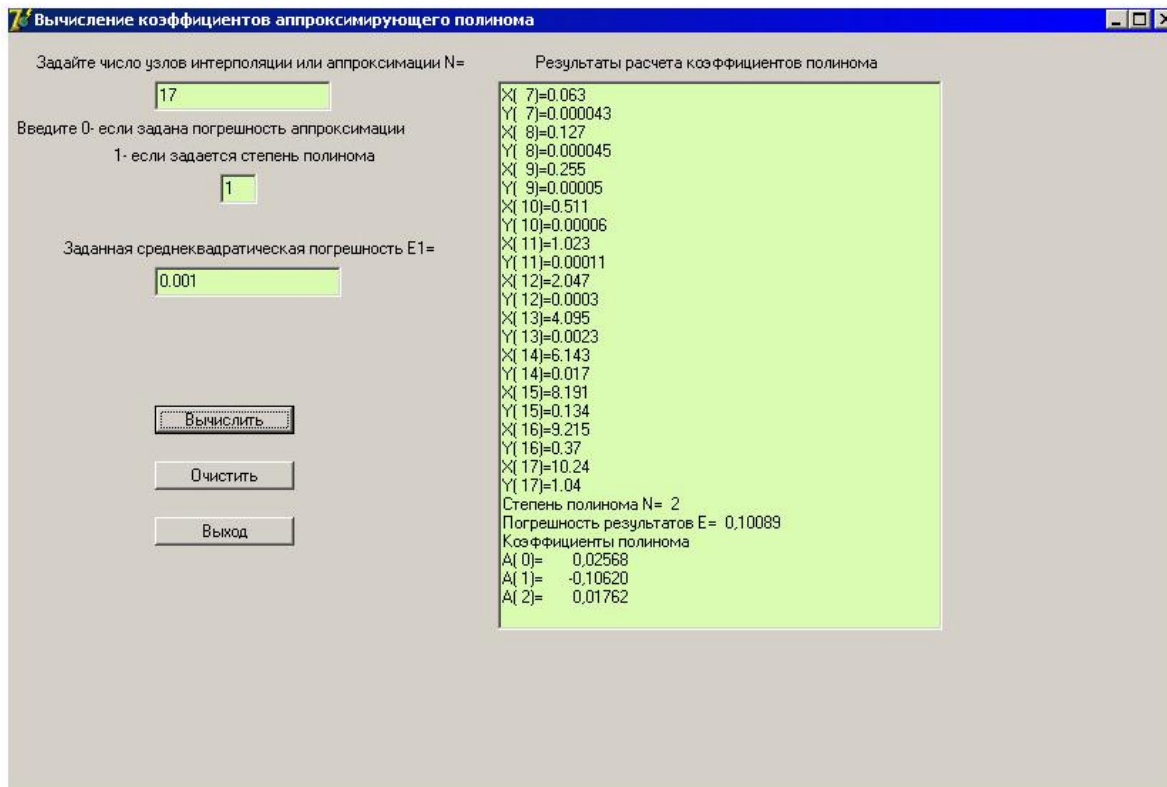


Рис.5.2.2.6. Результати розрахунку коефіцієнтів в рівняннях регресії

Використовуючи розроблене програмне забезпечення і дані таблиць 5.2.1-5.2.4 були отримані регресійні залежності (5.2.2.4)-(5.2.2.11) зміни  $Y'$  та  $Y''$  в залежності від зміни абсциси  $x$ .

Для проведення обчислень використовувалися дані: для віскозної комплексної нитки 16,7 Текс (коефіцієнти тертя дорівнювали  $k_1 = 0,16$ ,  $k_2 = 0,21$ ); для капронової комплексної нитки 31,2 Текс (коефіцієнти тертя дорівнювали  $k_1 = 0,18$ ,  $k_2 = 0,24$ ); для бавовняної пряжі (гребінного прядіння, кручена) 23,6 Текс (коефіцієнти тертя дорівнювали  $k_1 = 0,17$ ,  $k_2 = 0,22$ ); для вовняної пряжі (гребінного прядіння, кручена) 36 Текс (коефіцієнти тертя дорівнювали  $k_1 = 0,14$ ,  $k_2 = 0,18$ ).

При проведенні обчислень для значень першої похідної використовувався поліном другого ступеня, а для значень другої похідної -

лінійна залежність. Такий вибір обумовлювався характером зміни поведінки даних функцій на виділеному інтервалі.

Для віскозних комплексних нитки 16,7 Текс були отримані наступні регресійні залежності:

для ізотропних фрикційних властивостей

$$\begin{aligned}y' &= 0,018x^2 - 0,11x + 0,03, \\y'' &= 0,46x + 0,21.\end{aligned}\tag{5.2.2.4}$$

для анізотропних фрикційних властивостей

$$\begin{aligned}y' &= 0,03x^2 - 0,18x + 0,04, \\y'' &= 0,39x + 0,2.\end{aligned}\tag{5.2.2.5}$$

Для капронової комплексної нитки 31,2 Текс були отримані наступні регресійні залежності:

для ізотропних фрикційні властивостей

$$\begin{aligned}y' &= 0,03x^2 - 0,18x + 0,04, \\y'' &= 0,49x + 0,23.\end{aligned}\tag{5.2.2.6}$$

для анізотропних фрикційних властивостей

$$\begin{aligned}y' &= 0,038x^2 - 0,24x + 0,06, \\y'' &= 0,43x + 0,22.\end{aligned}\tag{5.2.2.7}$$

Для бавовняної пряжі 23,6 Текс були отримані наступні регресійні залежності:

для ізотропних фрикційних властивостей

$$\begin{aligned}y' &= 0,024x^2 - 0,15x + 0,04, \\y'' &= 0,48x + 0,21.\end{aligned}\tag{5.2.2.8}$$

для анізотропних фрикційних властивостей

$$\begin{aligned}y' &= 0,033x^2 - 0,21x + 0,05, \\y'' &= 0,42x + 0,21.\end{aligned}\tag{5.2.2.9}$$

Для вовняної пряжі 36 Текс були отримані наступні регресійні залежності:

для ізотропних фрикційні властивостей

$$\begin{aligned} y' &= 0,009x^2 - 0,05x + 0,01, \\ y'' &= 0,43x + 0,18. \end{aligned} \quad (5.2.2.10)$$

для анізотропних фрикційних властивостей

$$\begin{aligned} y' &= 0,018x^2 - 0,1x + 0,03, \\ y'' &= 0,36x + 0,18. \end{aligned} \quad (5.2.2.11)$$

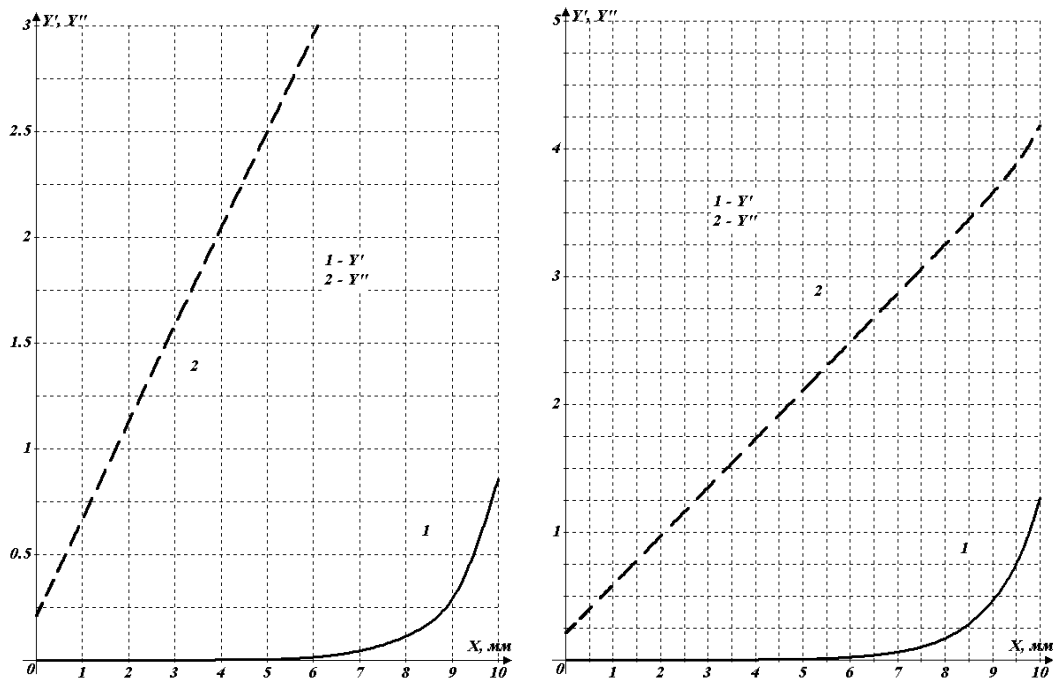


Рис.5.2.2.5.Залежність зміни  $Y', Y''$  для віскозної комплексної нитки

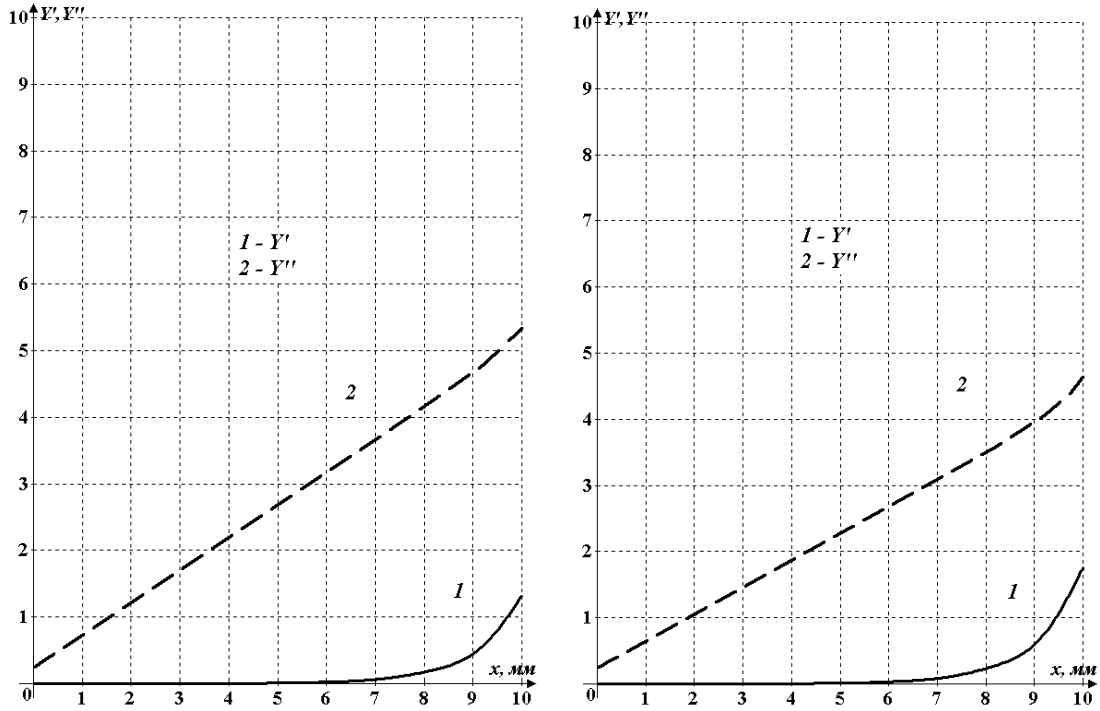


Рис.5.2.2.8. Залежність зміни  $Y', Y''$  для капронової комплексної нитки

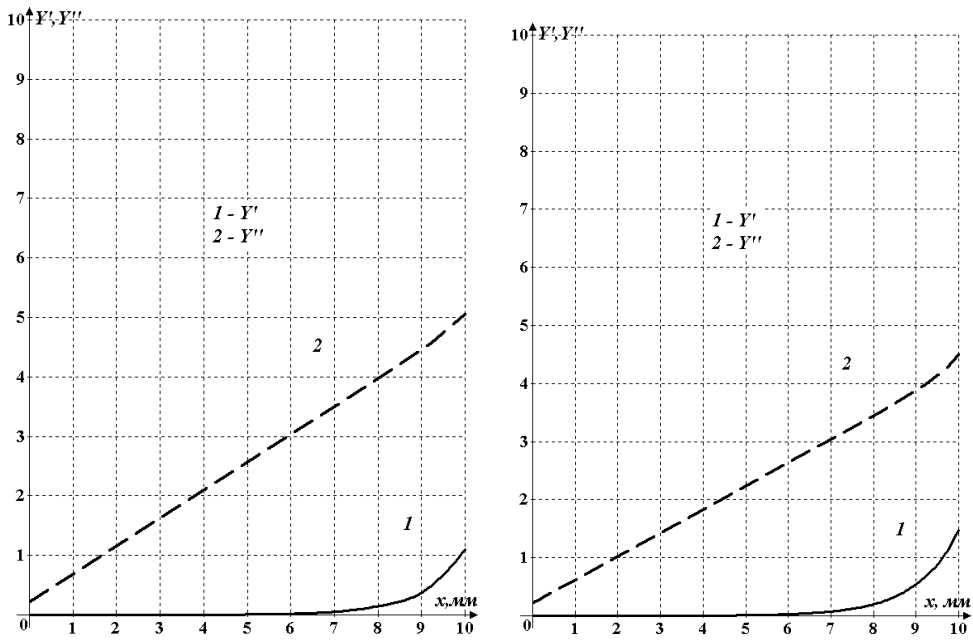


Рис.5.2.2.9. Залежність зміни  $Y', Y''$  для бавовняної комплексної нитки

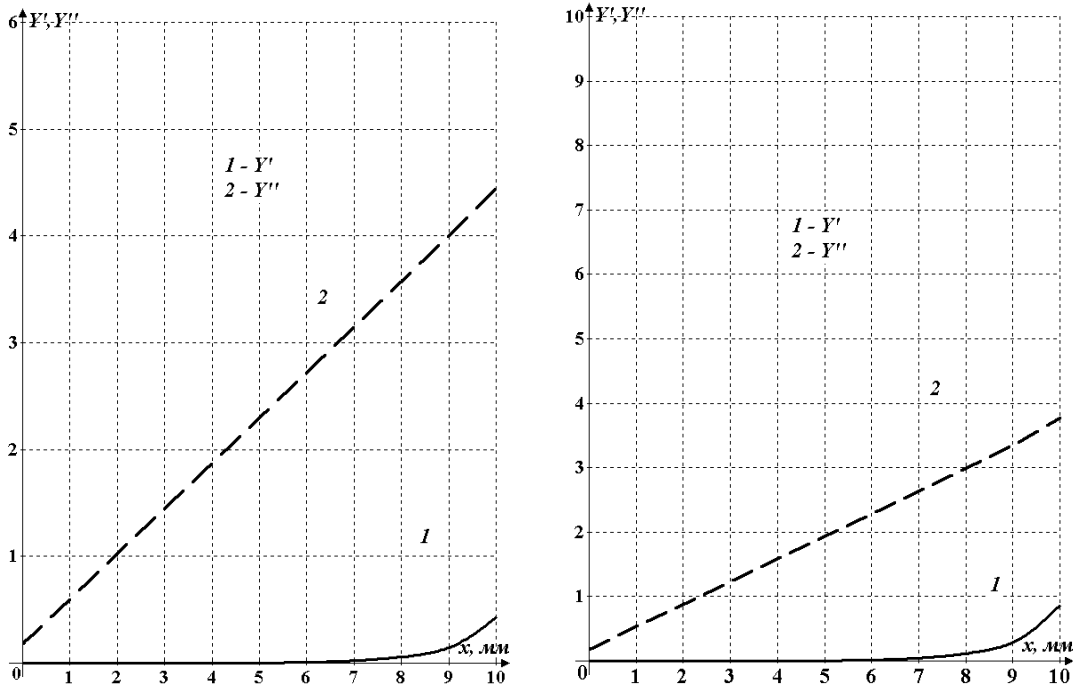


Рис.5.2.2.10.Залежність зміни  $Y', Y''$  для вовняної пряжі

На рис.5.2.2.7-5.2.2.10 представлені графічні залежності зміни значень  $Y', Y''$ . Їх аналіз показує, що нитки мають великий діаметр поперечного перерізу (більший Текс) мають більш полого форму. Цю обставину необхідно враховувати при проектуванні технологічних процесів легкої і текстильної промисловості.

**Дослідження поперечного ковзання жорсткої на вигин нитки по площині**

Цей вид взаємодії має місце, коли розрахунковий радіус поперечного перерізу нитки сумарний з відстанню між направляючими кривими А і В (див .рис.2.1.1). У цьому випадку необхідно враховувати згинальну жорсткість нитки. При виведенні залежностей будемо вважати, що згинальний момент пропорційний кривизні осі нитки, а швидкість зміни величини перерізаючої сили по дуговій координаті дуже мала, що пояснюється незначною величиною відхилення осі нитки від лінії з'єднує

точки А і В. Крім того, будемо вважати, що маса нитки рівномірно розподілена по її довжині.

Для проведення розрахунків будемо використовувати наступні нитки: віскозна комплексна нитка 16,7 Текс (коефіцієнти тертя дорівнювали  $k_1 = 0,16$ ,  $k_2 = 0,21$ ); капронова комплексна нитка 31,2 Текс (коефіцієнти тертя дорівнювали  $k_1 = 0,18$ ,  $k_2 = 0,24$ ); бавовняна пряжа (гребінного прядіння, кручена) 23,6 Текс (коефіцієнти тертя дорівнювали  $k_1 = 0,17$ ,  $k_2 = 0,22$ ); вовняна пряжа (гребінного прядіння, кручена) 36 Текс (коефіцієнти тертя дорівнювали  $k_1 = 0,14$ ,  $k_2 = 0,18$ ).

Величина кута нахилу дотичної визначалася за формулою (2.2.15)

$$\cos \varphi = \frac{q^{k_2}}{q_0^{k_2}} e^{\frac{B}{3\mu_0 g} (q_0^3 - q^3)}, \quad (5.2.3.1)$$

де  $\varphi$  - кут нахилу дотичної до осі абсцис;

$q$  - кривизна осі нитки, 1/м;

$q_0$  - кривизна осі нитки в точці 0, 1/м;

$B$  - коефіцієнт згинальної жорсткості, Нм<sup>2</sup>;

$\mu_0$  - лінійна щільність нитки, кг/м;

$g$  - прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

Натяг нитки визначається за формулою (2.2.11)

$$P = \frac{k_2 \mu_0 g \cos \varphi}{q}. \quad (5.2.3.2)$$

де  $P$  - натяг нитки.

З урахуванням (5.2.3.1), формула (5.2.3.2) прийме вигляд

$$P = \frac{k_2 \mu_0 g}{q} \frac{(k_1 + k_2) \frac{q^{k_2}}{q_0^{k_2}} e^{\frac{B}{3\mu_0 g} (q_0^3 - q^3)}}{q^{k_2}}. \quad (5.2.3.3)$$

Для виконання розрахунків прийняті наступні дані, наведені в таблиці 3.5.2.

Таблиця 5.2.3.1

**Фізико-механічні показники ниток**

Показники	Віскозна комплексна нитка, 16,7Т	Капронова комплексна нитка, 31,2Т	Бавовняна кручена пряжа, 23,6Т	Вовняна кручена пряжа, 36т
Жорсткість нитки на вигин, Н м <sup>2</sup>	0,2·10 <sup>-8</sup>	0,22·10 <sup>-8</sup>	0,7·10 <sup>-8</sup>	0,25·10 <sup>-8</sup>
$\mu_0 g$ , Н/м	1,64·10 <sup>-3</sup>	3,06·10 <sup>-3</sup>	2,32·10 <sup>-3</sup>	3,53·10 <sup>-3</sup>
$k_1$	0,16	0,18	0,17	0,14
$k_2$	0,21	0,24	0,22	0,18

Результати розрахунку за формулами (5.2.3.1) і (5.2.3.3) представлені в таблицях 5.2.3.2 і 5.2.3.3.

Таблиця 5.2.3.2

Значення кута нахилу  $\varphi$  дотичної до осі абсцис і натягу нитки  $P$

Віскозна комплексна нитка, 16,7Т			Капронова комплексна нитка, 31,2Т		
$q$	$\varphi$	$P$	$q$	$\varphi$	$P$
1	0	25	1	0	25
0.97	0.158	25	0.97	0.373	25
0.94	0.411	25	0.94	0.866	25.001
0.91	0.723	25	0.91	1.426	25.002
0.88	1.088	25.001	0.88	2.041	25.003
0.85	1.5	25.001	0.85	2.707	25.004
0.82	1.958	25.001	0.82	3.422	25.005
0.79	2.461	25.002	0.79	4.185	25.007
0.76	3.012	25.002	0.76	4.997	25.008
0.73	3.61	25.003	0.73	5.86	25.01
0.7	4.259	25.004	0.7	6.774	25.012
0.67	4.96	25.004	0.67	5.743	25.015
0.64	5.716	25.005	0.64	8.77	25.018
0.61	6.533	25.006	0.61	9.859	25.021
0.58	5.414	25.008	0.58	11.014	25.024

Механіка нитки

0.55	8.364	25.009	0.55	12.242	25.029
0.52	9.391	25.011	0.52	13.548	25.033
0.49	10.503	25.013	0.49	14.94	25.039
0.46	11.709	25.015	0.46	16.428	25.046
0.43	13.019	25.018	0.43	18.023	25.054
0.4	14.449	25.022	0.4	19.738	25.063
0.37	16.015	25.026	0.37	21.59	25.075
0.34	15.738	25.031	0.34	23.6	25.089
0.31	19.646	25.038	0.31	25.794	25.107
0.28	21.774	25.047	0.28	28.205	25.129
0.25	24.17	25.058	0.25	30.879	25.158
0.22	26.897	25.073	0.22	33.876	25.197
0.19	30.049	25.095	0.19	35.282	25.252
0.16	33.763	25.127	0.16	41.226	25.33
0.13	38.26	25.177	0.13	45.91	25.453
0.1	43.929	25.264	0.1	51.687	25.663
0.07	51.562	25.443	0.07	59.263	26.085
0.04	63.234	25.95	0.04	70.456	25.258
10e-3	89.782	30.397	10e-3	94.395	35.099

Таблиця 5.2.3.3

Значення кута нахилу  $\varphi$  дотичної до осі абсцис і натягу нитки  $P$

Бавовняна кручена пряжа, 23,6 Т			Вовняна кручена пряжа, 36 Т		
$q$	$\varphi$	$P$	$q$	$\varphi$	$P$
1	0	25	1	0	25
0.97	0.227	25	0.97	0.049	25
0.94	0.561	25.001	0.94	0.149	25
0.91	0.96	25.001	0.91	0.288	25
0.88	1.414	25.001	0.88	0.461	25.001
0.85	1.917	25.002	0.85	0.669	25.001
0.82	2.469	25.003	0.82	0.911	25.001
0.79	3.067	25.003	0.79	1.187	25.002
0.76	3.714	25.004	0.76	1.5	25.002
0.73	4.41	25.005	0.73	1.851	25.003
0.7	5.157	25.007	0.7	2.242	25.004
0.67	5.958	25.008	0.67	2.676	25.004
0.64	6.816	25.009	0.64	3.156	25.005
0.61	5.734	25.011	0.61	3.686	25.007
0.58	8.719	25.013	0.58	4.269	25.008
0.55	9.774	25.016	0.55	4.913	25.01
0.52	10.907	25.019	0.52	5.622	25.012



0.49	12.125	25.022	0.49	6.404	25.014
0.46	13.437	25.026	0.46	5.269	25.018
0.43	14.856	25.031	0.43	8.226	25.021
0.4	16.394	25.037	0.4	9.29	25.026
0.37	18.069	25.044	0.37	10.477	25.031
0.34	19.902	25.052	0.34	11.807	25.039
0.31	21.919	25.063	0.31	13.307	25.048
0.28	24.155	25.077	0.28	15.012	25.059
0.25	26.656	25.095	0.25	16.968	25.075
0.22	29.485	25.119	0.22	19.241	25.097
0.19	32.732	25.153	0.19	21.922	25.128
0.16	36.53	25.203	0.16	25.153	25.174
0.13	41.094	25.282	0.13	29.163	25.249
0.1	46.796	25.417	0.1	34.359	25.381
0.07	54.392	25.692	0.07	41.588	25.659
0.04	65.851	26.467	0.04	53.129	26.473
10e-3	91.292	33.132	10e-3	81.434	34.031

За результатами, представленими у таблицях (5.2.3.2) - (5.2.3.3), побудовані графічні залежності (рис.5.2.3.1-5.2.3.4).

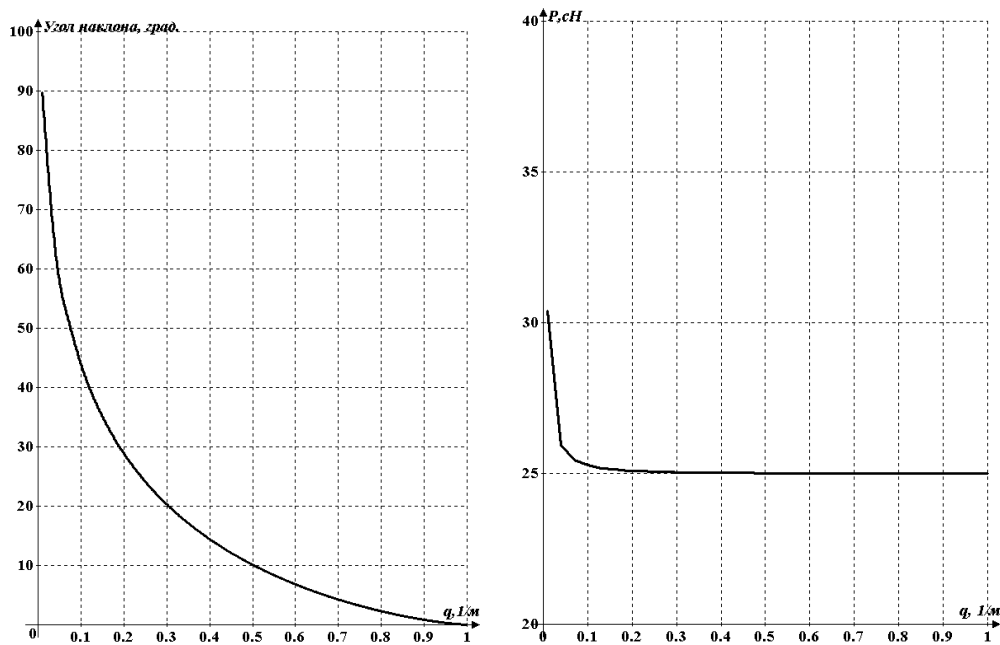


Рис.3.5.2.Значення кута нахилу  $\varphi$  дотичної до осі абсцис і натягу нитки  $P$  для віскозної комплексної нитки, 16,7Т

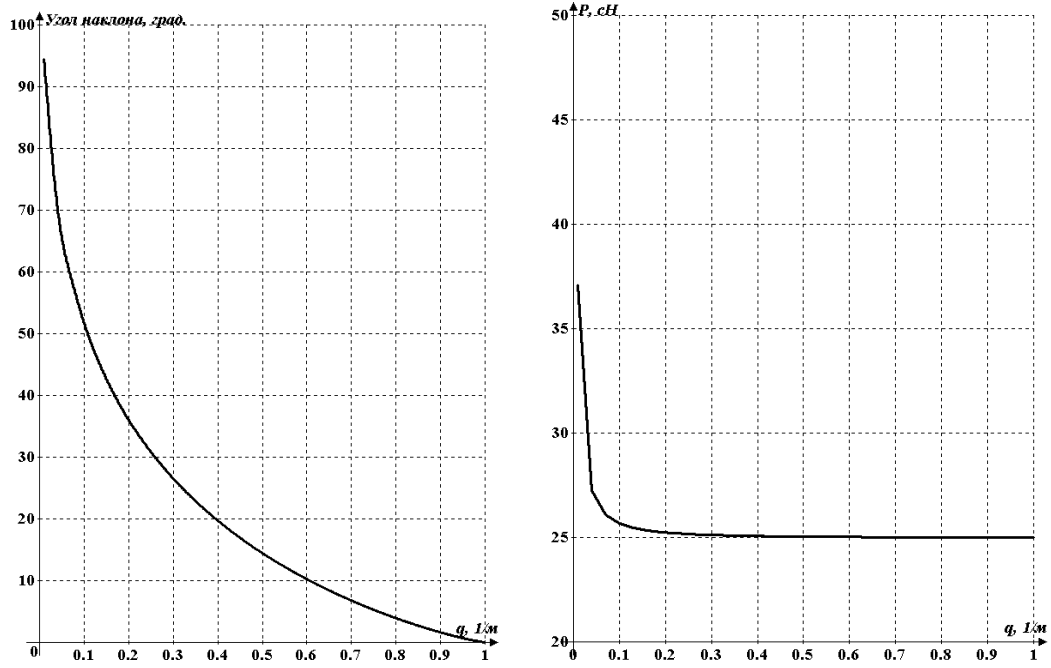


Рис.3.5.2.2. Значення кута нахилу  $\varphi$  дотичної до осі абсцис і натягу нитки  $P$  для капронової комплексної нитки, 31,2Т

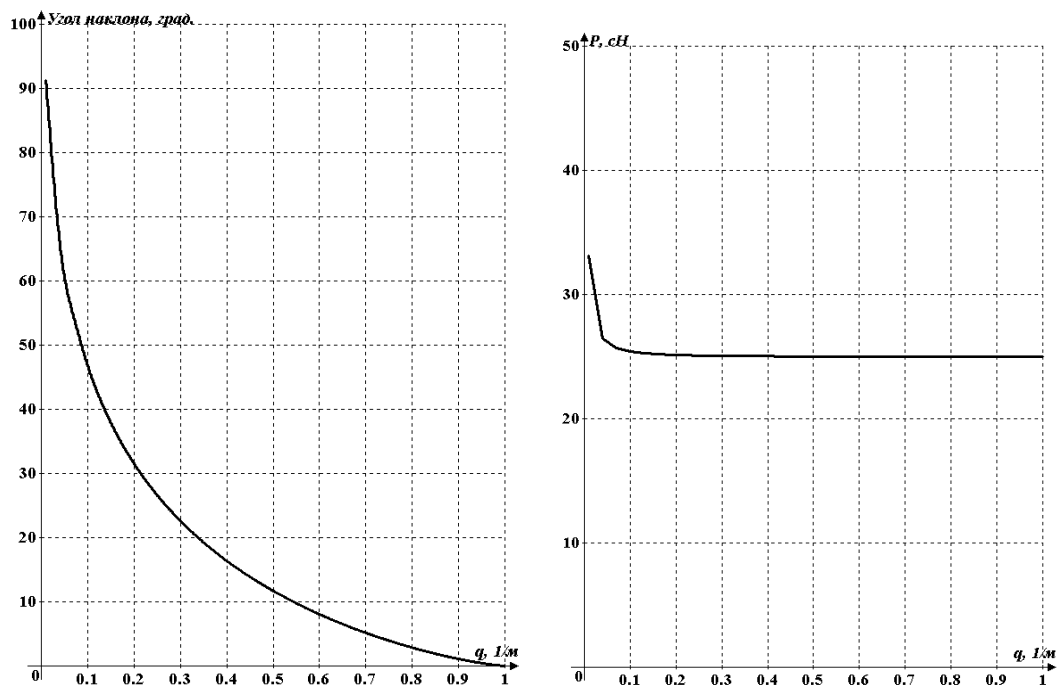


Рис.5.2.3.3. Значення кута нахилу  $\varphi$  дотичної до осі абсцис і натягу нитки  $P$  для бавовняної крученої пряжі, 23,6Т

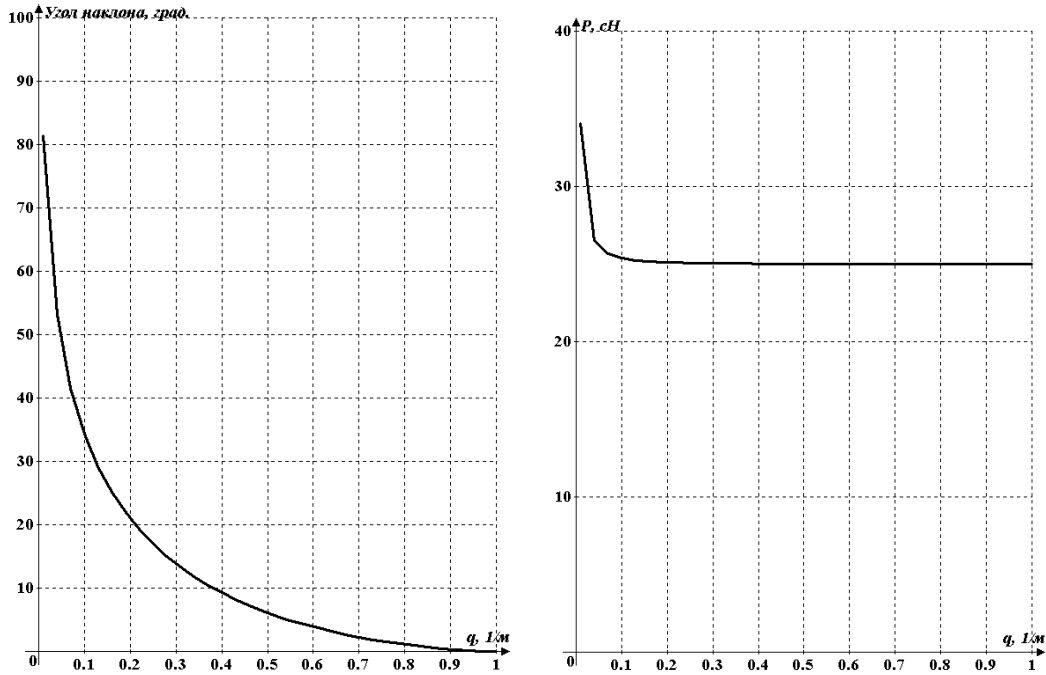


Рис.5.2.5.2.4. Значення кута нахилу  $\varphi$  дотичної до осі абсцис і натягу нитки  $P$  для шерстяної крученої пряжі, 36т

Аналіз отриманих графічних залежностей показує, що нитки більшого текса і більшої жорсткості на вигин мають більш пологі форму, що необхідно враховувати при проектуванні технологічних процесів.

### **Визначення форми осі і натягу нитки при поперечному ковзанні по направляючій малої кривизни з урахуванням анізотропії тертя**

Для визначення форми осі і натягу нитки при поперечному ковзанні по циліндричній направляючій з урахуванням анізотропії тертя. Для проведення розрахунків будемо використовувати наступні нитки: віскозна комплексна нитка 16,7 Текс (коефіцієнти тертя дорівнювали  $k_1 = 0,16$ ,  $k_2 = 0,21$ ); капронова комплексна нитка 31,2 Текс (коефіцієнти тертя дорівнювали  $k_1 = 0,18$ ,  $k_2 = 0,24$ ); бавовняна пряжа (гребінного прядіння, кручена) 23,6 Текс (коефіцієнти тертя дорівнювали  $k_1 = 0,17$ ,

$k_2 = 0,22$ ); вовняна пряжа (гребінного прядіння, кручена) 36 Текс (коефіцієнти тертя дорівнювали  $k_1 = 0,14$ ,  $k_2 = 0,18$ ) (див. підрозділ 3.2-3.3).

Для розрахунків натягу і форми осі нитки, при використанні циліндричної системи координат, використовуємо системи диференціальних рівнянь першого порядку (2.3.6), (2.3.11), (2.3.18)

$$\frac{dP}{ds} = \frac{\sqrt{k_1^2 + k_2^2} C_1^2 r P \sqrt{1 - r^2 \left(\frac{C_1}{P}\right)^2}}{\{P^2 [1 - r^2 \left(\frac{C_1}{P}\right)^2] + r^2 C_1^2\}}, \quad (5.2.4.1)$$

$$\frac{dz}{ds} = \sqrt{1 - r^2 \left(\frac{d\varphi}{ds}\right)^2},$$

$$\frac{d\varphi}{ds} = \frac{C_1}{P}.$$

Для інтегрування системи диференціальних рівнянь (5.2.4.1) будемо використовувати метод Рунге-Кутта-Мерсона з автоматичним вибором кроку та програмне забезпечення наведене в підрозділі 5.2. Результати розрахунку наведені в таблицях 5.2.4.1-5.2.4.4.

Таблиця 5.2.4.1

Визначення натягу і форми нитки для віскозної комплексної нитки  
16,7 Текс

$s, мм$	$P, сН$	$z, мм$	$\varphi, рад.$
0	20,0	0	0
0,2	20,8	0.28	0.12
0,6	21,7	1.14	0.24
0,9	22,4	2.56	0.36
1,4	22,9	4.56	0.48
2,5	23,5	5.12	0.6
3,5	23,9	10.26	0.72
4,8	24,4	13.97	0.84
6,3	24,9	18.24	0.96
14,6	25,6	23.09	1.08
25,7	26,2	28.51	1.2
37,1	26,9	34.5	1.32
48,9	27,7	41.05	1.44
60,4	28,4	48.18	1.57

Таблиця 5.2.4.2

Визначення натягу і форми нитки для капронової комплексної  
нитки 31,2 Текс

$s, мм$	$P, сН$	$z, мм$	$\varphi, рад.$
0	20,0	0	0
0,4	22,3	0,24	0.12
1,5	26,7	0,98	0.24
3,8	28,9	2,21	0.36
5,4	31,1	3,94	0.48
9,3	31,4	6.15	0.6
14,3	32,0	8.86	0.72
20,5	32,3	12.06	0.84
25,1	32,6	15.75	0.96
34,2	32,8	19.94	1.08
45,0	33,3	24.62	1.2
56,8	33,7	29.79	1.32
58,3	34,1	35.45	1.44
60,4	34,4	41,62	1.57

Таблиця 5.2.4.3

Визначення натягу і форми нитки для бавовняної пряжі (гребінного  
прядіння, кручена) 23,6 Текс

$s, мм$	$P, сН$	$z, мм$	$\varphi, рад.$
---------	---------	---------	-----------------

## Механіка нитки

0	20,0	0	0
0,3	20,8	0.27	0.12
1,2	21,7	1.08	0.24
3,6	22,8	2.44	0.36
5,1	23,4	4.35	0.48
9,0	24,5	6.80	0.6
13,8	25,8	9.79	0.72
19,5	26,7	13.33	0.84
23,1	27,4	15.41	0.96
32,2	28,0	22.04	1.08
41,0	28,8	25.21	1.2
53,8	29,5	32.93	1.32
55,3	30,2	39.19	1.44
60,4	30,6	45.99	1.57

Таблиця 5.2.4.4

Визначення натягу і форми нитки для вовняної пряжі (гребінного  
прядіння, кручена) 36 Текс

<i>s, мм</i>	<i>P, сН</i>	<i>z, мм</i>	<i>φ, рад.</i>
0	20,0	0	0
0,1	20,5	0.31	0.12
0,5	20,9	1.24	0.24
0,8	21,5	2.79	0.36
1,1	22,1	4.97	0.48
2,3	22,6	5.77	0.6
3,3	23,1	11.19	0.72
4,5	23,8	15.24	0.84
6,1	24,4	19.90	0.96
14,2	24,9	25.19	1.08
25,0	25,3	31.10	1.2
36,8	25,8	35.63	1.32
48,3	26,0	44.79	1.44
60,4	26,3	52.56	1.57

За даними таблиць 5.2.4.1-5.2.4.4 побудовані апроксимовані графічні залежності, представлені на рис.5.2.4.1-5.2.4.4.

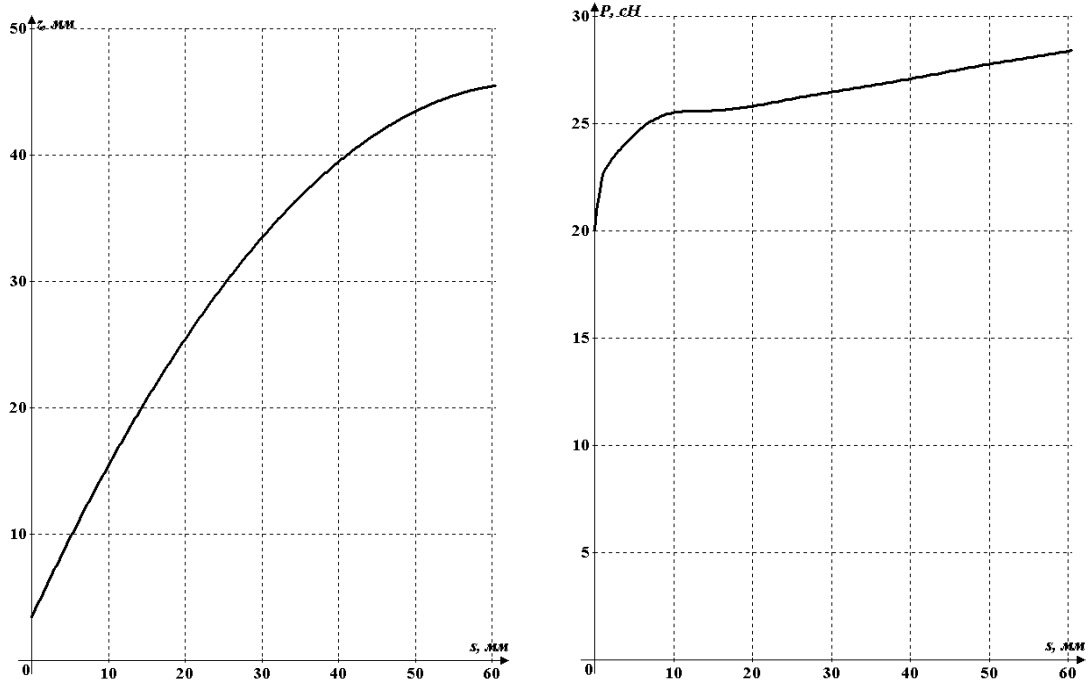


Рис.5.2.4.1. Значення координати  $z$  і натягу нитки  $P$  для віскозної комплексної нитки, 16,7Т

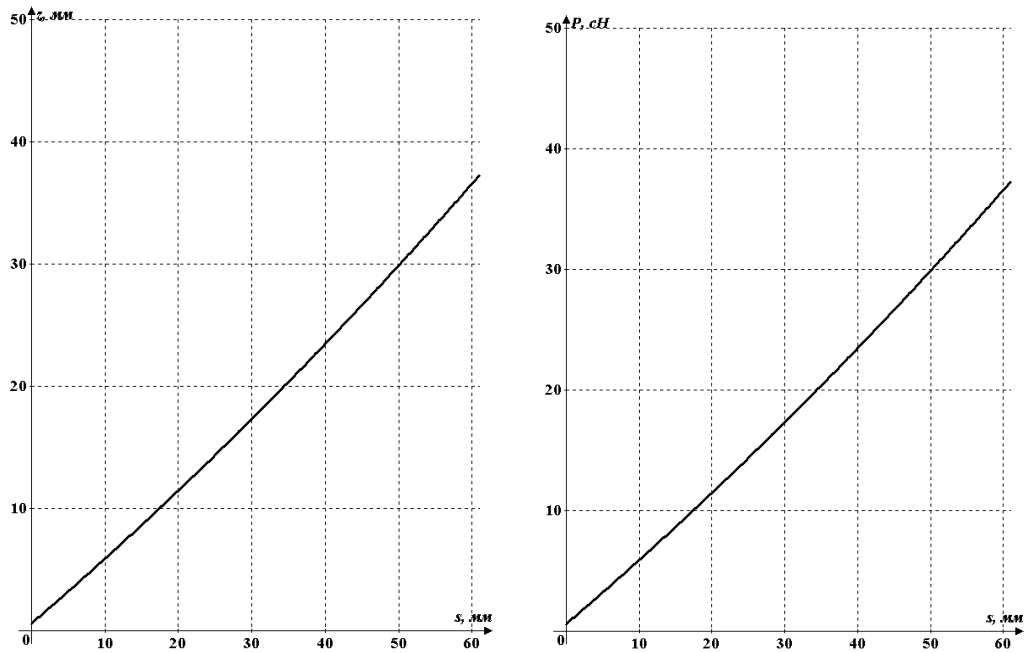


Рис.5.2.4.2. Значення координати  $z$  і натягу нитки  $P$  для капронової комплексної нитки, 31,2Т

Аналіз отриманих графічних залежностей (рис.5.2.4.1-5.2.4.4)

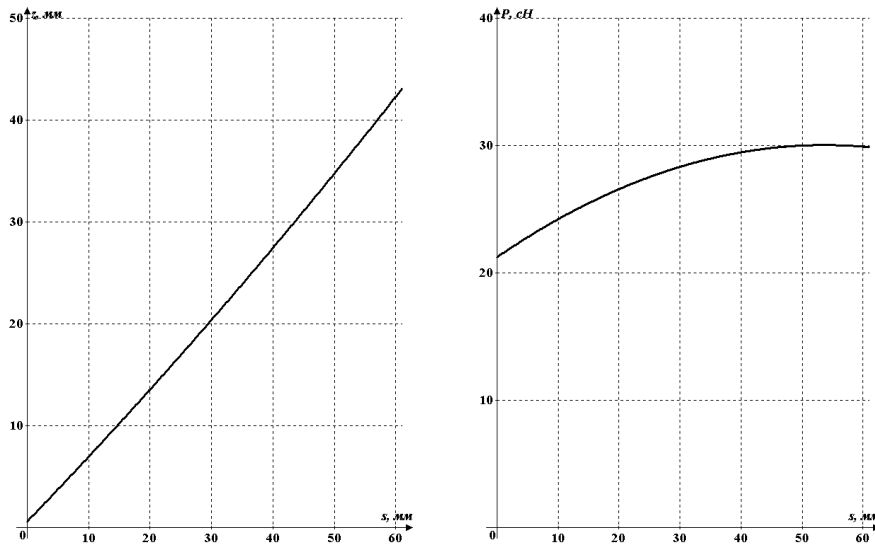


Рис.5.2.4.3. Значення координати  $z$  і натягу нитки  $P$  для бавовняної крученої пряжі, 23,6Т

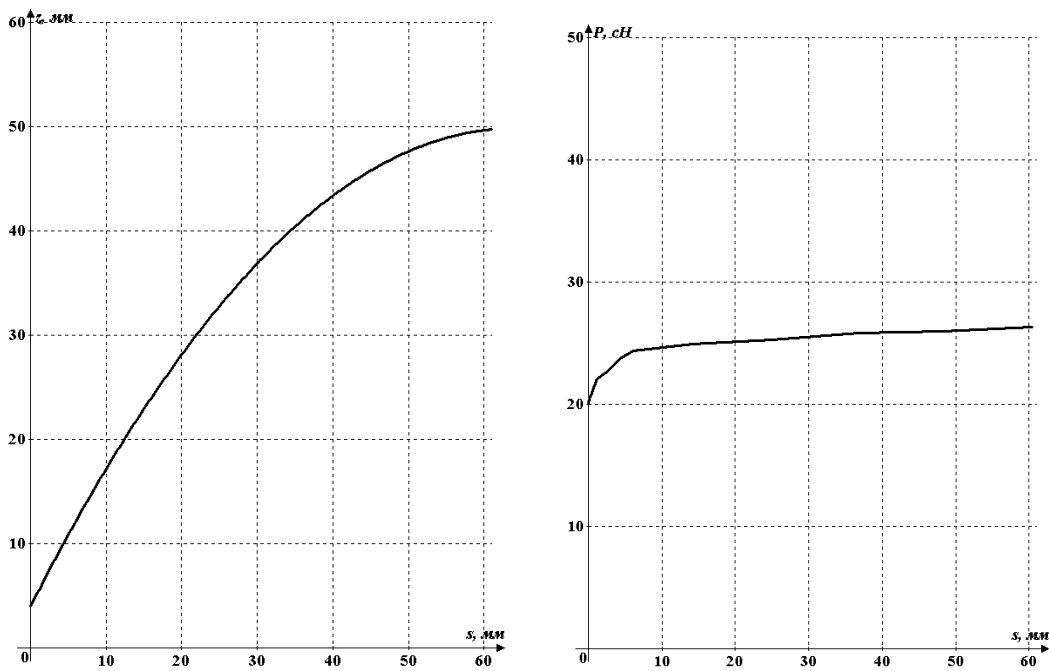


Рис.5.2.4.4. Значення координати  $z$  і натягу нитки  $P$  для вовняний крученої пряжі, 36т

показав, що нитки, які мають менше значення коефіцієнта тертя, мають більш пологу форму. Їх натяг зростає монотонно. У ниток з великими



значеннями коефіцієнта тертя натяг на початку зростає більш інтенсивно, що пояснюється її більш опуклою формою.

**Визначення форми і натягу жорсткої на вигин нитки з циліндричною направляючою великої кривизни**

Для визначення форми осі і натягу жорсткої на вигин нитки при поперечному ковзанні по циліндричній направляючій великої кривизни з урахуванням анізотропії тертя. Для проведення розрахунків (див. підрозділи 3.1-3.4) будемо використовувати наступні нитки: віскозна комплексна нитка 16,7 Текс (коефіцієнти тертя дорівнювали  $k_1 = 0,16$ ,  $k_2 = 0,21$ ); капронова комплексна нитка 31,2 Текс (коефіцієнти тертя дорівнювали  $k_1 = 0,18$ ,  $k_2 = 0,24$ ); бавовняна пряжа (гребінного прядіння, кручена) 23,6 Текс (коефіцієнти тертя дорівнювали  $k_1 = 0,17$ ,  $k_2 = 0,22$ ); вовняна пряжа (гребінного прядіння, кручена) 36 Текс (коефіцієнти тертя дорівнювали  $k_1 = 0,14$ ,  $k_2 = 0,18$ ) (див. підрозділи 3.2-3.3).

Для визначення натягу нитки скористаємося наступною системою рівнянь (з урахуванням (2.4.9), (2.4.14), (2.4.18) - (2.4.19)), отримаємо

$$P_1 = P_0 e^{\frac{\sin^2 \alpha}{r \cos \alpha} \sqrt{k_1^2 + k_2^2} s},$$

$$\int_0^s ds = \int_0^y \sqrt{\frac{b^4 + y^2(a^2 - b^2)}{b^4 - b^2 y^2}} dy, \tag{5.2.5.1}$$

$$s = b_0 + b_1 y + b_2 y^2 + \dots + b_n^n,$$

$$P_1 = P_0 e^{\frac{\sin^2 \alpha}{r \cos \alpha} \sqrt{k_1^2 + k_2^2} (b_0 + b_1 y + b_2 y^2 + \dots + b_n^n)}.$$

Результати розрахунків зміни координати  $s$  і натягу  $P$  представлені в таблицях 5.2.5.1-5.2.5.2.

Таблиця 5.2.5.1

Значення координати  $s$  і натягу нитки  $P$

$y$ , мм	Віскозна комплексна нитка 16,7 Текс ( $\alpha = 12^0$ )		Капронова комплексна нитка 31,2 Текс ( $\alpha = 14^0$ )	
	$s$ , мм	$P$ , сР	$s$ , мм	$P$ , сР
0	0	20.0	0	20.0
0.1	0.1	20.023	0.1	20.036
0.2	0.23	20.023	0.22	20.04
0.3	0.39	20.05	0.37	20.08
0.4	0.59	20.102	0.55	20.153
0.5	0.86	20.181	0.78	20.262
0.6	1.19	20.287	1.08	20.407
0.7	1.62	20.42	1.44	20.587
0.8	2.17	20.58	1.93	20.805
0.9	2.97	20.769	2.61	21.062
1.0	4.58	20.987	3.99	21.358

Таблиця 5.2.5.2

Значення координати  $s$  і натягу нитки  $P$

$y$ , мм	Бавовняна пряжа 23,6 Текс ( $\alpha = 13^0$ )		Вовняна пряжа 36 Текс ( $\alpha = 10^0$ )	
	$s$ , мм	$P$ , сР	$s$ , мм	$P$ , сР
0	0	20.0	0	20.0
0.1	0.1	20.029	0.1	20.019
0.2	0.22	20.031	0.24	20.016
0.3	0.38	20.065	0.42	20.039
0.4	0.57	20.131	0.66	20.087
0.5	0.82	20.23	0.96	20.16
0.6	1.13	20.362	1.36	20.259
0.7	1.52	20.528	1.86	20.383
0.8	2.04	20.728	2.53	20.534
0.9	2.78	20.964	3.48	20.712
1.0	4.27	21.236	5.40	20.917

Використовуючи алгоритм для апроксимації розрахункових даних отримані наступні регресійні залежності:

віскозна комплексна нитка 16,7 Текс ( $\alpha = 12^0$ )

$$s = 0,21 - 1,67y + 5,59y^2, \quad (5.2.5.2)$$

капронова комплексна нитка 31,2 Текс ( $\alpha = 14^0$ )

$$s = 0,18 - 1,29y + 4,74y^2, \quad (5.2.5.3)$$

бавовняна пряжа 23,6 Текс ( $\alpha = 13^0$ )

$$s = 0,19 - 1,48y + 5,14y^2, \quad (5.2.5.4)$$

вовняна пряжа 36 Текс ( $\alpha = 10^0$ )

$$s = 0,25 - 2,16y + 6,79y^2. \quad (5.2.5.5)$$

Отримані вирази (5.2.5.2) - (5.2.5.5) підставлялися в останнє рівняння системи (5.2.5.1).

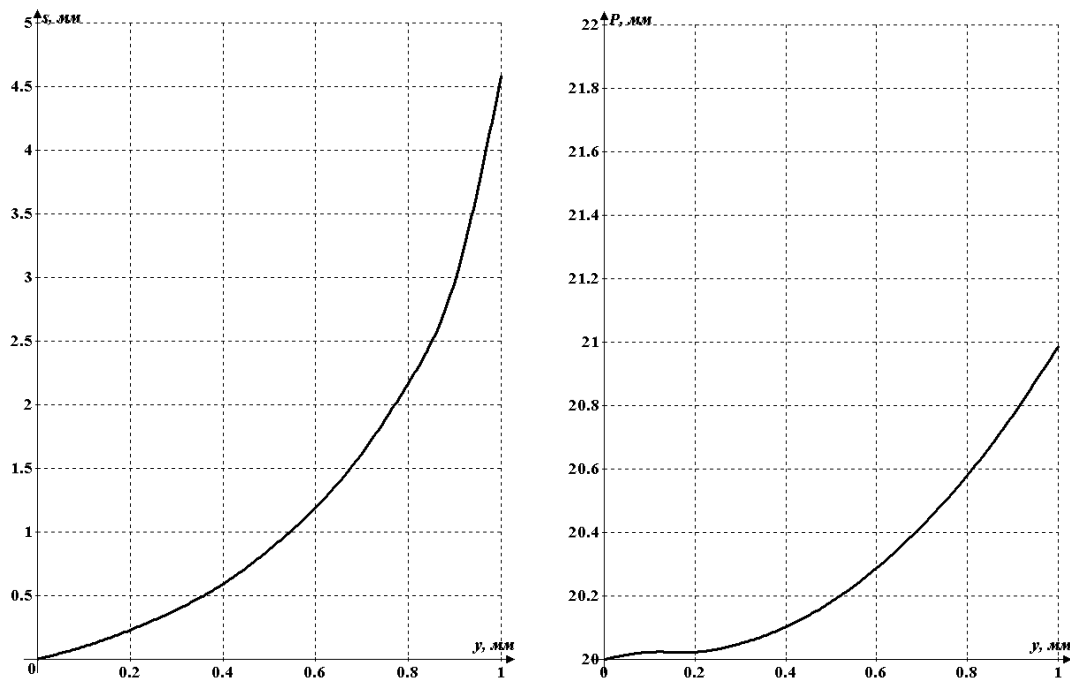


Рис.5.2.5.1. Значення координати  $s$  і натягу нитки  $P$  для віскозної комплексної нитки, 16,7Т

Результати розрахунків значень координати і натягу нитки представлені на рис.5.2.5.1-5.2.5.4.

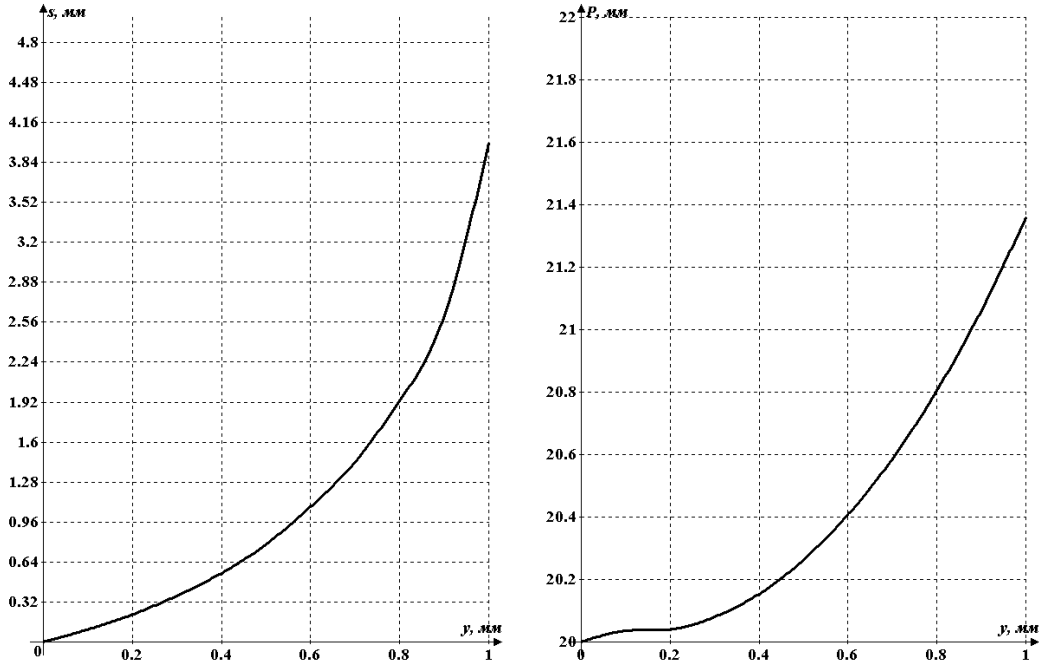


Рис.5.2.5.2. Значення координати  $s$  і натягу нитки  $P$  для капронової комплексної нитки, 31,2Т

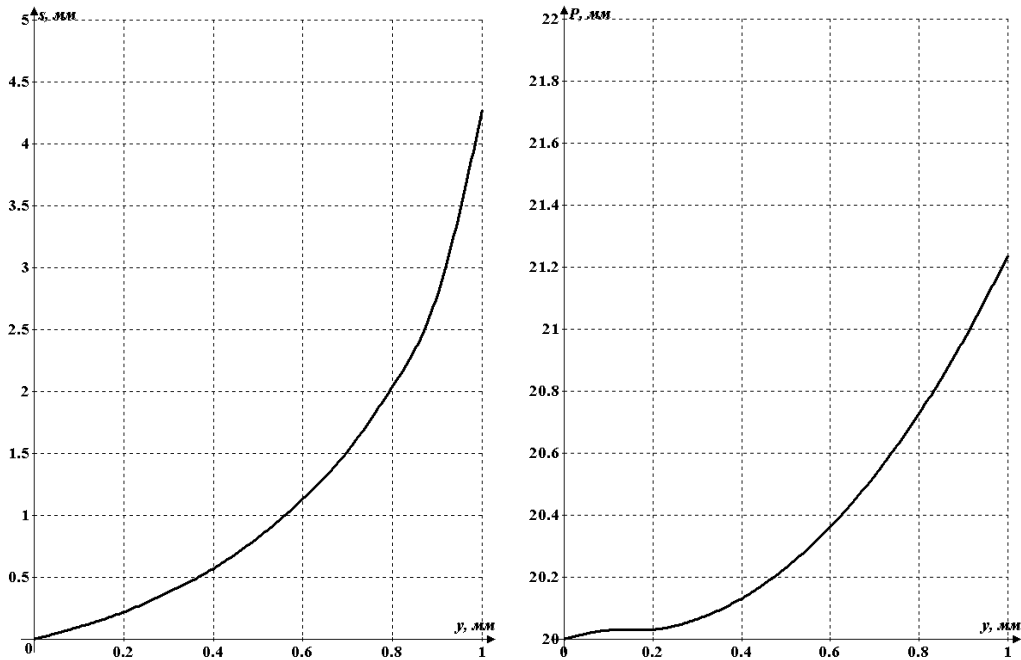


Рис.5.2.5.3. Значення координати  $s$  і натягу нитки  $P$  для бавовняної крученої пряжі, 23,6Т

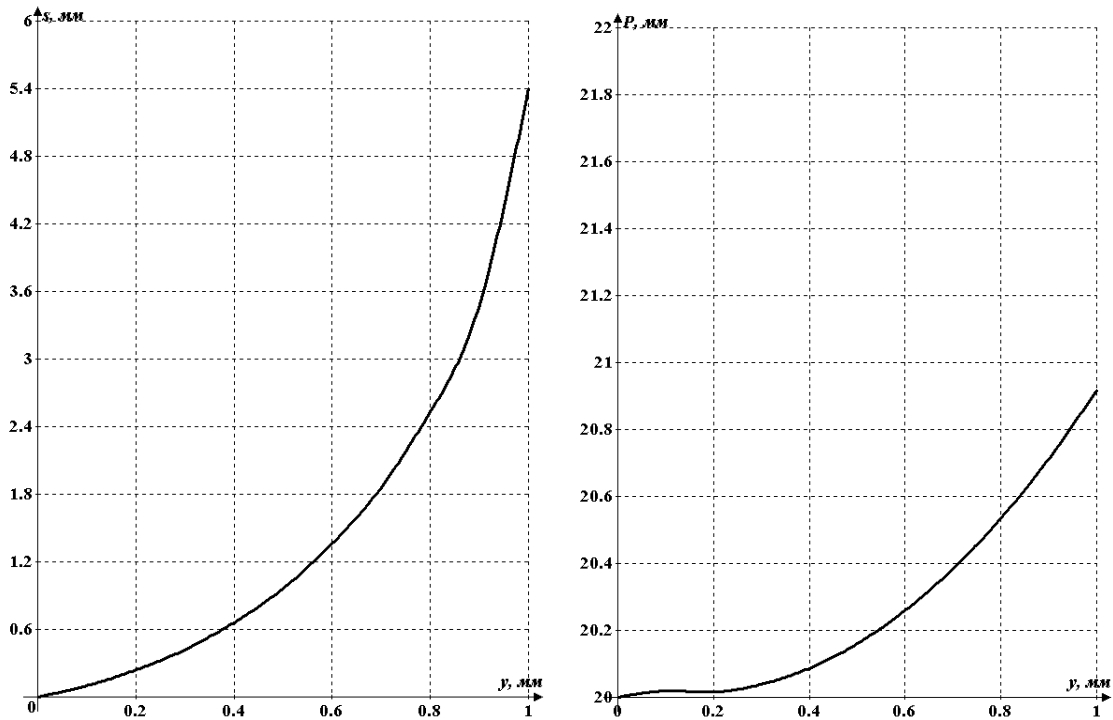


Рис.5.2.5.4. Значення координати  $y$  і натягу нитки  $P$  для вовняної крученої пряжі, 36т

Аналіз отриманих залежностей показує, що більш полого траєкторію осі і мінімальний натяг мають нитки з меншими значеннями коефіцієнтів поздовжнього і поперечного тертя.

### 5.3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ НИТОК З НАПРАВЛЯЮЧИМИ З УРАХУВАННЯМ АНІЗОТРОПІЇ ТЕРТЯ

Для перевірки коректності зроблених припущень при теоретичному дослідженні процесу взаємодії комплексних ниток і пряжі з направляючими великої і малої кривизни з урахуванням анізотропії тертя,

а також для визначення величини помилки при вимірюванні величини натягу в роботі були реалізовані дві серії експериментальних досліджень.

Перша серія включала в себе експериментальні дослідження по визначенню впливу геометричних параметрів направляючої і швидкості руху нитки на величину натягу і форму осі нитки в процесі її переробки. Для її реалізації була розроблена спеціальна електротензометрична установка.

Друга серія включала в себе експериментальні дослідження по визначенню впливу геометричних параметрів направляючої і швидкості руху нитки на величину питомого розривного навантаження і відносного розривного подовження. Мається на увазі, що при взаємодії нитки з направляючими відбувається збільшення натягу. Залежно від геометричних параметрів направляючої і швидкості докладання деформації, за рахунок зміни взаємного розташування окремих філаментів відносно один одного в нитці і їх руйнування, відбувається зниження міцності нитки при зміні її відносного розривного подовження. Ця обставина може призвести до обриву нитки при її зтягнення в тканину або трикотаж на наступних технологічних переходах.

Експериментальні дослідження проводилися на розривній машині РМ-30-1 Іванівського виробничого об'єднання «Точприбор», що дозволило змінювати швидкість розтягування нитки (швидкість руху нижнього затискача) в межах від 80 мм/хв до 800 мм/хв (рис.5.3.1).

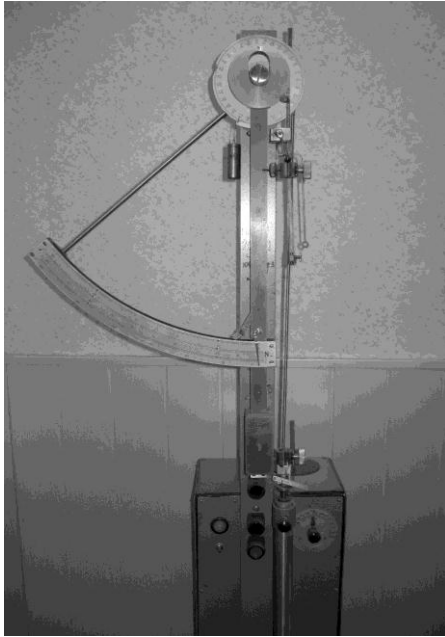


Рис.5.3.1. РМ-30-1

Діапазон варіювання розривного навантаження задається відповідними противагами. Величина першого діапазону змінюється в межах від 10 до 50 Н. Величина другого діапазону змінюється в межах від 20 до 100 Н. Величина третього діапазону змінюється в межах від 60 до 300 Н.

Розробка електротензометричної установки для першої серії дослідів обумовлена тим, що використовувані ручні механічні тензометри володіють низькою

точністю вимірювання. Рухома нитка має подовжню пульсацію швидкості і натягу, що веде до нестационарної установки стрілки ручного вимірювального приладу. Крім того, в процесі вимірювань перепад середніх натягів нитки досягає великої величини, що вимагає перемикання коефіцієнта посилення ручного механічного тензометра. Враховуючи швидкість руху вузла, таке перемикання в динамічному режимі дуже складно здійснити.

Таким чином, для передбачуваних досліджень найбільш раціональною буде експериментальна установка на основі електротензометричної станції. Необхідно зазначити, що всі прилади проходили спеціальну тестову перевірку на предмет своєї функціональної придатності та надійності в роботі.

### **Розробка електротензометричної установки для проведення експериментальних досліджень**

Загальний вигляд установки наведено на рис.5.3.2. На станині 5 жорстко укріплені перший 2 і другий 3 вимірювальні вузли. Між

вимірювальними вузлами 2 і 3 встановлено пристрій 4 для вимірювання фрикційних властивостей ниток з урахуванням анізотропії.

Нитка, сходячи з циліндричної шпулі 1, проходить через тарілчастий нитконатяжний прилад, який повідомляє їй попередній натяг (натяг веденої гілки).

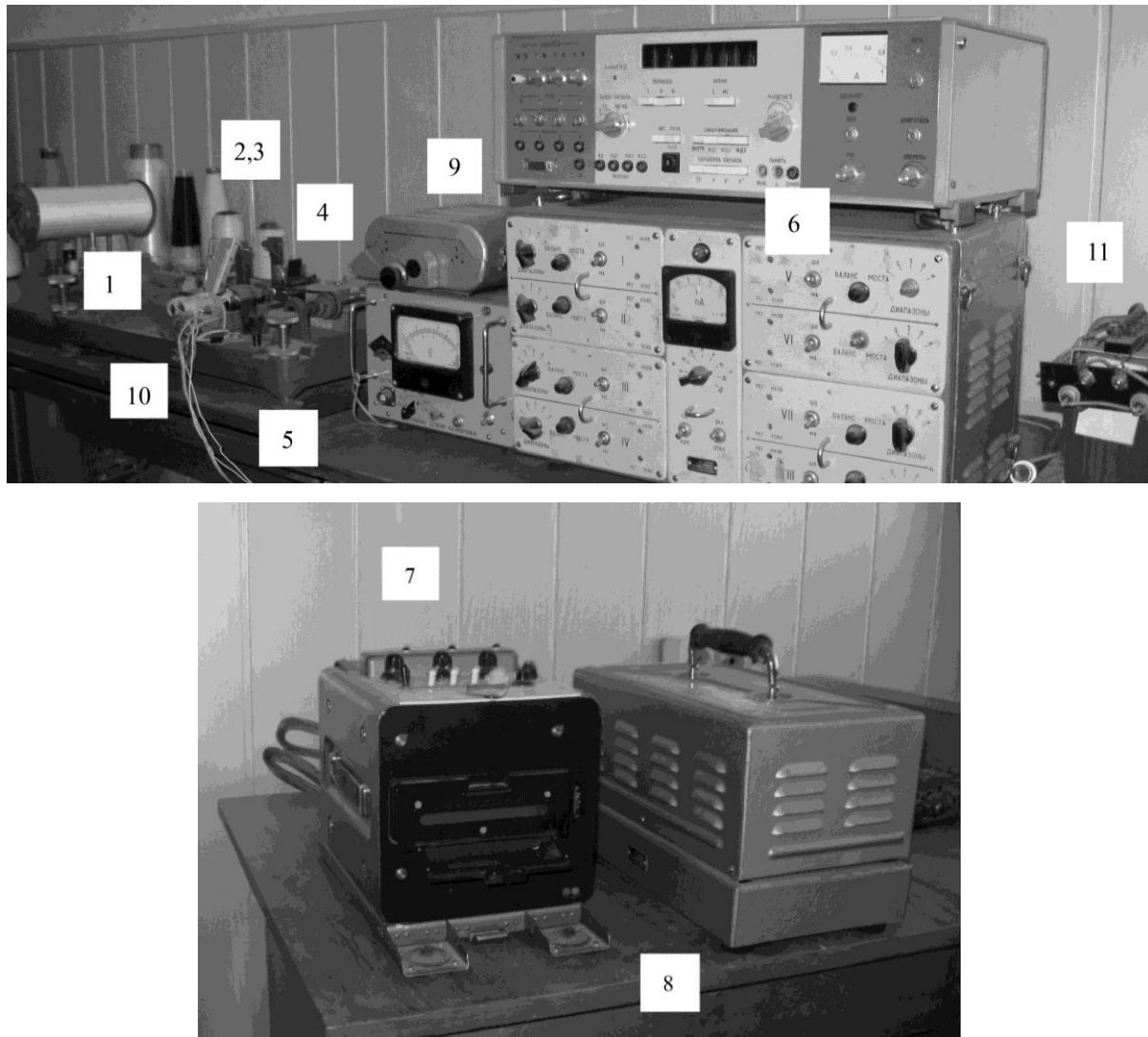


Рис.5.3.2. Загальний вигляд установки

На рис.5.3.3 представлена схема експериментальної установки. Послідовно проходячи через перший вимірювальний вузол 2, тарілчастий нитконатяжний прилад, пристрій 4 для вимірювання фрикційних



властивостей з урахуванням анізотропії нитка надходить у пристрій для змотування 10.

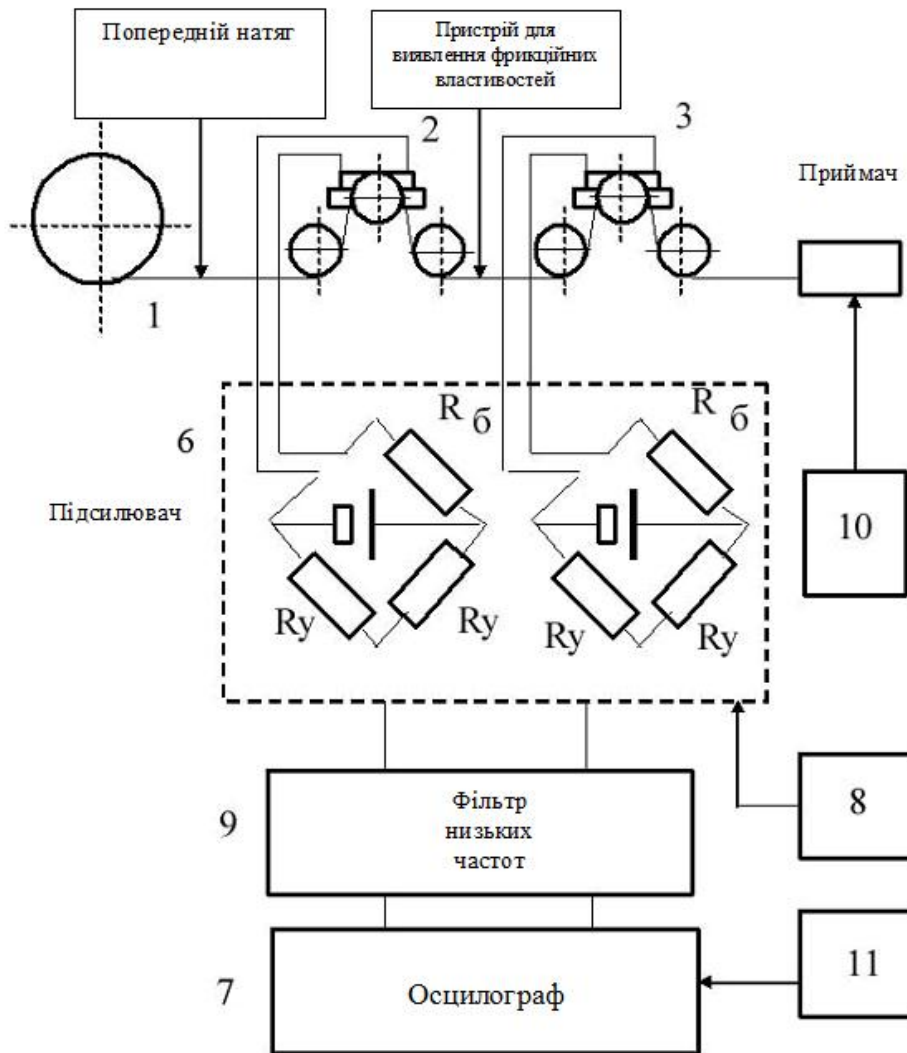


Рис.7.3.3. Схема експериментальної установки

Рис.5.3.3. Схема експериментальної установки

Електричні сигнали з першого вимірювального вузла 2 і другого вимірювального вузла 3 надходять на 8-и каналний підсилювач 8АНЧ-7М

(позиція 6). Далі через фільтр низьких частот 9 сигнали надходять у осцилограф 7 і далі на відповідні гальванометри осцилографа К12-22.

У таблиці 5.3.1 представлені характеристики гальванометрів осцилографа К12-22 (аналіз показав, що найбільш підходящими гальванометри для експерименту є гальванометри I і II типу).

Гальванометр є основним елементом осцилографа, функція якого полягає в реєстрації електричного сигналу, що надходить з підсилювача, на фотопапері.

Таблиця 5.3.1

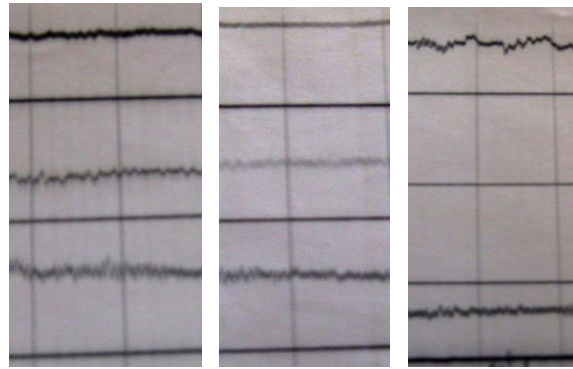
Характеристики гальванометрів осцилографа К12-22

Характеристика гальванометрів	Типи гальванометрів				
	I	II	III	IIIa	IV
Чутливість, мм/мА, не менше	0,21	0,57	2,37	9,5	32,2
Електричний опір, Ом	16±3	36±7	8±1,5	17±4,5	22±3,5
Максимально допустиме значення постійного струму, мА	30	30	15	3,5	2
Діапазон реєстрації змінних процесів, Гц	Від 0 до 500	Від 0 до 300	Від 0 до 150	Від 0 до 100	Від 0 до 30

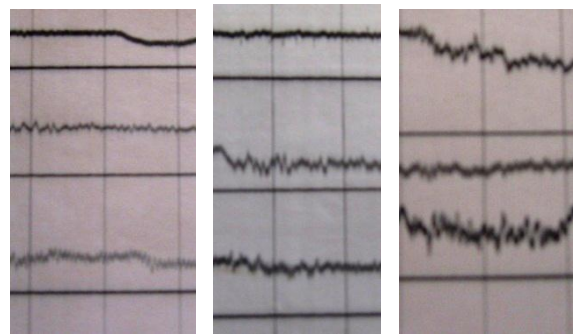
Для експерименту використовувалася осцилографний фотопапір МС-2-135, ТУ 6-17-1112-80 шириною 120 мм. Визначальними факторами при виборі гальванометрів осцилографа є частотна характеристика досліджуваного процесу і вихідний струм з відповідного каналу підсилювача на осцилограф.

В експериментальну установку також входили блоки живлення 8, 11 відповідно для підсилювача 8АНЧ-7М і осцилографа К12-22.

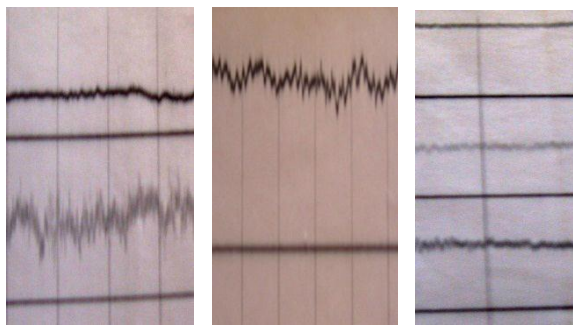
Зразки осцилограм наведені на рис.5.3.



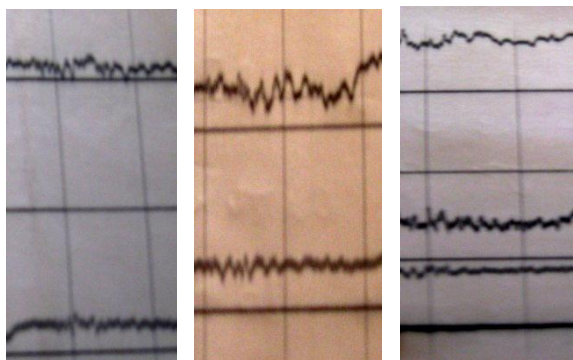
а



б



в



г

Рис.5.3.Зразки осцилограм

Осцилограми а (рис.5.3.4) отримані для віскозної комплексної нитки 16,7 Текс для швидкостей  $V = 1, 2, 3$  м/с; осцилограми б (рис.5.3.4б)

отримані для капронової комплексної нитки 31,2 Текс для швидкостей  $V = 1, 2, 3$  м/с; осцилограми в (рис.5.3.4в) отримані для бавовняної гребінній крученої пряжі 23,6 Текс для швидкостей  $V = 1, 2, 3$  м/с; осцилограми  $\gamma$  (рис.5.3.4г) отримані для вовняної гребінної крученої пряжі 36 Текс для швидкостей  $V = 1, 2, 3$  м/с.

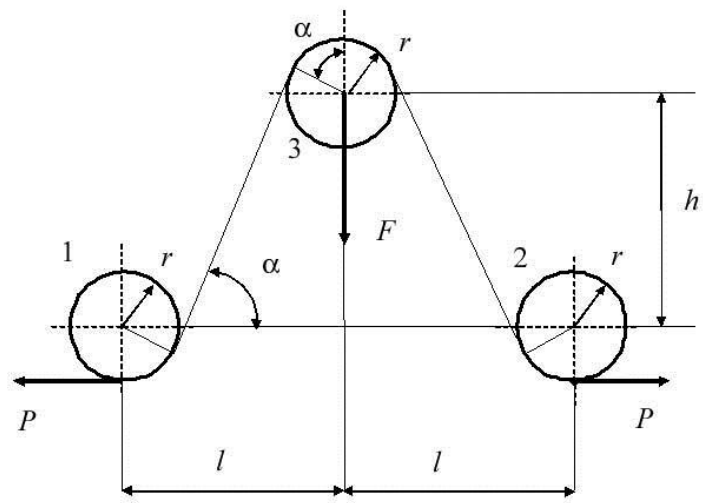
Вимірювальні вузли 2 і 3 (див. Рис.5.3.2 ÷ 5.3.3) служать для вимірювання натягу веденої і ведучої гілок нитки до і після приладу 4 для визначення фрикційних властивостей з урахуванням анізотропії тертя. Їх конструкція однакова.

На рис.5.3.5 представлена схема вимірювального вузла, який включає в себе два ролика 1 і 2, які встановлені в підшипниках на нерухомих осях. Третій ролик 3 встановлений на консольно закріплену балочку таким чином, що внутрішнє кільце підшипника закріплено на ній, а з зовнішнім кільцем підшипника жорстко закріплений ролик взаємодіє з ниткою. Силами тертя в підшипниках нехтуємо.

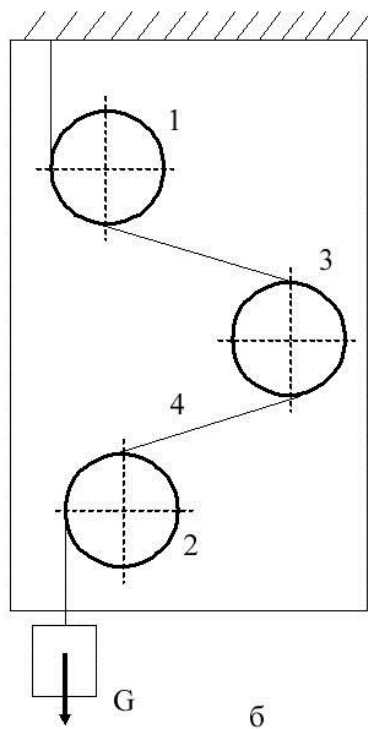
Поперечні і поздовжні розміри балочки обрані такими, що частота власних коливань балочки дорівнює  $f = 1400$  Гц. Ця частота у багато разів перевищує частоту найбільш високої складової натягу.

На балочку наклеєний тензодатчик з базою в 5 мм, які в парі з іншим тензодатчиком (наклеєним на пластину з того ж матеріалу) утворюють одну половину вимірювального моста. Друга половина розташовується на відповідному каналі в підсилювачі 8АНЧ-7М.

На схемі прийняті наступні позначення:  $r$  - радіус роликів, з якими взаємодіє нитка;  $l, h$  - відповідно відстань між осями нерухомого і рухомого роликів по горизонталі і вертикалі;  $P$  - натяг нитки;  $F$  - згинальна балочку сила;  $\alpha$  - кут нахилу нитки до горизонталі у вимірювальному вузлі.



а



б

Рис.5.3.5. Схема вимірювального вузла 2 і 3 і тарировочна схема

Після отримання осцилограми зміни величини  $F$  від часу необхідно перейти безпосередньо до значення натягу  $P$ . Для цього необхідно отримати формулу для перерахунку. Як впливає зі схеми (рис.5.3.5) залежність між  $F$  і  $P$  має вигляд

$$F = 2P \sin \alpha . \quad (5.3.1)$$

Вираз, що пов'язує між собою геометричні параметри, має вигляд

$$2r \sin \alpha + \sqrt{l^2 + h^2 - 4r^2} \cos \alpha = l . \quad (5.3.2)$$

Рівняння (5.3.2) являє собою тригонометричне рівняння, яке вирішуємо методом додаткового кута. Запишемо (5.3.2) у вигляді

$$\frac{2r}{\sqrt{l^2 + h^2}} \sin \alpha + \frac{\sqrt{l^2 + h^2 - 4r^2}}{\sqrt{l^2 + h^2}} \cos \alpha = \frac{l}{\sqrt{l^2 + h^2}} , \quad (5.3.3)$$

і прийmemo

$$\frac{2r}{\sqrt{l^2 + h^2}} = \cos \alpha' , \quad \frac{\sqrt{l^2 + h^2 - 4r^2}}{\sqrt{l^2 + h^2}} = \sin \alpha' , \quad (5.3.4)$$

де додатковий кут визначається як

$$\alpha' = \arcsin \frac{\sqrt{l^2 + h^2 - 4r^2}}{\sqrt{l^2 + h^2}} . \quad (5.3.5)$$

Тоді, з урахуванням (5.3.4), вираз (5.3.3) прийме вигляд

$$\sin \alpha \cos \alpha' + \cos \alpha \sin \alpha' = \frac{l}{\sqrt{l^2 + h^2}} , \quad (5.3.6)$$

або

$$\sin(\alpha + \alpha') = \frac{l}{\sqrt{l^2 + h^2}} .$$

Після перетворення отримаємо

$$\alpha = \arcsin \frac{l}{\sqrt{l^2 + h^2}} - \arcsin \frac{\sqrt{l^2 + h^2 - 4r^2}}{\sqrt{l^2 + h^2}} . \quad (5.3.7)$$

Використовуючи формулу синуса різниці двох кутів, отримаємо

$$\sin \alpha = \frac{l}{\sqrt{l^2 + h^2}} \sqrt{1 - \frac{l^2 + h^2 - 4r^2}{l^2 + h^2}} - \sqrt{1 - \frac{l^2}{l^2 + h^2}} \frac{\sqrt{l^2 + h^2 - 4r^2}}{\sqrt{l^2 + h^2}}.$$

Остаточно отримаємо

$$\sin \alpha = \frac{2rl - h\sqrt{l^2 + h^2 - 4r^2}}{l^2 + h^2}. \quad (5.3.8)$$

Підставляємо (5.3.8) в (5.3.1), отримуємо формулу для перерахунку величини натягу

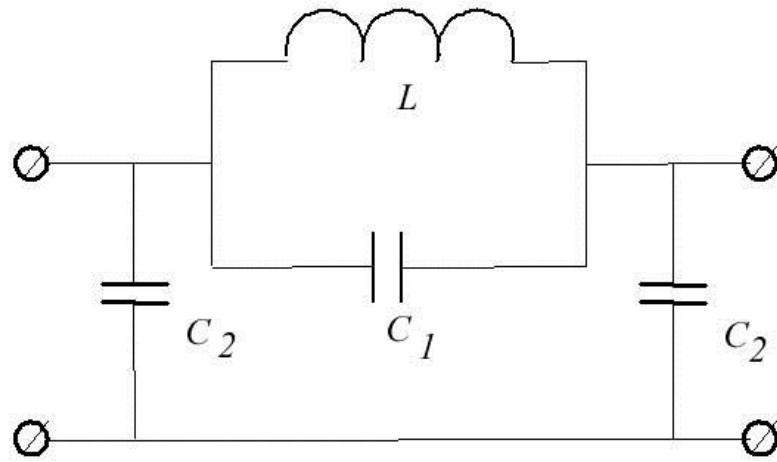
$$P = \frac{F}{2\left(\frac{2rl - h\sqrt{l^2 + h^2 - 4r^2}}{l^2 + h^2}\right)}. \quad (5.3.9)$$

Останній вираз (5.3.9) дозволяє визначати істинне значення натягу після розшифрування осцилограм.

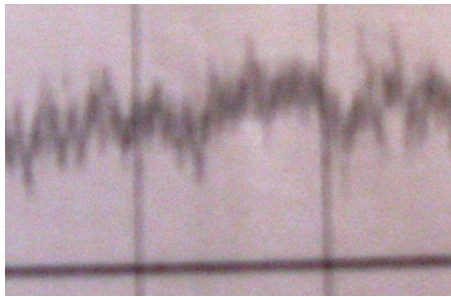
На рис.5.3.5б представлена тарировочна схема вимірювального вузла. Вимірювальний вузол жорстко закріплюється однією зі сторін. Нитка 4 заправляється між нерухомими 1 і 2 і рухомими 3 роликami. До кінця нитки 4 послідовно прикріплюються вантажі відомої ваги. Показання величини сили фіксуються на фотопапері. За отриманими точками будується тарировочна залежність. Проведений аналіз дозволив встановити, що тарировочні залежності мають лінійний характер.

На рис.5.3.6 представлена схема електричного фільтру низьких частот, який встановлюється перед осцилографом і використовується в процесі запису коливань натягу нитки у вузькому діапазоні частот від 0 ÷ 50 Гц. Даний діапазон частот близький до робочого для розглянутих типів нитконатягувачів. Елементи фільтра розраховані за відомими формулами і склали  $L = 38,4$ ;  $C_1 = 171$  мкф;  $C_2 = 192$  мкф. На рис.5.3.6 б,в представлені осцилограми вимірювання натягу нитки без фільтру низьких частот (б) і з застосуванням фільтру низьких частот (в).

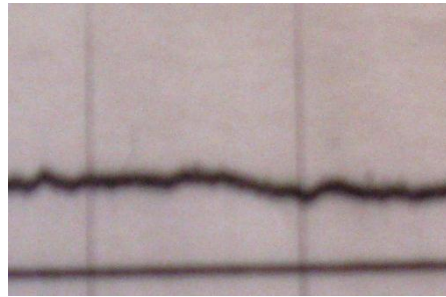
На рис.5.3.6г представлена амплітудно-частотна характеристика зазначеного фільтру.



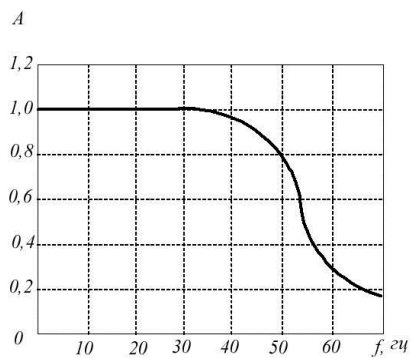
а



б



в



г

Рис.5.3.6. Фільтр низьких частот і його амплітудно-частотна характеристика

Пристрій для змотування 10 включає в себе нерухомо укріплений електродвигун, на валу якого укріплений шків. Зв'язок із ступінчастим шківом на відомому валу здійснюється за допомогою пасової передачі.



Електродвигун підключається до мережі через трансформатор  $Tr$  і випрямляч, зібраний на діодах Д7Ж (рис.5.3.7).

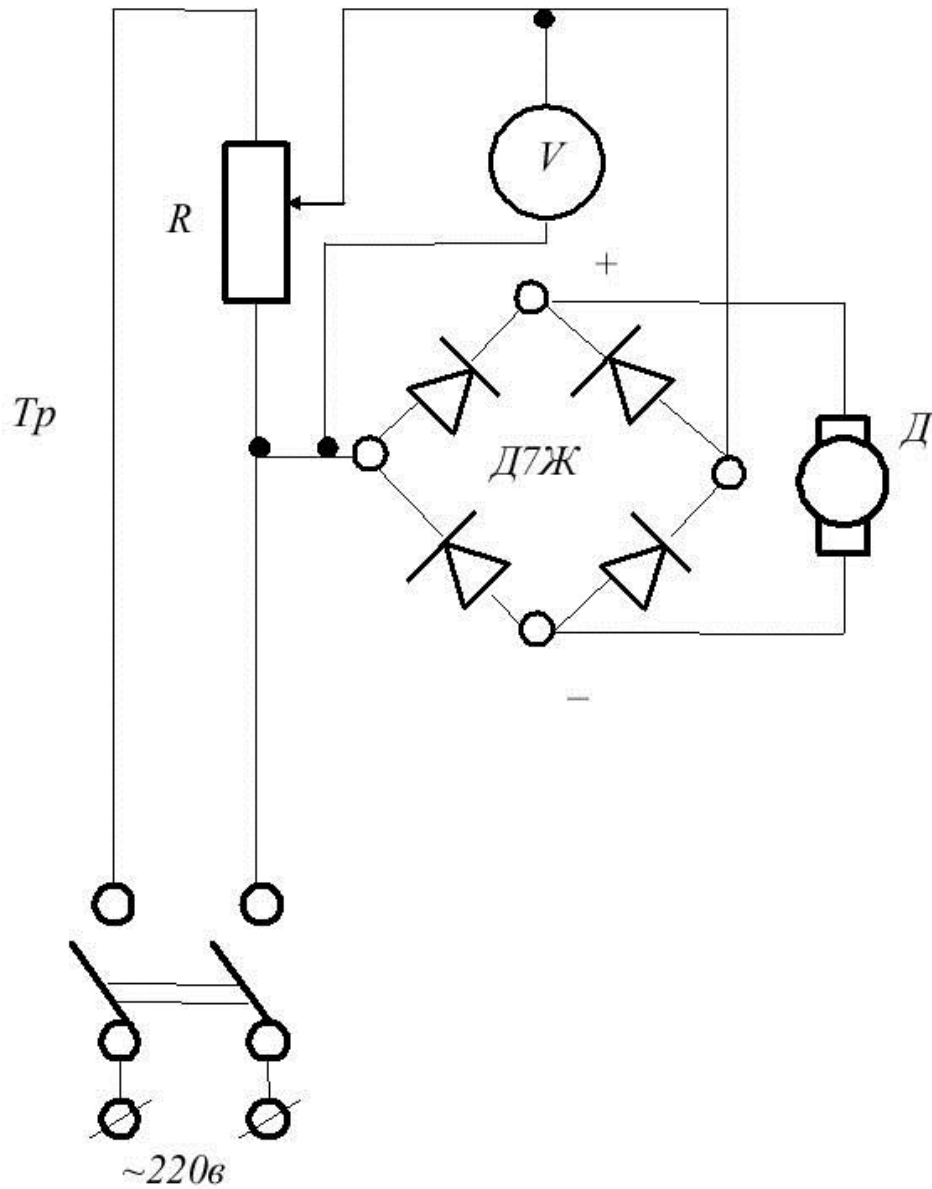


Рис.5.3.5. Електрична схема управління кутовою швидкістю обертання двигуна

Така схема дозволяє плавно змінювати швидкість обертання шківів і встановлювати лінійну швидкість руху нитки в діапазоні від 1 до 4 м/с.

**Пристрій для визначення фрикційних властивостей ниток в подовжньому і поперечному напрямку з урахуванням анізотропії тертя**

Для визначення фрикційних властивостей ниток в подовжньому і поперечному напрямку з урахуванням анізотропії тертя було розроблено спеціальний пристрій. Винахід відноситься до галузі дослідження матеріалів механічними способами, зокрема для визначення фрикційних властивостей гнучких ниток.

Відомий прилад для визначення коефіцієнта тертя ниток в подовжньому напрямку [1-14]. Прилад містить шків, призначений для розміщення на ньому зразка матеріалу, фрикційні властивості якого досліджуються, вантаж і динамометр, які з'єднані гнучкою стрічкою, яка має високу жорсткість в подовжньому напрямку, на нижній поверхні якої, з боку шківа, прикріплюється зразок матеріалу, що досліджується.

Але використання цього приладу не дозволяє визначити величину коефіцієнта тертя в поперечному напрямку (перпендикулярно волокнам), що знижує діапазон вимірювання величин і потребує додаткових витрат на визначення параметрів, які визначають анізотропію сил тертя.

Найбільш близьким по суті і ефекту, який досягається, до заявленого технічного рішення є прилад для визначення коефіцієнта тертя ниток [10].

Прилад містить шків, який встановлений з можливістю горизонтального переміщення щодо осі обертання, причому одна його торцева сторона має нахил і впирається в ролик, а інша контактує з пружиною. Гнучка стрічка з жорсткістю в подовжньому і поперечному напрямках, яка з'єднана з вантажем з одного боку і робочим рухомим органом динамометра з іншого боку, має на нижній поверхні з боку шківа прикріплений зразок нитки, фрикційні властивості якої досліджуються, і

розташовується між трьома парами роликів, які закріплені на двох кронштейнах. Кронштейни роликів з'єднані з робочими рухливими органами динамометрів. В якості рухомих органів динамометрів для визначення зусиль в поздовжньому напрямку використовуються електротензометричні пристрої, описані в підрозділі 5.3.1.

Але розвиток сучасного машинобудування та технологій в легкій і текстильній промисловості призводить до різкого збільшення швидкості руху нитки. Як відомо зі збільшенням швидкості руху нитки змінюється і величина коефіцієнта тертя [42-46]. Це потребує припасування при розрахунку натягу ведучої гілки нитки в робочій зоні технологічного обладнання, коли нитка взаємодіє з тарілчастими нитконатяжними пристроями [10]. Крім того, наявність вищої кінематичної пари (кулачкової), яку утворюють ролик і шків з похилою торцевою стороною і пружини для силового замикання, не дозволяє використовувати його при високих швидкостях обертання шківів. Це пояснюється наявністю розривів безперервності в графіках прискорення і похідних від прискорення будь-яких порядків, які мають місце в кулачкових механізмах [12].

Це призводить до того, що в процесі роботи виникають удари, відривання шківів від ролика. Це служить причиною нестаціонарного руху шківів в поперечному напрямку щодо осі обертання і не дозволяє визначити коефіцієнт тертя в поперечному напрямку при великих швидкостях руху нитки.

Завданням запропонованого винаходу є розширення технологічних можливостей за рахунок збільшення діапазону вимірювання фрикційних властивостей ниток при великих швидкостях руху.

Поставлена мета досягається тим, що пристрій для визначення фрикційних властивостей нитки, який містить катушкотримач, підпружинений ролик, три вимірювальних вузла з тензодатчиками, два рухливі ролика закріплені на корпусі і нерухому циліндричну

направляючу, яка закріплена на кронштейнах жорстко закріплених на корпусі, приймальний барабан для нитки і ступінчастий привід, згідно запропонованої моделі містить горизонтальну циліндричну направляючу на поверхні якої, за твірними, щільно розташовані нитки, кінці циліндричної направляючої квадратної форми в перетині з пристроєм фіксації розташовані на вертикальних кронштейнах в двох горизонтальних пазах, висота яких дорівнює довжині сторони квадрата кінця циліндричної направляючої, покажчик і кутомір [10].

Порівняльний аналіз з прототипом показує, що заявлений пристрій для визначення фрикційних властивостей нитки відрізняється тим, що містить горизонтальну циліндричну направляючу на поверхні якої, за твірними, щільно розташовані нитки, кінці циліндричної направляючої квадратної форми в перетині з пристроєм фіксації розташовані на вертикальних кронштейнах в двох горизонтальних пазах, висота яких дорівнює довжині сторони квадрата кінця циліндричної направляючої, покажчик і кутомір. Ознаки, які були перераховані вище, дозволяють вимірювати фрикційні властивості ниток з урахуванням анізотропії в разі ковзання по поверхні інших ниток, які виконують функцію направляючих, яка розширює технологічні можливості за рахунок збільшення асортименту матеріалів направляючих поверхонь з якими взаємодіє нитка в процесі своєї переробки.

На рис.5.3.8 і 5.3.9 зображена схема приладу.

Пристрій для визначення фрикційних властивостей нитки містить котушкотримач, підпружинений ролик 1, три вимірювальних вузла 2-3 з тензодатчиками, два рухливих ролика 4, закріплених на корпусі 5 і нерухому циліндричну направляючу 6, яка закріплена на кронштейнах 11 жорстко закріплених на корпусі 5, приймальний барабан 9 для нитки і ступінчастий привід 8, горизонтальну циліндричну направляючу на поверхні якої, за твірними, щільно розташовані нитки, кінці циліндричної

направляючої квадратної форми в перетині з пристроєм фіксації розташовані на вертикальних кронштейнах в двох горизонтальних пазах, висота яких дорівнює довжині сторони квадрата кінця циліндричної направляючої, показчик і кутомір.

Пристрій працює наступним чином. На першому етапі щільно розміщуємо нитку 12, яка виконує функцію направляючої, по утворюючим циліндрової направляючої 6. Встановлюємо циліндричну направляючу 6 в горизонтальні пази 10 кронштейнів 11, таким чином, щоб квадратні кінці циліндричної направляючої 6 з показчиком 14 розташувалися в горизонтальній площині, а показчик 14 був суміщений з 0-ою відміткою показника кутoměра 15. Нитка з котушки проходить тарілчастий нитконатягувачі, підпружинений ролик 1, три вимірювальних вузла 2-3 з тензодатчиками, два рухливих ролика 4 закріплених на корпусі 5 і циліндричну направляючу 6, яка розташована на кронштейнах 11 жорстко закріплених на корпусі 5, приймальний барабан 9 для нитки. Включає ступінчастий привід 8, наводимо досліджувану нитку в рух. Значення натягу фіксуються вимірювальними вузлами 2-3. Після цього, визначають фрикційні характеристики. Для оцінки анізотропії фрикційних властивостей відключають пристрої фіксації і повертають циліндричну направляючу 6 в горизонтальних пазах 10 кронштейнів 11 і включають пристрої фіксації. Кут обороту контролюють показником кутoměра 15 і показчиком 15.3. Після чого виконують попередні операції.

Використання запропонованого пристрою дозволяє розширити технологічні можливості за рахунок збільшення асортименту матеріалів направляючих поверхонь, з якими взаємодіє нитка в процесі своєї переробки з урахуванням їх анізотропії, що дозволяє удосконалити технологічні процеси та обладнання легкої та текстильної промисловості.

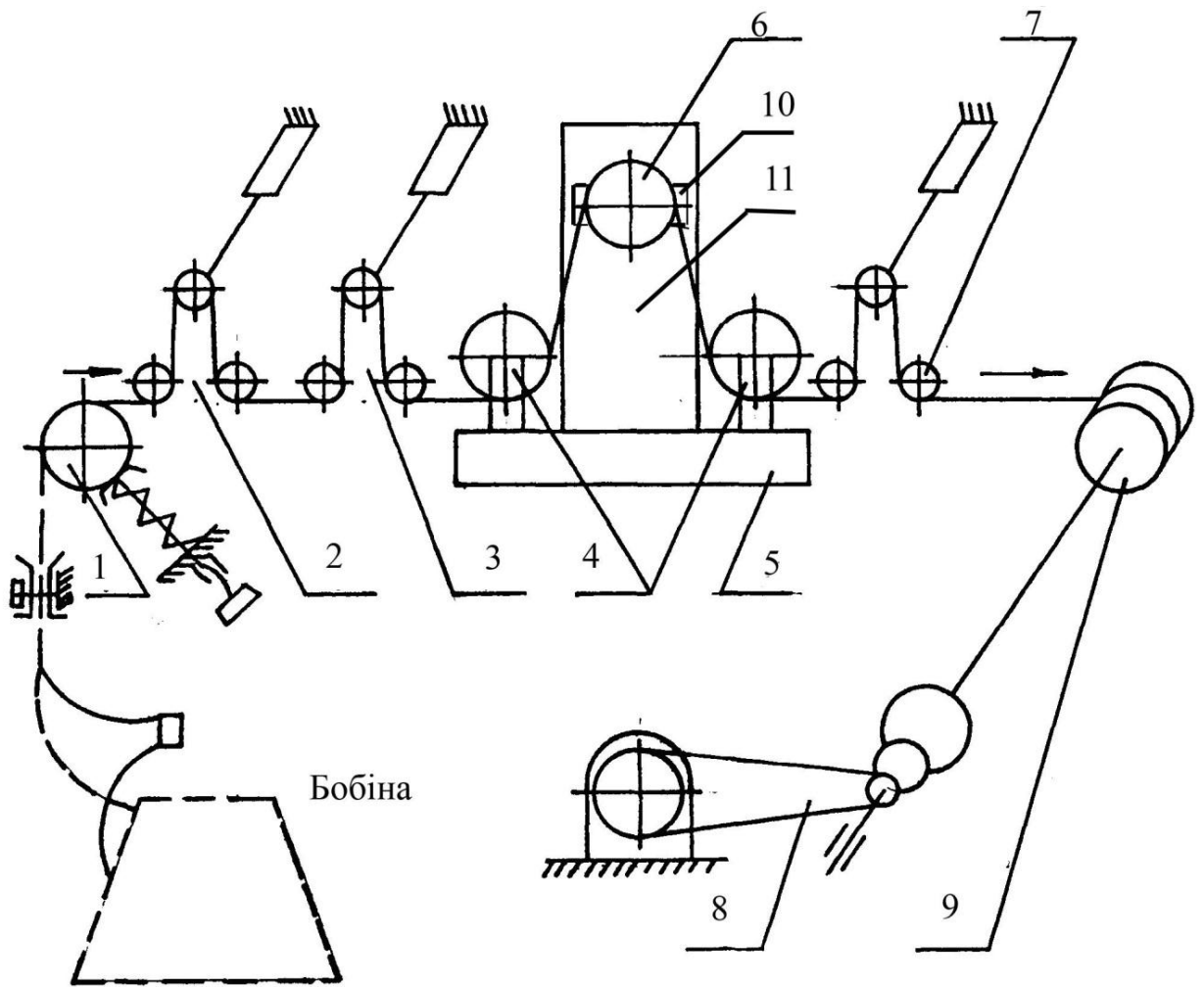


Рис.5.3.8. Схема приладу для визначення коефіцієнта тертя ниток

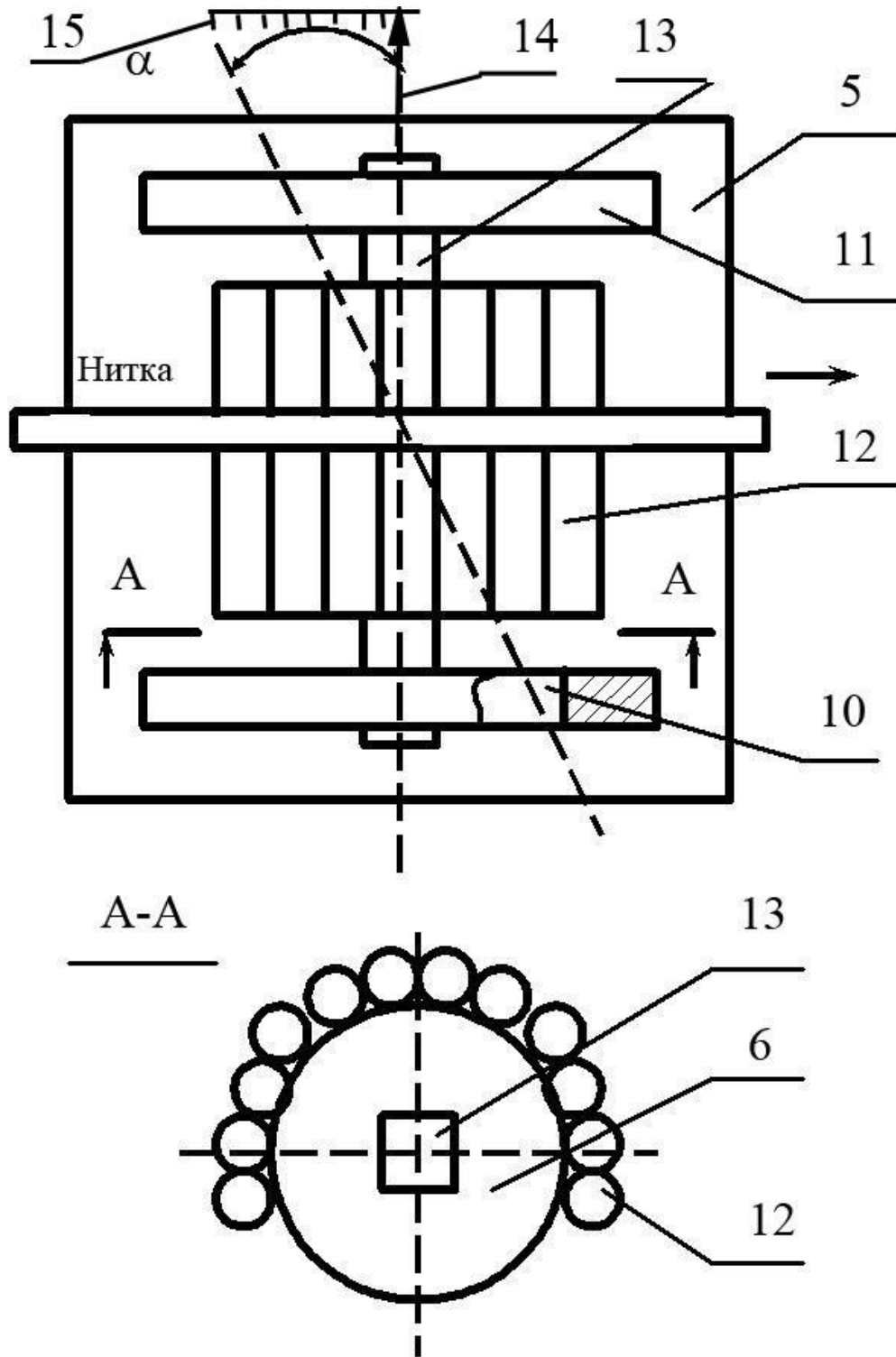


Рис.5.3.9. Схема вузла для визначення фрикційних властивостей нитки з урахуванням анізотропії (пристрої фіксації умовно не показані)

### Плани експериментальних досліджень

При проведенні експериментальних досліджень, нами було поставлено завдання щодо визначення впливу радіуса кривизни направляючої поверхні  $R$ , натягу веденої гілки  $P_0$ , кута охоплення  $\varphi$  на натяг величини коефіцієнта тертя ниток в подовжньому і поперечному напрямку в залежності від матеріалу ниток.

Для дослідження впливу матеріалу нитки на величину коефіцієнтів тертя в подовжньому і поперечному напрямках були обрані віскозна комплексна нитка 16,7 Текс, капронова комплексна нитка 31,2 Текс, бавовняна гребінна кручена пряжа 23,6 Текс, вовняна гребінна кручена пряжа 36 Текс.

Вибір даного асортименту, в першу чергу, пояснюється приблизно однаковим тексом ниток. Крім того, цей вид сировини широко використовується для виготовлення текстильних і трикотажних виробів [10, 12].

При вивченні анізотропії тертя текстильних ниток, нами було проведено дві серії дослідів (як змінюється величина коефіцієнта тертя при русі нитки в подовжньому і поперечному напрямках).

Відбір проб і лабораторні випробування за визначенням фізико-механічних властивостей (питомої розривного навантаження, відносного розривного подовження) ниток РМ-30-1. Швидкість розтягування нитки, відповідно до вимог, для одиночної і крученої пряжі з усіх видів волокон дорівнює  $10 \pm 1$  мм/с, для всіх хімічних ниток  $20 \pm 2$  мм/с. Відстань між зажимами розривної машини була однаковою  $500 \pm 1$  мм.

Перед випробуваннями з пакування відмотуємо 5 м нитки, між випробуваннями - 1м. Нитка заправлялася в затискачі з попереднім натягом. Питоме розривне навантаження і відносне розривне подовження



брали як середній показник 10 розривів нитки. Середнє арифметичне має укладатися в необхідні допуски.

Після визначення чинників, що впливають на збільшення натягу ведучої гілки нитки, обґрунтування і вибору сировини для випробувань, необхідно скласти план проведення експерименту.

Для кожної з ниток даним планом (таблиця 5.3.2) передбачається 15 дослідів. По кожному з дослідів передбачалося 3 повторних.

Вибір розмірів направляючої поверхні при проведенні експерименту, в пропонуваному діапазоні від 3 мм до 7 мм, пояснюється тим, що цей інтервал широко охоплює асортимент ниткопрямувачів, робочих органів текстильних і трикотажних машин.

Інтервал зміни величини натягу веденої гілки нитки від 5 до 15 сН був вибраний виходячи з умов переробки ниток на технологічному устаткуванні.

Кут обхвату направляючої поверхні, для кожного конкретного випадку, є величиною змінною. Зважаючи на специфіку переробки ниток на текстильному устаткуванні, де мають місце великі перегини ниток при взаємодії з робочими органами, нами був вибраний інтервал зміни від  $90^\circ$  до  $180^\circ$ .

У таблиці 5.3.2 наведений план проведення експерименту по визначенню впливу радіусу кривизни направляючої поверхні  $R$ , натягу веденої гілки  $P_0$ , кута обхвату  $\varphi$  на величину коефіцієнта тертя в подовжньому та поперечному напрямку ниток чотирьох видів при діапазоні зміни радіусу кривизни напрямної від 3 до 7 мм.

При плануванні експерименту, при побудові моделей другого порядку нами було використано ортогональне планування другого порядку. Хоча існують інші оптимальні плани, ортогональне планування використовувалося із-за достатньої простоти і можливості застосування вже розроблених пакетів програм на ЕОМ при обробки отриманих

експериментальних даних. Крім цього, при використанні ортогональних планів другого порядку, порівняно з рототабельним плануванням другого порядку, в центрі матриці експерименту проводиться менше дослідів.

У нульовій точці величина радіуса кривизни становила 5 мм. Натяг веденої гілки нитки становив 10 сН. Величина кута обхвату ниткою направляючої дорівнювала  $135^{\circ}$ .

Таблиця 5.3.2.

План проведення експерименту

Визначення коефіцієнта тертя в поздовжньому (поперечному) напрямках, kt							
№ варіанту	Досліджувані фактори						Характерні зони матриці
	x1	R	x2	Po	x3	$\varphi$	
i- 1	-1	R+h1	+1	Po+ h2	+1	$\varphi+ h3$	Точки ядра
i- 2	+1	R-h1	-1	Po+ h2	+1	$\varphi+ h3$	
i- 3	-1	R+h1	+1	Po- h2	-1	$\varphi+ h3$	
i- 4	+1	R-h1	+1	Po- h2	+1	$\varphi+ h3$	
i- 5	+1	R+h1	+1	Po+ h2	-1	$\varphi- h3$	
i- 6	+1	R-h1	-1	Po+ h2	-1	$\varphi- h3$	
i- 7	-1	R+h1	-1	Po- h2	-1	$\varphi- h3$	
i- 8	-1	R-h1	-1	Po- h2	+1	$\varphi- h3$	
i- 9	-1,215	R-*	0	Po	0	$\varphi$	Зіркові точки
i- 10	+1,215	R+*	0	Po	0	$\varphi$	
i- 11	0	R	-1,215	Po-*	0	$\varphi$	
i- 12	0	R	+1,215	Po+*	0	$\varphi$	
i- 13	0	R	0	Po	-1,215	$\varphi-*$	
i- 14	0	R	0	Po	+1,215	$\varphi+*$	
i- 15	0	R	0	Po	0	$\varphi$	Нульова точка

**Сумісний вплив радіусу кривизни направляючої, натягу веденої гілки, кута обхвату на величину коефіцієнту тертя в подовжньому напрямку руху нитки**

Реалізуюючи план експериментальних досліджень (табл.5.3.2) за визначенням впливу радіусу кривизни направляючої поверхні, натягу веденої гілки нитки, кута обхвату на величину коефіцієнта тертя в подовжньому напрямку руху нитки, нами були отримані ряд даних, представлених в таблиці 5.3.3.

Вище ми зупинялися на тих міркуваннях, які привели до вибору ортогонального плану. Останні вимоги застосування того або іншого плану, що пред'являються до оцінки ефективності, привели до того, що основними критеріями необхідно вважати: максимальну величину дисперсії передбачених значень критерію оптимізації в області експерименту; об'єм еліпсоїда розсіяння оцінок параметрів та ін.

При проведенні експерименту іменовані величини необхідно замінити на кодовані. В нашому випадку радіус кривизни напрямної  $R$  позначимо через  $x1$ . В нульовій точці радіус кривизни дорівнював 3 мм. Довжина плеча складала 2 мм. Натяг веденої гілки нитки  $P_o$  позначимо через  $x2$ . В нульовій точці натяг веденої гілки нитки дорівнює 10 сН. Довжина плеча складала 5 сН. Кут охоплення ниткою напрямної  $\varphi$  позначимо через  $x3$ . В нульовій точці кут охоплення ниткою напрямної дорівнює  $3\pi/4$ рад. Довжина плеча складала  $\pi/4$ рад.

Тоді система рівнянь для переходу від іменованих до кодованих значень чинників буде мати вигляд

$$x1 = \frac{(R-3)}{2}, \quad x2 = \frac{P_o-10}{5}, \quad x3 = \frac{\varphi - \frac{3\pi}{4}}{\frac{\pi}{4}}. \quad (5.3.10)$$

Таблиця 5.3.3

Сумісний вплив радіусу кривизни направляючої, натягу веденої гілки, кута обхвату на величину коефіцієнту тертя в подовжньому напрямку руху  
НИТКИ

Поздовжнє ковзання							
Варіант	Коефіцієнт тертя, kt	Варіант	Коефіцієнт тертя, kt	Варіант	Коефіцієнт тертя, kt	Варіант	Коефіцієнт тертя, kt
1- 1	0,146	2-1	0,131	3- 1	0,115	4- 1	0,151
1- 2	0,184	2- 2	0,164	3- 2	0,137	4- 2	0,169
1- 3	0,158	2- 3	0,144	3- 3	0,122	4- 3	0,151
1- 4	0,161	2- 4	0,145	3- 4	0,124	4- 4	0,158
1- 5	0,168	2- 5	0,151	3- 5	0,131	4- 5	0,167
1- 6	0,190	2- 6	0,170	3- 6	0,150	4- 6	0,181
1- 7	0,171	2- 7	0,154	3- 7	0,133	4- 7	0,172
1- 8	0,166	2- 8	0,149	3- 8	0,127	4- 8	0,166
1- 9	0,153	2- 9	0,137	3- 9	0,119	4- 9	0,154
1- 10	0,170	2- 10	0,152	3- 10	0,135	4- 10	0,168
1- 11	0,179	2- 11	0,158	3- 11	0,141	4- 11	0,175
1- 12	0,158	2- 12	0,139	3- 12	0,120	4- 12	0,154
1- 13	0,170	2- 13	0,152	3- 13	0,132	4- 13	0,170
1- 14	0,163	2- 14	0,147	3- 14	0,125	4- 14	0,162
1- 15	0,163	2- 15	0,148	3- 15	0,127	4- 15	0,162

На рис.5.3.10 представлена поверхня відгуку для капронової нитки.

Рівняння регресії для капронової нитки буде мати вигляд

$$kt = 0,163 + 0,007x_1 - 0,009x_2 - 0,0035x_3 - 0,0007x_1^2 - 0,0015x_1x_2 + 0,0005x_1x_3 + 0,0035x_2^2 - 0,001x_2x_3 + 0,0023x_3^2. \quad (5.3.11)$$

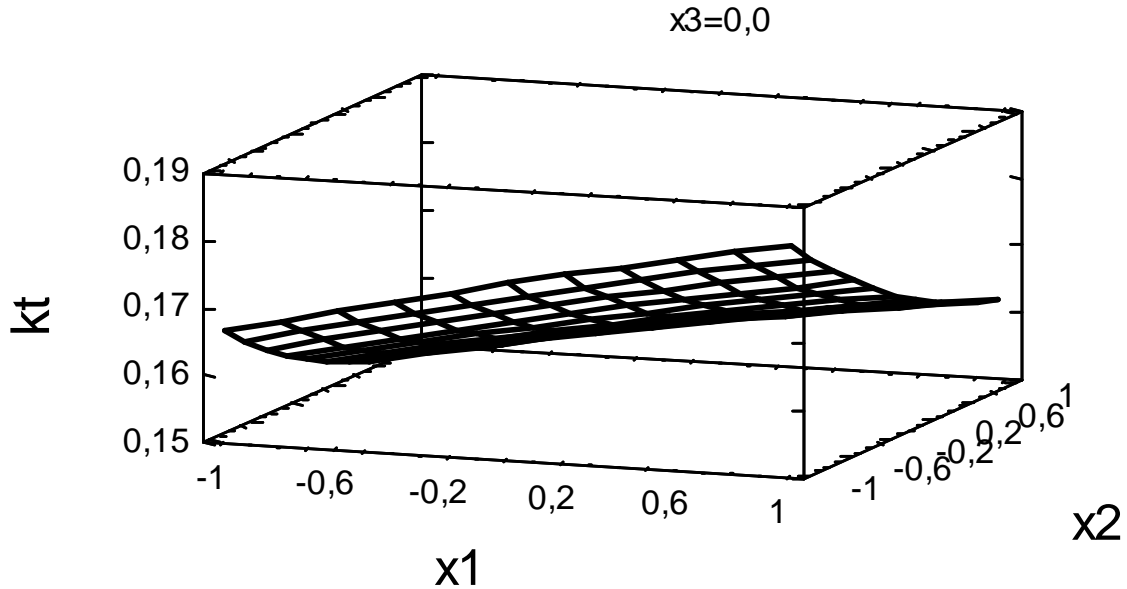


Рис.5.3.10. Поверхня відгуку

В результаті оцінки значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (5.3.11) отримаємо відповідну діаграму, яка представлена на рис.5.3.11. Аналіз даної діаграми показує, що не значущими коефіцієнтами будуть коефіцієнти при наступних комбінаціях:  $x_1x_3$ ,  $x_2x_3$ ,  $x_1^2$ .

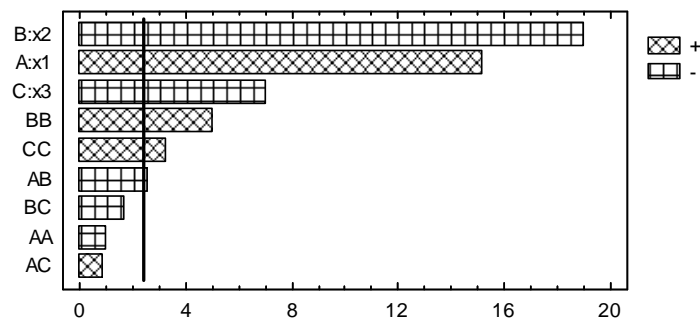


Рис.5.3.11. Діаграма значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії

З урахуванням значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (5.3.11), а також з урахуванням системи (5.3.10), перейдемо до іменованих значень, остаточно отримаємо

$$kt = 0,207 - 0,0007P_0 + 0,011R - 0,047\phi - 0,0000P_0^2 + 0,008\phi^2 - 0,0003P_0R. \quad (5.3.12)$$

На рис.5.3.12 представлена поверхня відгуку для віскозної комплексної нитки. Рівняння регресії для віскозної комплексної нитки буде мати вигляд

$$kt = 0,146 + 0,006x_1 - 0,0079x_2 - 0,0032x_3 - 0,0005x_1^2 - 0,0013x_1x_2 + 0,00075x_1x_3 + 0,0019x_2^2 - 0,001x_2x_3 + 0,0026x_3^2. \quad (5.3.13)$$

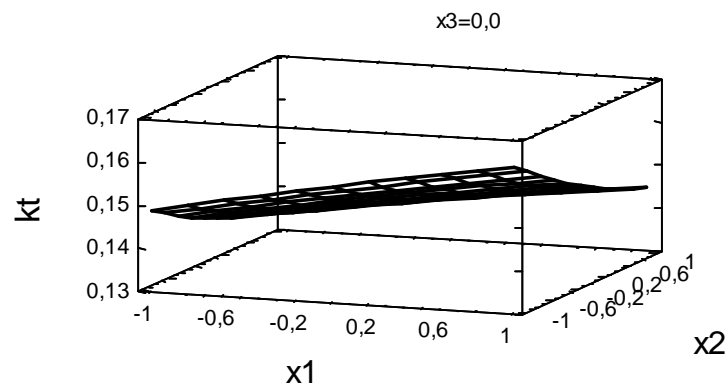


Рис.5.3.12. Поверхня відгуку

В результаті оцінки значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (5.3.13) отримаємо відповідну діаграму, яка представлена на рис.5.3.13. Аналіз даної діаграми показує, що не значущими коефіцієнтами будуть коефіцієнти при наступних комбінаціях:  $x_1x_3$ ,  $x_2x_3$ ,  $x_1x_2$ ,  $x_2^2$ ,  $x_1^2$ .

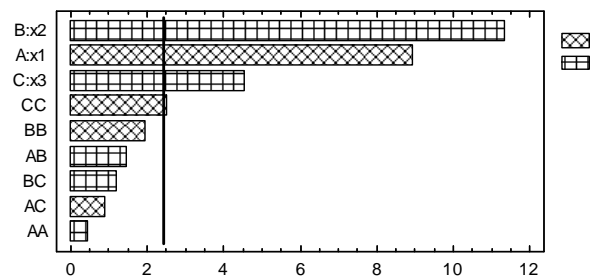


Рис.5.3.13. Діаграма значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії

З урахуванням значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (5.3.13), а також з урахуванням системи (5.3.10), перейдемо до іменованих значень, остаточно отримаємо

$$kt = 0,209 - 0,0032P_0 + 0,0065R - 0,046\phi + 0,008\phi^2. \quad (5.3.14)$$

На рис.5.3.14 представлена поверхня відгуку для вовняної пряжі. Рівняння регресії для вовняної пряжі буде мати вигляд

$$kt = 0,127 + 0,0058x_1 - 0,0073x_2 - 0,0037x_3 - 0,00006x_1^2 - 0,0011x_1x_2 - 0,00088x_1x_3 + 0,0021x_2^2 + 0,0006x_2x_3 + 0,00084x_3^2. \quad (5.3.15)$$

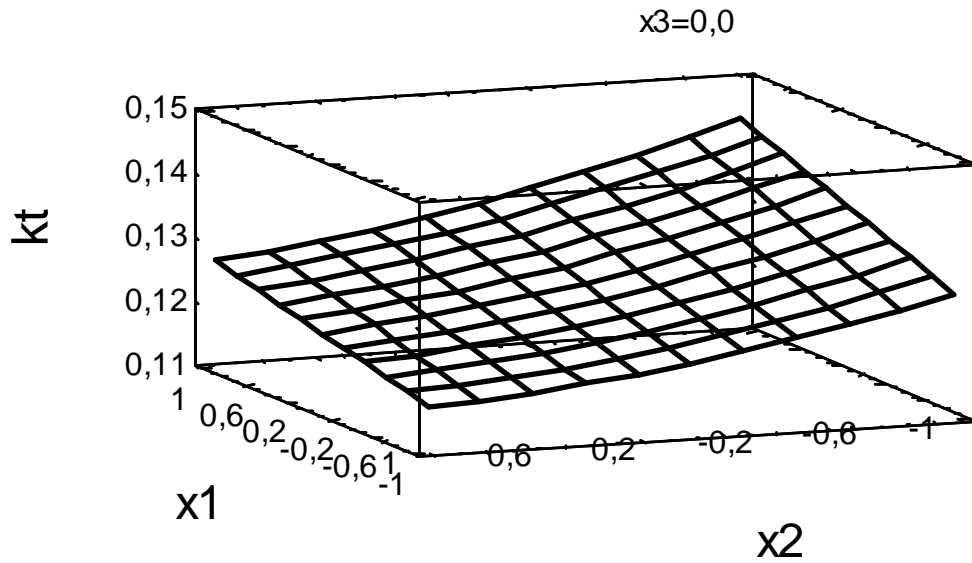


Рис.5.3.15.3. Поверхня відгуку

В результаті оцінки значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (5.3.15) отримаємо відповідну діаграму, яка представлена на рис.5.3.15. Аналіз даної діаграми показує, що не значущими коефіцієнтами будуть коефіцієнти при наступних комбінаціях:  $x_1x_3$ ,  $x_2x_3$ ,  $x_1x_2$ ,  $x_3^2$ ,  $x_1^2$ .

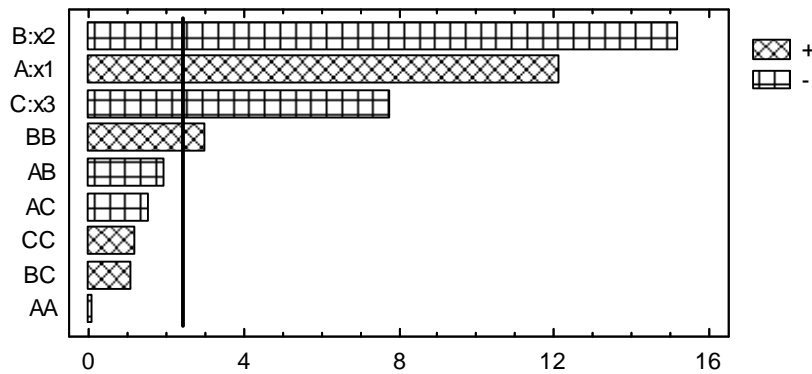


Рис.5.3.15. Діаграма значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії

З урахуванням значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (5.3.15), а також з урахуванням системи (5.3.10), перейдемо до іменованих значень, остаточно отримаємо

$$kt = 0,164 - 0,0062P_0 + 0,006R - 0,0089\phi + 0,0002P_0^2. \quad (5.3.16)$$

На рис.5.3.16 представлена поверхня відгуку для бавовняної пряжі. Рівняння регресії для бавовняної пряжі буде мати вигляд

$$kt = 0,162 + 0,0049x_1 - 0,0078x_2 - 0,0033x_3 - 0,001x_1^2 + 0,0014x_1x_2 - 0,0019x_1x_3 + 0,0011x_2^2 + 0,0011x_2x_3 + 0,002x_3^2. \quad (5.3.17)$$

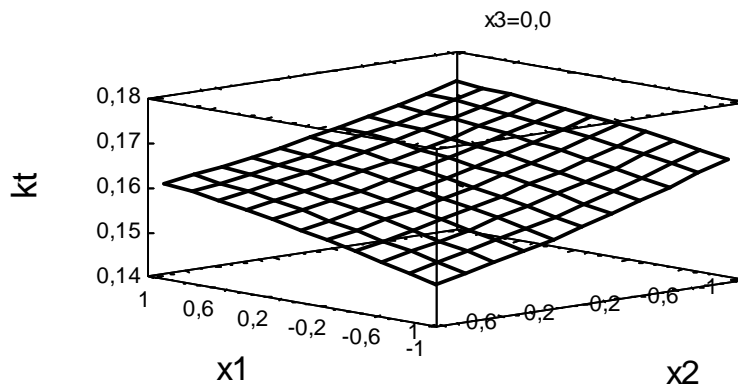


Рис.5.3.16. Поверхня відгуку

В результаті оцінки значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (5.3.17) отримаємо відповідну діаграму, яка представлена на рис.5.3.15. Аналіз даної діаграми показує, що не значущих коефіцієнтів немає.

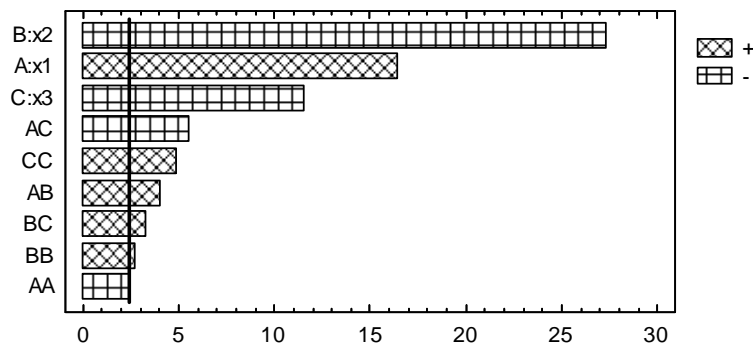


Рис.5.3.15. Діаграма значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії

З урахуванням значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (5.3.17), а



також з урахуванням системи (5.3.10), перейдемо до іменованих значень, остаточно отримаємо

$$kt = 0,28 - 0,0075P_0 + 0,00075R - 0,057\phi + 0,00008P_0^2 - 0,0005R^2 + 0,0064\phi^2 + 0,000275P_0R + 0,00057\phi + 0,0025R\phi. \quad (5.3.18)$$

Розрахунки по формулам (5.3.12), (5.3.14), (5.3.16), (5.3.18) дозволили отримати масив даних (дивись додаток А), використовуючи який були побудовані графічні залежності представлені на рис.5.3.18-5.3.20.

Аналіз графічних залежностей на рис.5.3.18-5.3.20 показав, що при збільшенні радіусу кривизни напрямної коефіцієнт тертя в подовжньому напрямку руху нитки зростає. Для бавовняної пряжі після 5 мм починається його зменшення, що може бути пов'язано зі зміною структури нитки. При збільшенні натягу веденої гілки (рис.5.3.19) та кута обхвату (рис.5.3.20) простежується зворотня картина. Коефіцієнту тертя в подовжньому напрямку руху нитки при зростанні цих величин починає падати. Це пояснюється тим, що окремі мікрОВОлокна в структурі нитки чи пряжі приймають форму близьку до прямої форми осі [10, 12]. Ці результати необхідно враховувати при проектуванні технологічних процесів легкої та текстильної промисловості.

### **Сумісний вплив радіусу кривизни направляючої, натягу веденої гілки, кута обхвату на величину коефіцієнту тертя в поперечному напрямі руху нитки**

Реалізуючи план експериментальних досліджень (табл.5.3.2) за визначенням впливу радіусу кривизни направляючої поверхні, натягу веденої гілки нитки, кута обхвату на величину коефіцієнту тертя в поперечному напрямі руху нитки, нами були отримані ряд даних, представлених в таблиці 5.3.5.3.

При проведенні експерименту іменовані величини необхідно замінити

на кодовані. В нашому випадку радіус кривизни напрямної  $R$  позначимо через  $x1$ . В нульовій точці радіус кривизни дорівнював 5 мм. Довжина плеча складала 2 мм. Натяг веденої гілки нитки  $Po$  позначимо через  $x2$ . В нульовій точці натяг веденої гілки нитки дорівнює 10 сН. Довжина плеча складала 5 сН. Кут охоплення ниткою напрямної  $\varphi$  позначимо через  $x3$ .

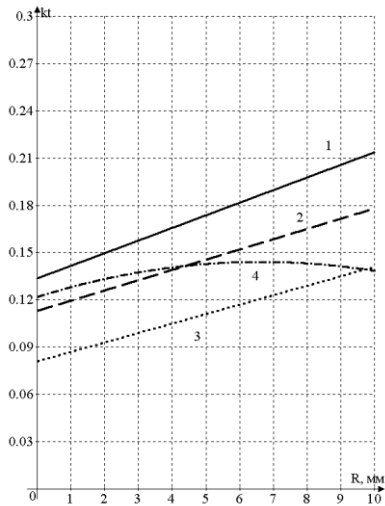


Рис.5.3.18. Залежність коефіцієнту тертя в подовжньому напрямку руху нитки від радіусу кривизни

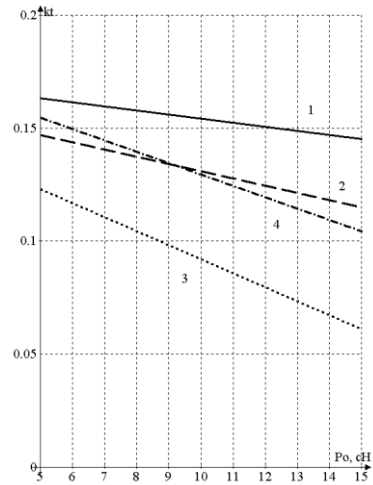


Рис.5.3.19. Залежність коефіцієнту тертя в подовжньому напрямку руху нитки від натягу веденої гілки нитки

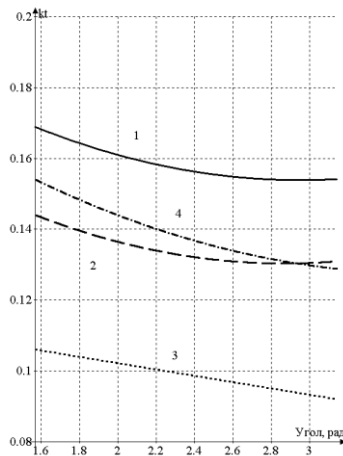


Рис.5.3.20. Залежність коефіцієнту тертя в подовжньому напрямку руху нитки від кута обхвату

В нульовій точці кут охоплення ниткою напрямної дорівнює  $3\pi/4$ рад. Довжина плеча складала  $\pi/4$ рад. Система рівнянь для переходу від іменованих до кодованих значень чинників буде мати вигляд (5.3.10).

Таблиця 5.3.4

Сумісний вплив радіусу кривизни направляючої, натягу веденої гілки, кута обхвату на величину коефіцієнту тертя в поперечному напрямі руху нитки

Поздовжнє ковзання							
Варіант	Коефіцієнт тертя, kt	Варіант	Коефіцієнт тертя, kt	Варіант	Коефіцієнт тертя, kt	Варіант	Коефіцієнт тертя, kt
1- 1	0,281	2-1	0,219	3- 1	0,210	4- 1	0,247
1- 2	0,265	2- 2	0,225	3- 2	0,187	4- 2	0,241
1- 3	0,275	2- 3	0,215	3- 3	0,203	4- 3	0,241
1- 4	0,305	2- 4	0,235	3- 4	0,228	4- 4	0,254
1- 5	0,295	2- 5	0,221	3- 5	0,218	4- 5	0,249
1- 6	0,248	2- 6	0,222	3- 6	0,179	4- 6	0,235
1- 7	0,234	2- 7	0,205	3- 7	0,165	4- 7	0,228
1- 8	0,249	2- 8	0,208	3- 8	0,176	4- 8	0,233
1- 9	0,261	2- 9	0,202	3- 9	0,190	4- 9	0,219
1- 10	0,290	2- 10	0,216	3- 10	0,211	4- 10	0,235
1- 11	0,259	2- 11	0,203	3- 11	0,185	4- 11	0,217
1- 12	0,294	2- 12	0,218	3- 12	0,209	4- 12	0,236
1- 13	0,261	2- 13	0,201	3- 13	0,188	4- 13	0,220
1- 14	0,285	2- 14	0,215	3- 14	0,212	4- 14	0,234
1- 15	0,274	2- 15	0,209	3- 15	0,197	4- 15	0,225

На рис.5.3.21 представлена поверхня відгуку для капронової комплексної нитки. Рівняння регресії для капронової комплексної нитки

буде мати вигляд

$$kt = 0,277 + 0,0098x_1 + 0,018x_2 + 0,0069x_3 - 0,002x_1^2 + 0,0018x_1x_2 + 0,0008x_1x_3 - 0,0014x_2^2 - 0,002x_2x_3 - 0,0035x_3^2. \quad (5.3.19)$$

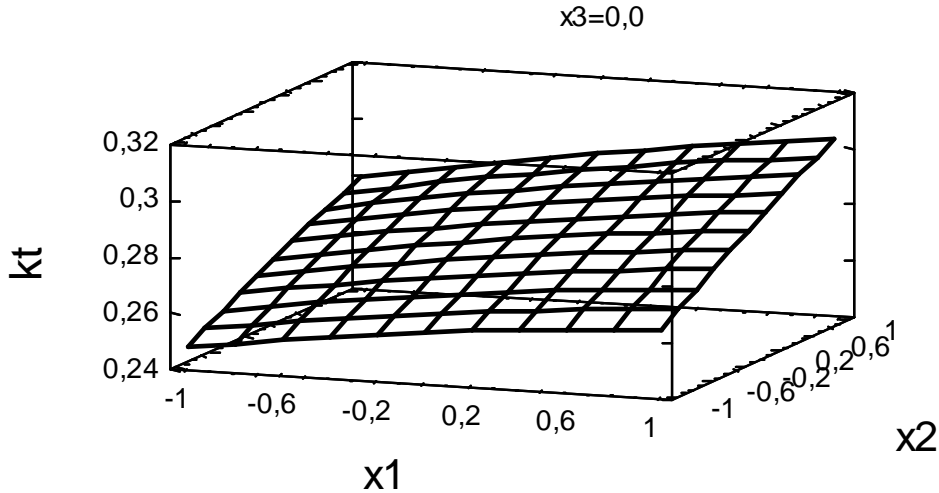


Рис.5.3.21. Поверхня відгуку

В результаті оцінки значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (5.3.19) отримаємо відповідну діаграму, яка представлена на рис.5.3.22. Аналіз даної діаграми показує, що не значущими коефіцієнтами будуть коефіцієнти при наступних комбінаціях:  $x_1x_3$ ,  $x_2x_3$ ,  $x_1x_2$ ,  $x_3^2$ ,  $x_2^2$ ,  $x_1^2$ .

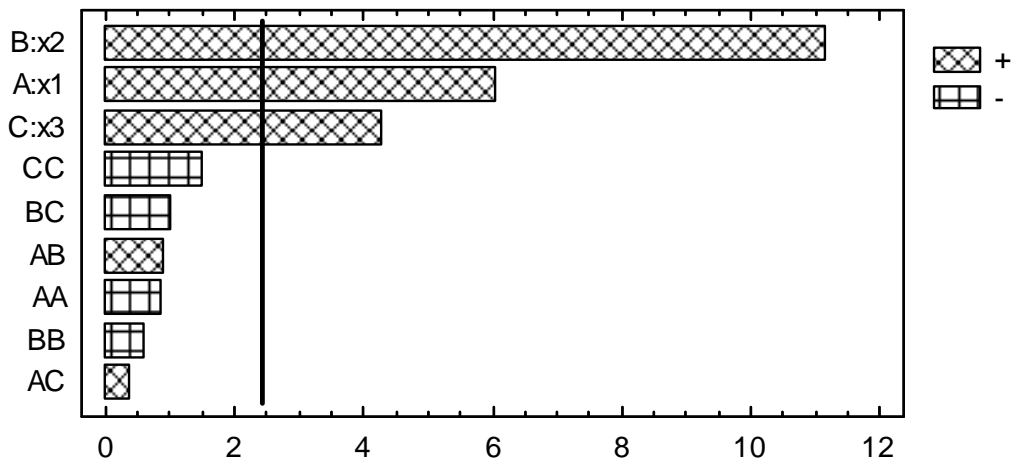


Рис.5.3.22. Діаграма значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії

З урахуванням значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (5.3.19), а

також з урахуванням системи (5.3.10), перейдемо до іменованих значень, остаточно отримаємо

$$kt = 0,134 + 0,0072P_0 + 0,0095R + 0,018\phi. \quad (5.3.20)$$

На рис.5.3.23 представлена поверхня відгуку для віскозної комплексної нитки. Рівняння регресії для віскозної комплексної нитки буде мати вигляд

$$kt = 0,205 + 0,0065x_1 + 0,0044x_2 + 0,0037x_3 + 0,004x_1^2 - 0,0015x_1x_2 + 0,00125x_1x_3 + 0,0049x_2^2 + 0,0015x_2x_3 + 0,0034x_3^2. \quad (5.3.21)$$

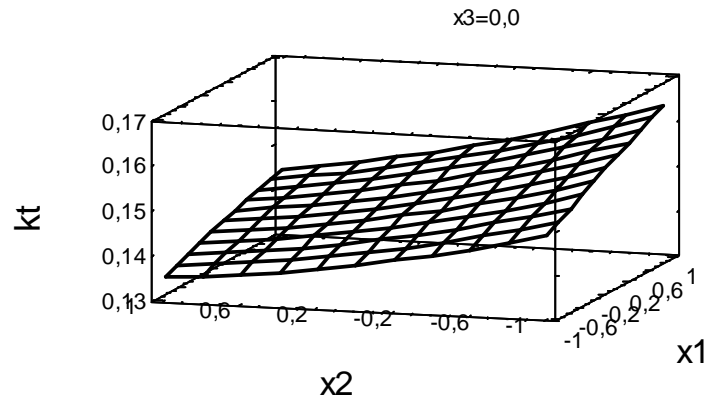


Рис.5.3.23. Поверхня відгуку

В результаті оцінки значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (5.3.21) отримаємо відповідну діаграму, яка представлена на рис.5.3.25.3. Аналіз даної діаграми показує, що не значущими коефіцієнтами будуть коефіцієнти при наступних комбінаціях:  $x_1x_3$ ,  $x_2x_3$ ,  $x_1x_2$ ,  $x_2^2$ ,  $x_1^2$ .

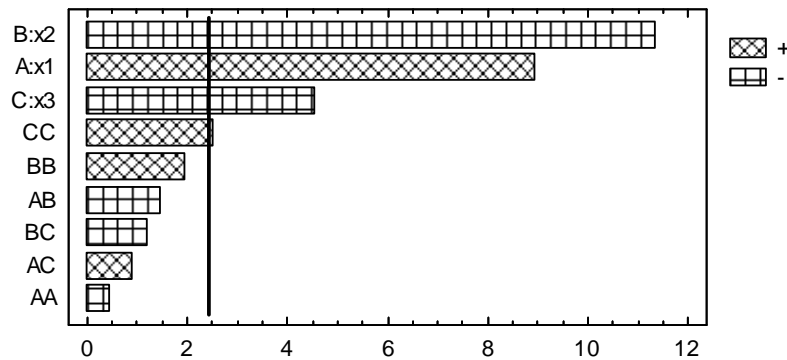


Рис.5.3.25.3. Діаграма значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії

З урахуванням значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (5.3.21), а також з урахуванням системи (5.3.10), перейдемо до іменованих значень, остаточно отримаємо

$$kt = 0,183 - 0,0054P_0 + 0,0065R + 0,0089\phi + 0,00036P_0^2. \quad (5.3.22)$$

На рис.5.3.25 представлена поверхня відгуку для вовняної пряжі. Рівняння регресії для вовняної пряжі буде мати вигляд

$$kt = 0,199 + 0,0075x_1 + 0,016x_2 + 0,0059x_3 - 0,00009x_1^2 + 0,001x_1x_2 + 0,00000125x_1x_3 - 0,0022x_2^2 - 0,00025x_2x_3 - 0,00039x_3^2. \quad (5.3.23)$$

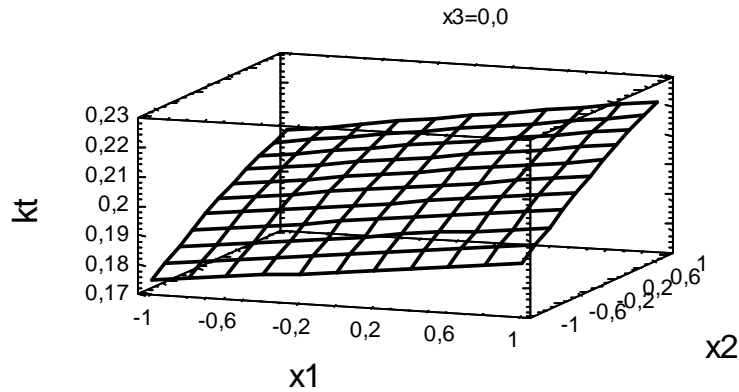


Рис.5.3.25. Поверхня відгуку

В результаті оцінки значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (5.3.23) отримаємо відповідну діаграму, яка представлена на рис.5.3.26. Аналіз даної діаграми показує, що не значущими коефіцієнтами будуть коефіцієнти при наступних комбінаціях:  $x_1x_3$ ,  $x_2x_3$ ,  $x_1x_2$ ,  $x_3^2$ ,  $x_2^2$ ,  $x_1^2$ .

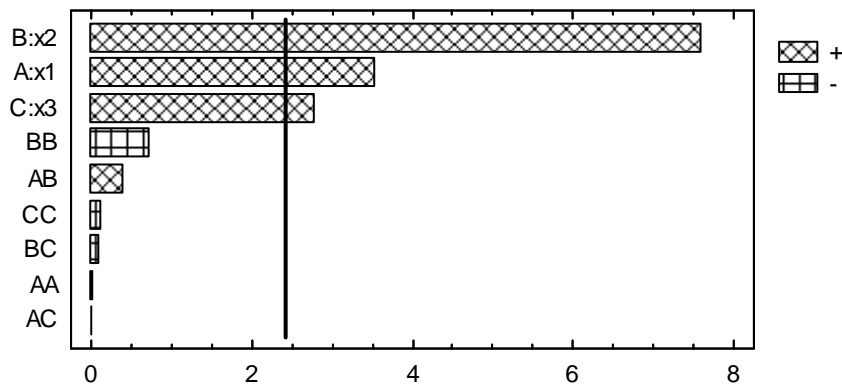


Рис.5.3.26. Діаграма значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії

З урахуванням значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (5.3.23), а також з урахуванням системи (5.3.10), перейдемо до іменованих значень, остаточно отримаємо

$$kt = 0,0765 + 0,0064P_0 + 0,0075R + 0,015\phi. \quad (5.3.24)$$

На рис.5.3.27 представлена поверхня відгуку для бавовняної пряжі. Рівняння регресії для бавовняної пряжі буде мати вигляд

$$kt = 0,219 + 0,0045x_1 + 0,0069x_2 + 0,0035x_3 + 0,0066x_1^2 + 0,0000001x_1x_2 + 0,00000001x_1x_3 + 0,0063x_2^2 + 0,00000001x_2x_3 + 0,0066x_3^2. \quad (5.3.25)$$

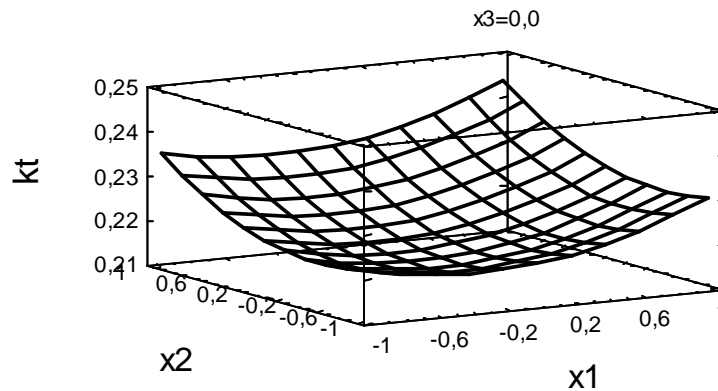


Рис.5.3.25. Поверхня відгуку

В результаті оцінки значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (5.3.25) отримаємо відповідну діаграму, яка представлена на рис.5.3.28. Аналіз даної діаграми показує, що не значущими коефіцієнтами будуть коефіцієнти при наступних комбінаціях:  $x_1x_3$ ,  $x_2x_3$ ,  $x_1x_2$ ,  $x_3^2$ .

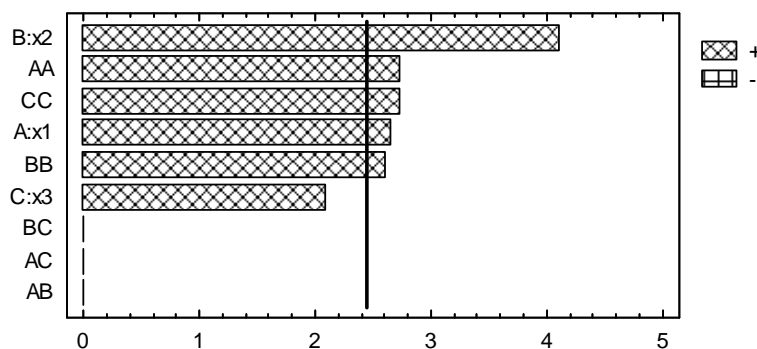


Рис.5.3.28. Діаграма значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії

З урахуванням значущості коефіцієнтів в рівнянні регресії (5.3.25), а також з урахуванням системи (5.3.10), перейдемо до іменованих значень, остаточно отримаємо

$$kt = 0,376 - 0,0076P_0 - 0,015R - 0,099\phi + 0,00052P_0^2 + 0,0033R^2 + 0,021\phi^2. \quad (5.3.26)$$

Розрахунки по формулам (5.3.20), (5.3.22), (5.3.24), (5.3.26) дозволили отримати масив даних (дивись додаток А), використовуючи який були побудовані графічні залежності представлені на рис.5.3.29-5.3.31.

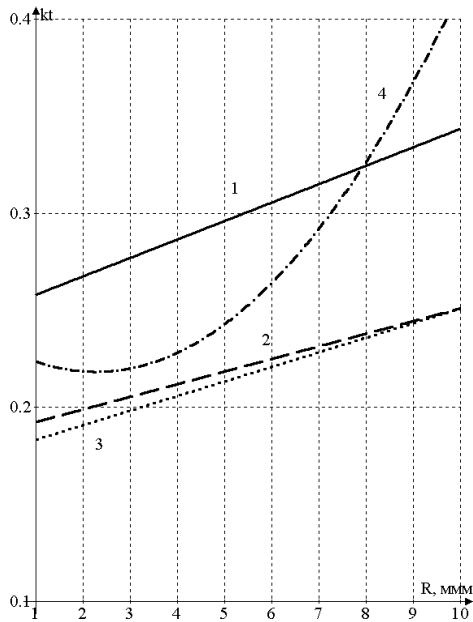
Аналіз графічних залежностей на рис.5.3.29-5.3.31 показав, що при збільшенні радіусу кривизни напрямної, натягу веденої гілки (рис.5.3.30) та кута обхвату (рис.5.3.31) коефіцієнт тертя в подовжньому напрямку руху нитки зростає. Це пояснюється тим, що окремі мікрОВОлокна в структурі нитки чи пряжі займають таке положення, при якому їх вісь буде перпендикулярна до вектора швидкості [10- 14]. Ці результати необхідно враховувати при проектуванні технологічних процесів легкої та текстильної промисловості.

#### **5.4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТРИКОТАЖНОГО ТА ТКАЦЬКОГО ВИРОБНИЦТВА З УРАХУВАННЯМ АНІЗОТРОПІЇ ТЕРТЯ НИТОК**

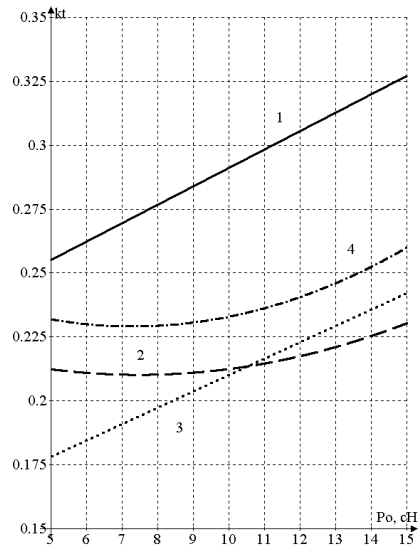
Поперечне ковзання ниток зустрічається в багатьох технологічних процесах текстильної і трикотажної промисловості [1-12].

Поперечне ковзання ниток по напрямних з постійною кривиною поверхні має місце при формуванні елемента тканини, при взаємодії ниток з напрямними органами трикотажних та текстильних машин.

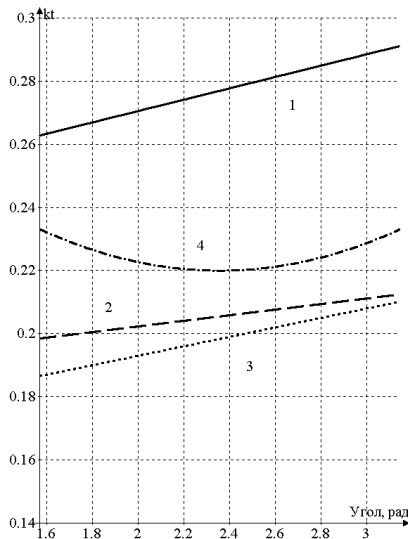




5.3.29. Залежність коефіцієнту тертя в поперечному напрямку руху нитки від радіусу кривизни



5.3.30. Залежність коефіцієнту тертя в поперечному напрямку руху нитки від натягу веденої гілки нитки



5.3.31. Залежність коефіцієнту тертя в поперечному напрямку руху нитки від кута обхвату

Визначення натягу та форми вісі, з урахуванням матеріалу та анізотропії фрикційних властивостей ниток, дозволяє на початковому

періоді проектування технологічних процесів обрати їх оптимальні параметри. Таким чином, тема даної статті є актуальною, яка має важливе значення для удосконалення технологічних процесів текстильної та трикотажної промисловості.

Удосконалення технологічних процесів легкої та текстильної промисловості, як об'єктів дослідження, повинно базуватися на комплексних дослідженнях процесу взаємодії ниток з напрямними поверхнями малої кривини. Отримання теоретичних залежностей дозволить отримати рівняння для визначення натягу та форми вісі нитки з урахуванням матеріалу та анізотропії її фрикційних властивостей в зоні формування тканини та трикотажу, зменшити відсоток обривів ниток, поліпшити якість готової продукції [38-41].

### **Визначення впливу будови поверхонь робочих органів трикотажних і текстильних машин на форму і натяг ниток**

Будова поверхонь робочих органів трикотажних і текстильних машин (рис.5.4.1), а також самих ниток (рис.5.4.2) свідчать про те, що величина сили тертя в ортогональних напрямках (наприклад дотичній і нормалі до точки на осі нитки) відрізнятимуться. Це дозволяє говорити про необхідність врахування анізотропії фрикційних властивостей [10-12].

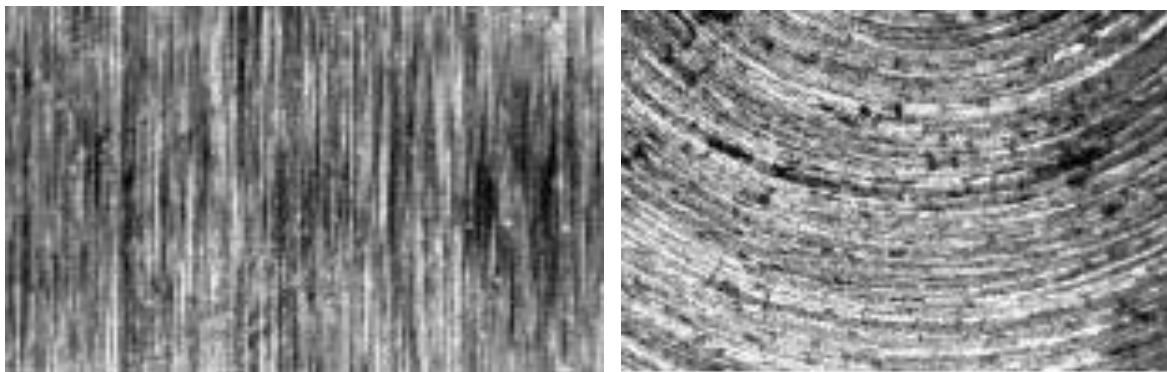


Рис.5.4.1. Будова поверхні робочих органів

У загальному випадку величина сили тертя визначається з виразу [10]

$$F = N\sqrt{k_1^2 + k_2^2}, \quad (5.4.1)$$

де  $F$  - сила тертя;

$N$  - сила нормального тиску;

$\sqrt{k_1^2 + k_2^2}$  - ефективний коефіцієнт тертя [1,10,12].

Для розкриття його суті представимо силу тертя як функцію швидкості

$$\vec{F} = -\frac{NA\vec{v}}{v}, \quad (5.4.2)$$

де  $A$  - матриця, яка задає лінійне переміщення;

$v$  - швидкість точки на осі нитки.

Для двох ортогональних напрямів (дотична і нормаль) вираз для даної матриці матиме вигляд

$$A = \begin{pmatrix} \mu_1 \cos \varphi & 0 \\ 0 & \mu_2 \sin \varphi \end{pmatrix}, \quad (5.4.3)$$

де  $\mu_1, \mu_2$  - коефіцієнти тертя нитки в двох ортогональних напрямках [10-15];

$\varphi$  - кут, який утворює вектор швидкості з дотичної до осі нитки.

Тоді ефективний коефіцієнт тертя визначимо по формулі

$$\sqrt{k_1^2 + k_2^2} = \sqrt{\mu_1^2 \cos^2 \varphi + \mu_2^2 \sin^2 \varphi}. \quad (5.4.4)$$



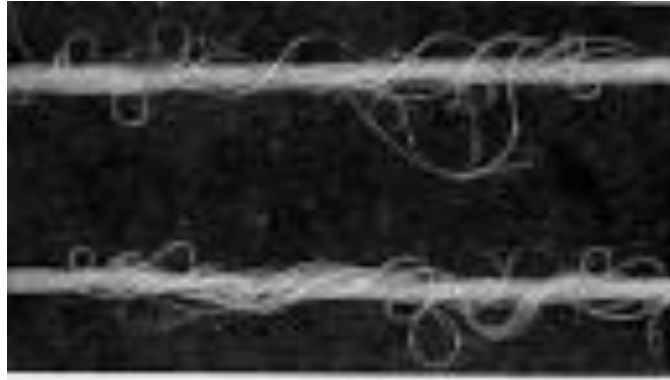


Рис.5.4.2. Будова комплексних ниток та пряжі

Для теоретичного дослідження впливу матеріалу нитки і анізотропії тертя на натяг і форму її осі були вибрані віскозна комплексна нитка 16,7 Текс, капронова комплексна нитка 31,2 Текс, бавовняна гребінна кручена пряжа 23,6 Текс, шерстяна гребінна кручена пряжа 36 Текс.

Вибір даного асортименту, в першу чергу, пояснюється приблизно однаковим тексом ниток. Крім того, даний вид сировини широко використовується для виготовлення текстильних і трикотажних виробів. За наслідками експериментальних досліджень коефіцієнти тертя в подовжньому і поперечному напрямках для даного виду сировини відповідно дорівнювали: віскозна комплексна нитка  $\mu_1 = 0,16$ ,  $\mu_2 = 0,21$ ; капронова комплексна нитка  $\mu_1 = 0,18$ ,  $\mu_2 = 0,24$ ; бавовняна гребінна кручена пряжа  $\mu_1 = 0,17$ ,  $\mu_2 = 0,22$ ; шерстяна гребінна кручена пряжа  $\mu_1 = 0,14$ ,  $\mu_2 = 0,18$ .

### **Визначення сили прибою для одношарових тканин в залежності від щільності по основі та з урахуванням анізотропії основи та утоку**

Сила прибою є основним технологічним параметром, що визначає напруженість процесу формування тканини [16, 17]. На рис.5.4.3 представлена розрахункова для визначення величини кута охоплення

основної нитки уточної. Половина кута охоплення визначатиметься за формулою

$$\beta = \arcsin\left(\frac{do\Pi_O}{100}\right), \quad (5.4.5)$$

де  $\beta$  - половина кута охоплення основної нитки уточної;

$do$  - розрахунковий діаметр основної нитки;

$\Pi_O$  - щільність тканини по основі, н/дм.

У процесі прибою вигнута уточнююча нитка ковзає по поверхні основних ниток. Виникаючий при цьому опір буде визначати величину сили прибою. При цьому, можна вважати, що утоки нитки будуть розташовуватися в площині, нахиленої до твірної циліндричної поверхні основної нитки під кутом

$$\gamma = \arctan\left(\frac{1}{\mu_2}\right). \quad (5.4.6)$$

де  $\mu_2$  - коефіцієнт тертя уточної нитки по поверхні основної в поперечному напрямку.

Для дослідження процесу прибою будемо використовувати циліндричну систему координат [107, 108]. Для спрощення будемо вважати, що основні і утокові нитки мають циліндричну форму. Тоді основні співвідношення між циліндричними координатами будуть мати вигляд

$$r = r_0 + r_y, \quad r \frac{d\varphi}{ds} = \sin \gamma, \quad (5.4.7)$$

$$\frac{dz}{ds} = \cos \gamma,$$

де  $r_0, r_y$  - розрахункові радіуси поперечного перетину основної і уточної нитки;

$\varphi$  - центральний кут, який визначає положення радіуса  $r$  в перетині основної нитки;

$z$  - координата, що визначає положення поточної точки на осі уточної нитки щодо осі основної нитки;

$s$  - дугова координата.

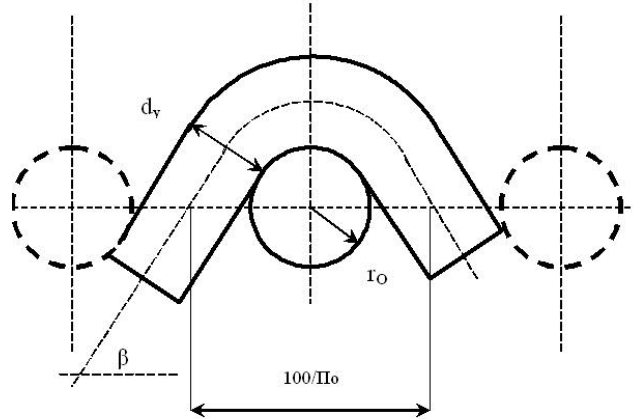


Рис.5.4.3. Розрахунковим схема

Основна система диференціальних рівнянь, що описують рівновагу уточної нитки на поверхні основи (див. розділ 2), з урахуванням (5.4.4), буде мати вигляд [1-14]

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds} \left( P \frac{dr}{ds} \right) - Pr \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 + N &= 0, \\ \frac{d}{ds} \left( Pr \frac{d\varphi}{ds} \right) &= 0, \\ \frac{d}{ds} \left( P \frac{dz}{ds} \right) - \sqrt{\mu_1^2 \cos^2 \gamma + \mu_2^2 \sin^2 \gamma} N &= 0, \\ \left( \frac{dr}{ds} \right)^2 + r^2 \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 + \left( \frac{dz}{ds} \right)^2 &= 1, \end{aligned} \tag{5.4.8}$$

де  $P$  - натяг нитки, Н;

$N$  - нормальна реакція поверхні, Н.

Враховуючи, що в якості направляючої поверхні був обраний циліндр ( $r = const$ ), система диференціальних рівнянь (5.4.8), з урахуванням (5.4.5) - (5.4.7), прийме вигляд

$$\begin{aligned}
 -Pr\left(\frac{d\varphi}{ds}\right)^2 + N &= 0, \\
 \frac{d}{ds}\left(Pr\frac{d\varphi}{ds}\right) &= 0, \\
 \frac{d}{ds}\left(P\frac{dz}{ds}\right) - \sqrt{\mu_1^2 \cos^2 \gamma + \mu_2^2 \sin^2 \gamma} N &= 0, \\
 r^2\left(\frac{d\varphi}{ds}\right)^2 + \left(\frac{dz}{ds}\right)^2 &= 1.
 \end{aligned} \tag{5.4.9}$$

Підставимо в останню систему диференціальних рівнянь (5.4.9) вираження (5.4.7), отримаємо

$$\begin{aligned}
 -Pr\left(\frac{\sin \gamma}{r}\right)^2 + N &= 0, \\
 \frac{d}{ds}(P \sin \gamma) &= 0, \\
 \frac{d}{ds}(P \cos \alpha) - \sqrt{\mu_1^2 \cos^2 \gamma + \mu_2^2 \sin^2 \gamma} N &= 0.
 \end{aligned} \tag{5.4.10}$$

Перетворимо систему диференціальних рівнянь (5.4.10) до виду

$$\begin{aligned}
 N &= Pr\left(\frac{\sin \gamma}{r}\right)^2, \\
 \frac{d}{ds}(P \sin \gamma) &= 0, \\
 \frac{d}{ds}(P \cos \gamma) &= \sqrt{\mu_1^2 \cos^2 \gamma + \mu_2^2 \sin^2 \gamma} N.
 \end{aligned} \tag{5.4.11}$$

Підставляємо з першого рівняння системи диференціальних рівнянь (5.4.9) значення нормальної реакції поверхні в третє рівняння, отримаємо

$$\cos \alpha \frac{dP}{ds} = P \frac{\sin^2 \alpha}{r} \sqrt{\mu_1^2 \cos^2 \gamma + \mu_2^2 \sin^2 \gamma}.$$

Перетворимо останнє диференціальне рівняння до виду

$$\frac{dP}{P} = \frac{\sin^2 \alpha}{r \cos \alpha} \sqrt{\mu_1^2 \cos^2 \gamma + \mu_2^2 \sin^2 \gamma} ds.$$

Останнє диференціальне рівняння є диференціальним рівнянням із розділюваними перемінними. Зінтегруємо його

$$\begin{aligned}
 \frac{dP}{P} &= \frac{\sin^2 \alpha}{r \cos \alpha} \sqrt{\mu_1^2 \cos^2 \gamma + \mu_2^2 \sin^2 \gamma} ds, \\
 \int_{P_0}^{P_1} \frac{dP}{P} &= \frac{\sin^2 \alpha}{r \cos \alpha} \sqrt{\mu_1^2 \cos^2 \gamma + \mu_2^2 \sin^2 \gamma} \int_0^s ds.
 \end{aligned}$$

Або

$$\ln \frac{P_1}{P_0} = \frac{\sin^2 \alpha}{r \cos \alpha} \sqrt{\mu_1^2 \cos^2 \gamma + \mu_2^2 \sin^2 \gamma} s,$$

де  $P_1$  - натяг утокової нитки в точці сходу з основи, Н;

$P_0$  - натяг утокової нитки в точці перегину на траєкторії (см. рис. 5.4.3), Н;

$s$  - довжина дуги нитки від точки сходу з направляючої до точки перегину,

м.

В остаточному вигляді отримаємо

$$P_1 = P_0 e^{\frac{\sin^2 \alpha}{r \cos \alpha} \sqrt{\mu_1^2 \cos^2 \gamma + \mu_2^2 \sin^2 \gamma} s}. \quad (5.4.12)$$

Вираз для визначення елементарної сили тертя, що діє на утокову нитку має вигляд

$$d(P \cos \gamma) = \sqrt{\mu_1^2 \cos^2 \gamma + \mu_2^2 \sin^2 \gamma} N ds.$$

Зінтегруємо його

$$F_{TP\Sigma} = \int_0^s \sqrt{\mu_1^2 \cos^2 \gamma + \mu_2^2 \sin^2 \gamma} N ds = 2 \cos \gamma \int_{P_0}^P dP = 2 \cos \gamma (P - P_0).$$

В остаточному вигляді матимемо

$$F_{TP\Sigma} = 2 \cos \gamma P_0 \left( e^{\sqrt{\mu_1^2 \cos^2 \gamma + \mu_2^2 \sin^2 \gamma} \frac{\sin^2 \alpha}{r \cos \alpha} s} - 1 \right). \quad (5.4.13)$$

Зв'язок між змінними, з урахуванням (5.4.7), визначатиметься з виразу

$$s = \frac{\beta(do + dy)}{\sin \gamma}, \quad d_0 = 2r_0.$$

З урахуванням (5.4.13) вираз для визначення результуючої сили прибою визначатиметься з виразу

$$P_{PP} = \sum_{i=1}^n 2 \cos \gamma_i P_{0i} \left( e^{\sqrt{\mu_1^2 \cos^2 \gamma_i + \mu_2^2 \sin^2 \gamma_i} \frac{\sin^2 \alpha_i}{r \cos \gamma_i} s_i} - 1 \right), \quad (5.4.14)$$

де  $n$  - число ниток основи в заправці верстата.

На рис.5.4.4 - 5.4.5 представлені діаграми залежності сили прибою від виду переплетення, виду ниток отримані з урахуванням (5.4.14). Порівняння показує, що більше значення матимемо у випадку



тканини полотняного переплетення. Це пояснюється тим, що для полотняного переплетення кут охоплення основи утоків в рапорті буде більшим, ніж у випадку переплетення репс основний. Ця різниця, в перерахунку на одну нитку, буде для  $P_o=110$  н/дм – 0,5 сН; для  $P_o=250$  н/дм – 2 сН; для  $P_o=470$  н/дм – 6 сН.

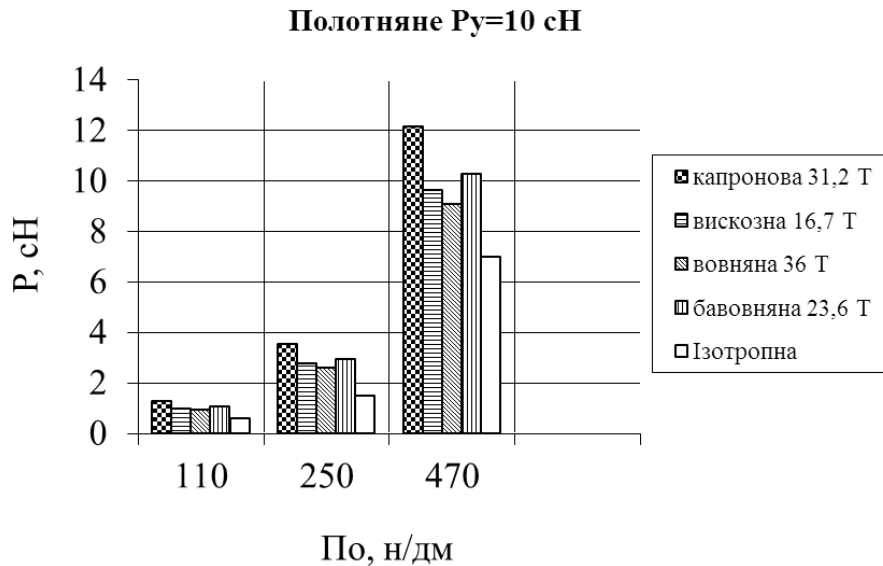


Рис.5.4.4.Залежність сили прибою для тканини полотняного переплетення залежно від щільності по основі

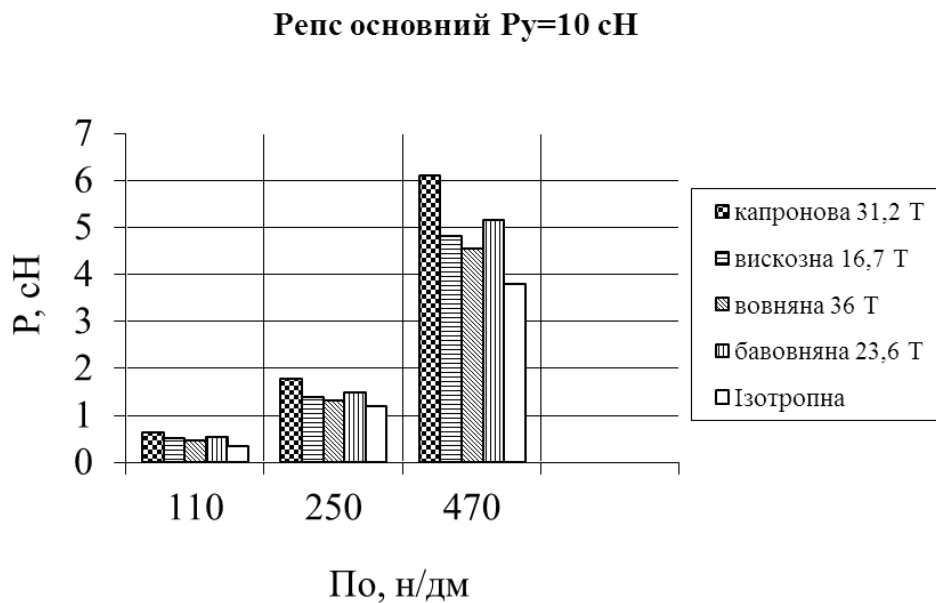


Рис.5.4.5. Залежність сили прибою для тканини переплетення репс основний залежно від щільності по основі

На діаграмах 5.4.4-5.4.5 представлено також значення сили прибою для випадку, коли нитка має ізотропні фрикційні властивості. В даному випадку різниця між анізотропною і ізотропною моделями становить 40-50%.

### **Визначення поверхнево заповнення одношарової тканини в залежності від умів прибою**

В процесі формування тканини утокова нитка під дією зубів берда переміщується до опушки тканини. При цьому, в залежності від номера берда та числа ниток основи пробраних в один зуб, нитки утока будуть вигинатися як показано на рис.5.4.6 [1-14].

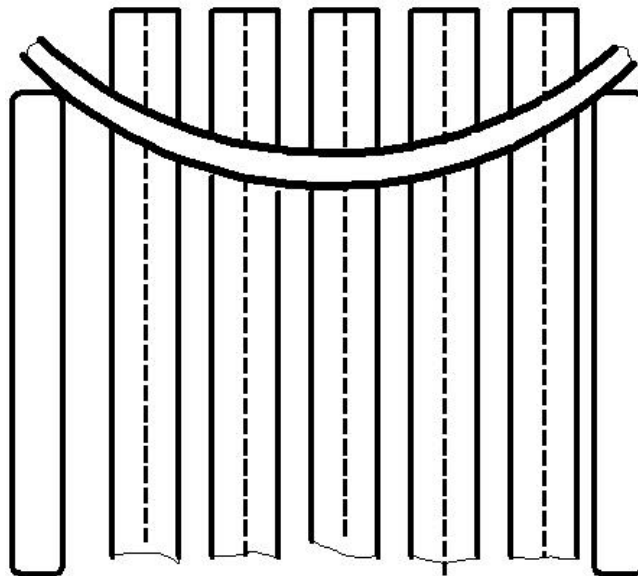


Рис.5.4.6. Розрахункова схема

За рахунок цього сумарна довжина утока збільшується і у вільному стані, коли тканина знята з верстата і фаза будови тканини буде близькою до п'ятої [10, 12], фактично буде змінюватися щільність тканини по основі (в даному випадку будемо рахувати, що щільність тканини по утоку залишається незмінною).

Визначимо як впливає вигин нитки при пробою з урахуванням анізотропії фрикційних властивостей. На рис.5.4.7 показаний переріз тканини вздовж утокових ниток. Визначимо основні геометричні параметри переплетення як функції щільності тканини по основі.

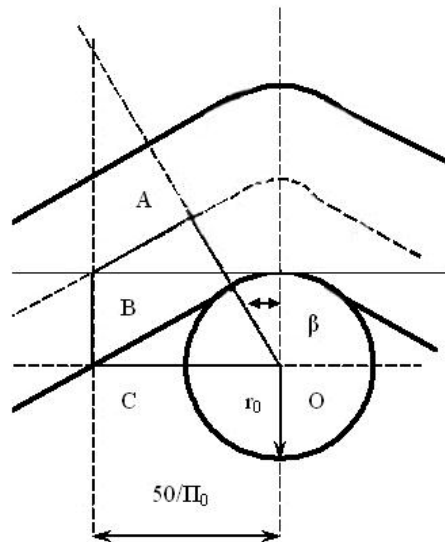


Рис.5.4.5.Переріз тканини вздовж утокових ниток

Визначаємо дві сторони чотирикутника  $OABC$ . Сторона  $BO$  буде дорівнювати

$$BO = \sqrt{r_0^2 + \left(\frac{50}{\Pi_0}\right)^2}. \quad (5.4.15)$$

де  $r_0$  - радіус основи;

$\Pi_0$  - щільність тканини по основі.

Сторона  $AB$  буде дорівнювати

$$AB = \sqrt{BO^2 - (r_0 + r_y)^2} = \sqrt{r_0^2 + \left(\frac{50}{\Pi_0}\right)^2 - (r_0 + r_y)^2}. \quad (5.4.16)$$

де  $r_y$  - радіус уточної нитки.

Проектуючи сторони чотирикутника  $OABC$  на горизонталь, з урахуванням (5.4.14)-(5.4.16), отримаємо

$$(r_O + r_y) \sin \beta + AB \cos \beta = \frac{50}{\Pi_O},$$

$$(r_O + r_y) \sin \beta + \sqrt{r_O^2 + \left(\frac{50}{\Pi_O}\right)^2 - (r_O + r_y)^2} \cos \beta = \frac{50}{\Pi_O}. \quad (5.4.17)$$

Для вирішення рівняння (5.4.17) будемо використовувати метод додаткового кута [10]

$$\frac{(r_O + r_y)}{\sqrt{(r_O + r_y)^2 + AB^2}} \sin \beta + \frac{\sqrt{r_O^2 + \left(\frac{50}{\Pi_O}\right)^2 - (r_O + r_y)^2}}{\sqrt{(r_O + r_y)^2 + AB^2}} \cos \beta = \frac{50}{\Pi_O \sqrt{(r_O + r_y)^2 + AB^2}}$$

Введемо наступні позначення

$$\cos \beta' = \frac{(r_O + r_y)}{\sqrt{(r_O + r_y)^2 + AB^2}}, \quad \sin \beta' = \frac{\sqrt{r_O^2 + \left(\frac{50}{\Pi_O}\right)^2 - (r_O + r_y)^2}}{\sqrt{(r_O + r_y)^2 + AB^2}}. \quad (5.4.18)$$

З другого рівняння системи (5.4.18) знайдемо

$$\beta' = \arcsin \left[ \frac{\sqrt{r_O^2 + \left(\frac{50}{\Pi_O}\right)^2 - (r_O + r_y)^2}}{\sqrt{(r_O + r_y)^2 + AB^2}} \right]. \quad (5.4.19)$$

Підставляємо (5.4.18) в рівняння (5.4.17), отримаємо

$$\sin \beta \cos \beta' + \cos \beta \sin \beta' = \frac{50}{\Pi_O \sqrt{(r_O + r_y)^2 + AB^2}}. \quad (5.4.20)$$

Використовуючи основні тригонометричні співвідношення знайдемо

$$\sin(\beta + \beta') = \frac{50}{\Pi_O \sqrt{(r_O + r_y)^2 + AB^2}}.$$

Остаточний вираз для визначення кута нахилу гілки утокової нитки до горизонтальної площини буде мати вигляд

$$\beta = \arcsin \left[ \frac{50}{\Pi_0 \sqrt{(r_o + r_y)^2 + AB^2}} \right] - \arcsin \left[ \frac{\sqrt{r_o^2 + \left( \frac{50}{\Pi_0} \right)^2 - (r_o + r_y)^2}}{\sqrt{(r_o + r_y)^2 + AB^2}} \right]. \quad (5.4.21)$$

З використанням (5.4.15), (5.4.16), (5.4.21) знайдемо вираз для визначення довжини утокової нитки в рапорті (ідеальна модель, коли нитка утока буде розташована в дотичній площині до перерізу тканини)

$$L = 2\beta(r_o + r_y) + 2\sqrt{r_o^2 + \left( \frac{50}{\Pi_0} \right)^2 - (r_o + r_y)^2}. \quad (5.4.22)$$

Визначимо реальну довжину вигнутої уточної нитки. Для цього скористуємося результатами, отриманими в 2 розділі. Інтегрування диференційного рівняння дозволило отримати наступний вираз

$$\int_0^{y_0} \left[ 1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{k_1}{2k_2} - 1} d\left( \frac{dy}{dx} \right) = \int_0^{\frac{50}{\Pi_0}} \frac{k_2 \mu_0 g}{P_0} dx. \quad (5.4.23)$$

Знайти інтеграл (5.4.23) у квадратурах неможливо. Для його рішення використовувалися чисельні методи та спеціально розроблене програмне забезпечення (див. розділ 2). Отримані результати апроксимувалися за допомогою відповідних методик. Для віскозної комплексної нитки 16,7 Т, з урахуванням анізотропії фрикційних властивостей (розділ 3), був отриманий вираз для визначення першої похідної

$$\frac{dy}{dx} = ax^2 - bx + c. \quad (5.4.24)$$

Тоді вираз для визначення довжини утокової нитки між зубами берда [15-18] буде мати вигляд

$$L1 = 2 \int_0^{\frac{50}{\Pi_0}} \sqrt{1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2} dx,$$

де  $L1$  - довжини утокової нитки між зубами берда.

Для визначення реальної щільності тканини, з урахуванням (5.4.21)-(5.4.22), ми отримали систему двох трансцендентних рівнянь

$$\beta_1 = \arcsin \left[ \frac{50}{\Pi_{O1} \sqrt{(r_O + r_y)^2 + AB1^2}} \right] - \arcsin \left[ \frac{\sqrt{r_O^2 + \left(\frac{50}{\Pi_{O1}}\right)^2 - (r_O + r_y)^2}}{\sqrt{(r_O + r_y)^2 + AB1^2}} \right], \quad (5.4.25)$$

$$L1 = 2\beta_1(r_O + r_y) + 2\sqrt{r_O^2 + \left(\frac{50}{\Pi_{O1}}\right)^2 - (r_O + r_y)^2},$$

де  $\Pi_{O1}$ - реальна щільність тканини по основі з урахуванням прогину утокової нитки між зубами берда;

$\beta_1$ - реальний кут нахилу гілки утокової нитки до горизонтальної площини.

Значення  $AB1$  знайдемо з урахуванням (5.4.16)

$$AB1 = \sqrt{r_O^2 + \left(\frac{50}{\Pi_{O1}}\right)^2 - (r_O + r_y)^2}. \quad (5.4.26)$$

Для рішення системи трансцендентних рівнянь (5.4.25)-(5.4.26) будемо використовувати чисельні методи алгоритм та програма для його реалізації наведені в 2 розділі.

В результаті розрахунків по формулах (5.4.21)-(5.4.22) для віскозних комплексних ниток 16,7 Т для щільності тканини по основі  $\Pi_O=200$  н/дм (без врахування вигину утокової нитки між зубами берда) отримали  $L=0,527$  мм,  $\beta=0,346$  рад. Чисельне рішення системи трансцендентних рівнянь (5.4.25)-(5.4.26) дозволило визначити реальні значення довжини утокової нитки між зубами берда, кута нахилу гілки утокової нитки до горизонтальної площини та реальної щільності по основі, відповідно  $L1=0,579$  мм,  $\beta=0,306$  рад,  $\Pi_{O1}=180$  н/дм [10].

Визначимо поверхневе заповнення тканини  $z_{II}$  для цих двох випадків за формулами [1-14]

$$\begin{aligned}
 z_{II} &= z_O + z_Y - \frac{z_O z_Y}{100}, \\
 z_O &= 0,0316 P_O k \sqrt{T_O}, \\
 z_Y &= 0,0316 P_Y k \sqrt{T_Y},
 \end{aligned}
 \tag{5.4.27}$$

де  $P_Y$  - щільність тканини по утку (приймалася постійною та рівною  $P_Y=150$  н/дм);

$k$  - постійні коефіцієнти, для визначення діаметра нитки (для віскозної комплексної нитки  $k = 0,0411$  [10]).

У результаті розрахунків отримали  $z_{II} = 1,845$  та  $z_{II} = 1,74$  (для щільності по основі  $P_O=180$  н/дм). Таким чином зниження заповнення тканини склало 5,7%.

Таке зменшення заповнення тканини призвело до збільшення відносної повітропроникності  $B$  на 6,1% та зменшенню відносної стійкості до стирання  $I$  на 10,9 % (розрахунки виконувалися за відомою методикою [10, 12]). На рис.5.4.8 представлені відповідні діаграми.

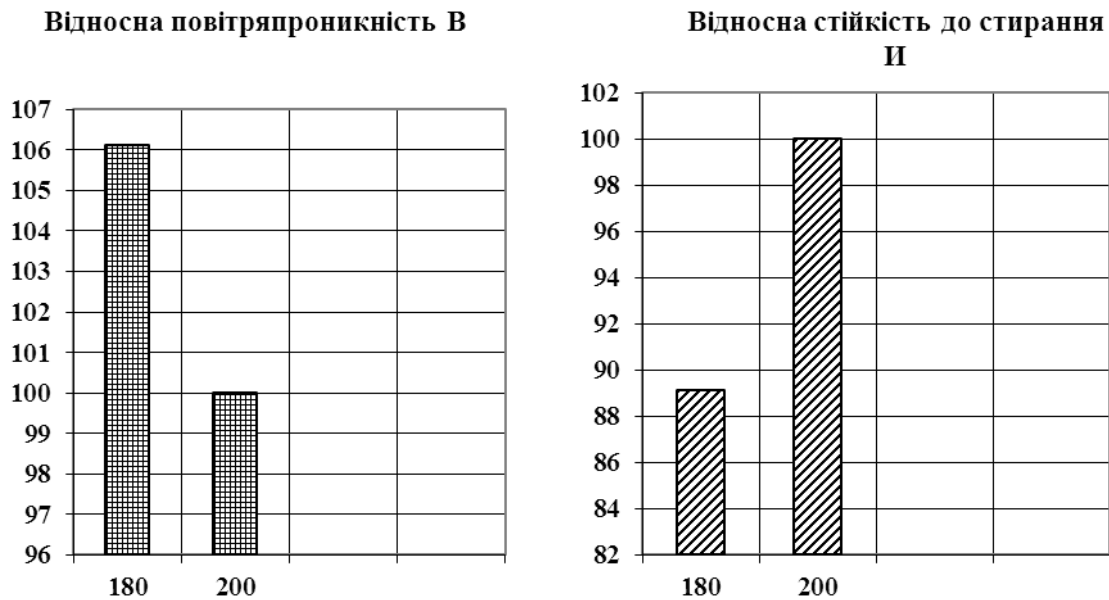


Рис.5.4.8. Діаграми значень відносних повітропроникності та стійкості до стирання

**Вплив анізотропії фрикційних властивостей матеріалу нитки на кут нахилу петлі при переміщенні голки при завершенні**

Операція завершення спрямована на перевід старої петлі на стрижень трикотажної голки. Закінчується ця операція коли трикотажна голка опиниться в верхньому положенні. Процес завершення ускладнюється тим, що стара петля під дією сил тертя розташовується під деяким кутом до відбійної площини. Визначення цього кута дозволить оптимізувати величину робочого руху трикотажної гільки.

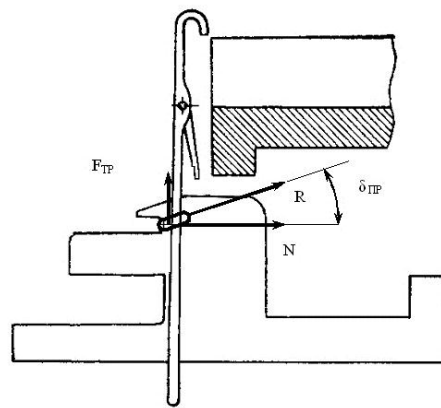


Рис.5.4.9. Схема взаємодії старої петлі зі стрижнем голки

Значення поточного натягу нитки в нормальній площині при взаємодії з стрижнем трикотажної гільки визначається за формулою

$$P = P_0 e^{-\mu l \alpha}, \quad (5.4.28)$$

де  $P$  - поточний натяг нитки;

$P_0$  - зусилля відтяжки полотна, віднесене до однієї з гілок петлі;

$\mu l$  - коефіцієнт тертя нитки в подовжньому напрямку;

$\alpha$  - поточний кут обхвату ниткою стрижня трикотажної голки.

Елементарний тиск нитки на стрижень трикотажної голки буде рівним

$$dN_1 = P d\alpha, \quad (5.4.29)$$

де  $N_1$  - елементарний тиск на стрижень трикотажної голки в нормальній площині.



Тиск на трикотажну гілку елементарної ділянки нитки визначається як проекція на головну нормаль усіх діючих на неї сил

$$dN = dN_1 \cos \delta_{PP},$$

де  $N$  - елементарний тиск на стрижень трикотажної голки;

$\delta_{PP}$  - кут нахилу трикотажної петлі.

Вираз для визначення елементарної сили тертя, яка діє вздовж трикотажної голки, з урахуванням (5.4.28)-(5.4.29), має вигляд

$$dF_{TP} = \mu_2 dN = \mu_2 P_0 e^{-\mu_1 \alpha} \cos \delta_{PP} d\alpha, \quad (5.4.30)$$

де  $\mu_2$  - коефіцієнт тертя нитки в поперечному напрямі.

Інтегруємо (5.4.30), отримаємо

$$F_{TP} = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \mu_2 P_0 e^{-\mu_1 \alpha} \cos \delta_{PP} d\alpha.$$

В остаточному вигляді будемо мати

$$F_{TP} = \frac{2\mu_2 P_0 (1 - e^{-\mu_1 \frac{\pi}{2}}) \cos \delta_{PP}}{\mu_1}. \quad (5.4.31)$$

Тангенс кута нахилу старої петлі буде дорівнювати відношенню сили тертя до нормальної реакції. З використанням (5.4.28), (5.4.29) та (5.4.31), отримаємо

$$\sin \delta_{PP} = \frac{\mu_2 \cos \delta_{PP}}{\mu_1} (1 - e^{-\mu_1 \frac{\pi}{2}}).$$

Остаточно знаходимо значення кута нахилу петлі

$$\delta_{PP} = \arctan \left[ \frac{\mu_2}{\mu_1} (1 - e^{-\mu_1 \frac{\pi}{2}}) \right]. \quad (5.4.32)$$

На рис.5.4.10 представлені значення кута нахилу трикотажної петлі з урахуванням анізотропії та для ізотропної нитки

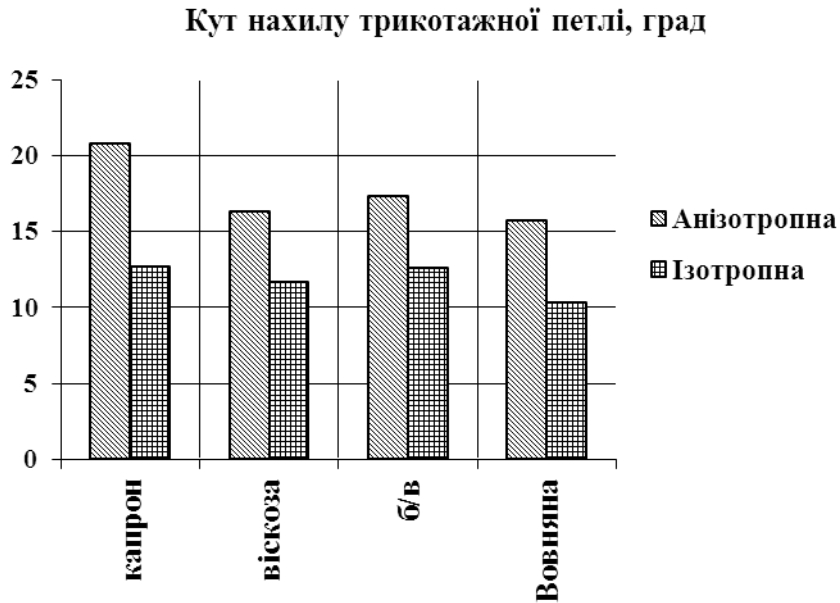


Рис.5.4.10. Діаграма кута нахилу трикотажної петлі

Аналіз отриманих даних дозволив встановити що у випадку, коли враховуються анізотропні властивості ниток значення кута нахилу старої трикотажної петлі до відбійної площини при завершенні зростає для капронової комплексної нитки 31,2 Т на 63,8% ( $20,8^\circ$  для анізотропної,  $12,7^\circ$  для ізотропної), віскозної комплексної нитки 16,7 Т на 39% ( $16,3^\circ$  для анізотропної,  $11,7^\circ$  для ізотропної), бавовняної пряжі 23,6 Т на 37,3% ( $17,3^\circ$  для анізотропної,  $12,6^\circ$  для ізотропної), вовняної пряжі 36 Т на 52,4% ( $15,7^\circ$  для анізотропної,  $10,3^\circ$  сН для ізотропної). Різниця при визначені кута нахилу трикотажної петлі з урахуванням анізотропії фрикційних властивостей та без урахування (нитка ізотропна) складає близько 48% [10].

Цю обставину необхідно враховувати при оптимізації величини робочого руху трикотажної гілки.

### **Розрахунок тарільчатого нитконатягувача з урахуванням анізотропії фрикційних властивостей та матеріалу нитки**

Тарільчаті нитконатягувачі широко використовуються на сучасному технологічному обладнанні, що пов'язано з їх високими технічними характеристиками [10]. Їх подальша модернізація буде йти по шляху розширення технологічних можливостей, врахуванні реальних фізико-механічних показників ниток що переробляються на відповідному обладнанні. Зокрема, при розрахунках вихідного натягу не враховуються анізотропні властивості нитки. Це може призвести до значних похибок при визначенні вихідного натягу і, як наслідок, до порушення нормального протікання технологічного процесу.

Проведемо розрахунок вихідного натягу нитки з урахуванням її анізотропних фрикційних властивостей [11-12].

Значення тиску в точках контакту тарілок з ниткою визначимо із наступних рівнянь [10]

$$p = \frac{Q}{2[1 + \sin(\beta - \alpha)]}, \quad 0 \leq \frac{\alpha}{2} \leq \beta,$$

$$p = \frac{Q}{2[1 + \sin(\alpha - \beta)]}, \quad \frac{\alpha}{2} > \beta, \quad (5.4.33)$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{r}{R}\right),$$

де  $p$  - тиск в точках контакту тарілок з ниткою;

$Q$  - тиск пружини нитконатягувача на верхню тарілку;

$r$  - радіус стрижня;

$R$  - радіус контактного кола;

$\alpha$  - кут охоплення ниткою стрижня.

Натяг нитки після першої точки контакту, з урахуванням (5.4.33), буде визначатися по формулі

$$P_1 = P_0 + 2\sqrt{\mu_1^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \mu_2^2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}} p, \quad (5.4.34)$$

де  $P_0$  - натяг нитки до нитконатягувача;

$\mu_1$  - коефіцієнт тертя нитки в подовжньому напрямі;

$\mu_2$  - коефіцієнт тертя нитки в поперечному напрямі.

Натяг нитки  $P_2$  після контакту з циліндричним стрижнем буде визначатися по формулі

$$P_2 = P_1 e^{\mu_1 \alpha}. \quad (5.4.35)$$

Натяг нитки після другої точки контакту буде визначатися по формулі

$$P = P_2 + 2 \sqrt{\mu_1^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \mu_2^2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}} p. \quad (5.4.36)$$

Спільно вирішуючи рівняння (5.4.34)-(5.4.36), отримаємо

$$P = (P_0 + 2 \sqrt{\mu_1^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \mu_2^2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}} p) e^{\mu_1 \alpha} + 2 \sqrt{\mu_1^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \mu_2^2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}} p. \quad (5.4.37)$$

Підставляємо в (5.4.37) значення тиску в точках контакту тарілок з ниткою (5.4.33) та отримаємо для випадку  $0 \leq \frac{\alpha}{2} \leq \beta$

$$P = P_0 e^{\mu_1 \alpha} + \sqrt{\mu_1^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \mu_2^2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}} \left\{ \frac{Q}{[1 + \sin(\beta - \alpha)]} \right\} (1 + e^{\mu_1 \alpha}) \quad (5.4.38)$$

Для випадку  $\frac{\alpha}{2} > \beta$  отримаємо

$$P = P_0 e^{\mu_1 \alpha} + \sqrt{\mu_1^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \mu_2^2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}} \left\{ \frac{Q}{[1 + \sin(\alpha - \beta)]} \right\} (1 + e^{\mu_1 \alpha}) \quad (5.4.39)$$

На рис.5.4.11 представлена діаграма значень натягу нитки після тарільчатого нитконатягувача з урахуванням анізотропії фрикційних властивостей нитки та без урахування.

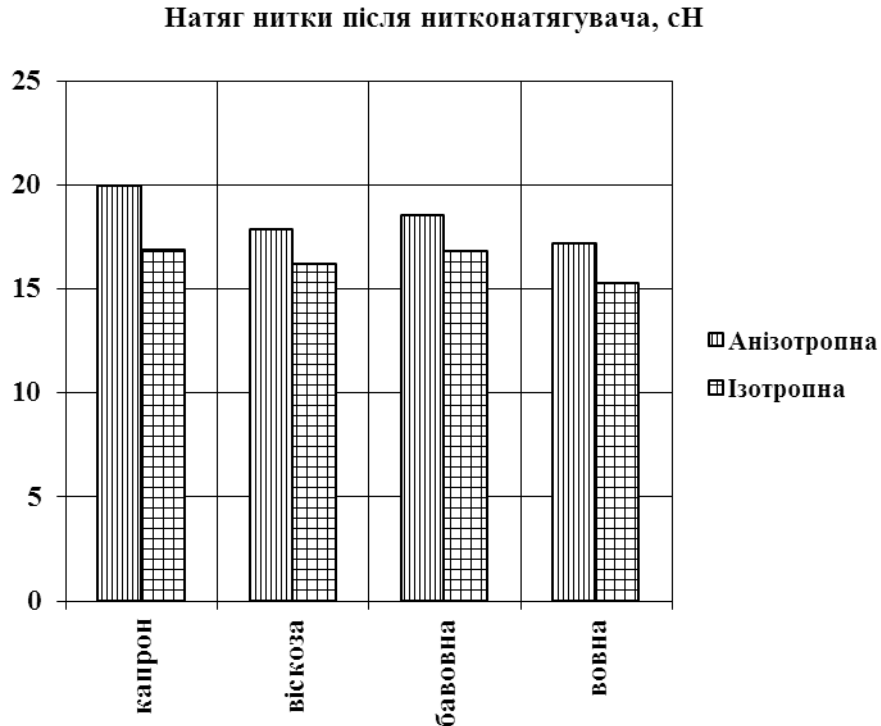


Рис.5.4.11. Діаграма натягу нитки після нитконатягувача

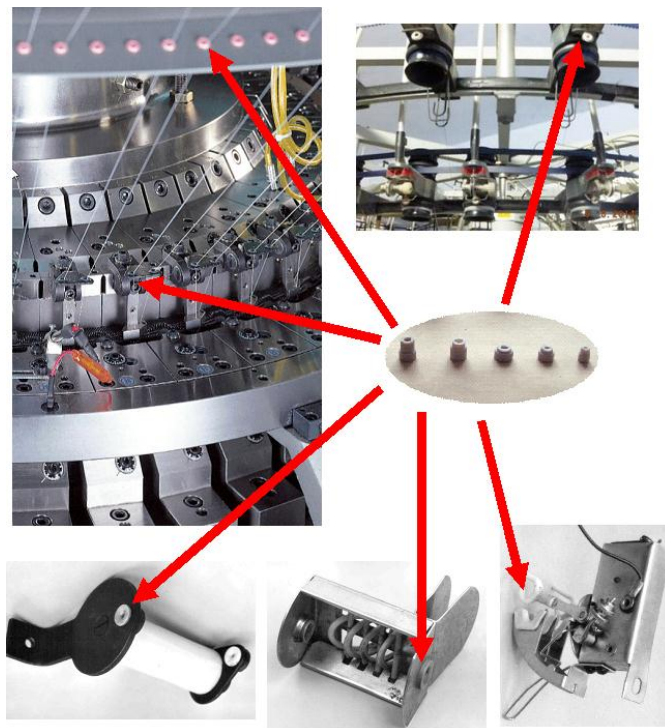
Аналіз отриманих даних дозволив встановити що у випадку, коли враховуються анізотропні властивості ниток вихідний натяг зростає для капронової комплексної нитки 31,2 Т на 18% (19,96 сН для анізотропної, 16,86 сН для ізотропної), віскозної комплексної нитки 16,7 Т на 10% (17,86 сН для анізотропної, 16,18 сН для ізотропної), бавовняної пряжі 23,6 Т на 10% (18,55 сН для анізотропної, 16,82 сН для ізотропної), вовняної пряжі 36 Т на 12,5% (17,17 сН для анізотропної, 15,26 сН для ізотропної). З урахуванням анізотропії натяг нитки після нитконатягувача, в середньому, на 17 % більше ніж для ізотропної нитки.

Цю обставину необхідно враховувати при проектуванні систем ниткоподачі для забезпечення мінімізації натягу в процесі переробки ниток на технологічному обладнанні [10,12].

## 6. МАТЕМАТИЧНІ, АЛГОРИТМІЧНІ ТА ПРОГРАМНІ КОМПОНЕНТИ СИСТЕМИ ПРОЕКТУВАННЯ ФОРМИ ЛІНІЇ ЗАПРАВКИ НИТОК НА КРУГЛОВ'ЯЗАЛЬНИХ МАШИНАХ УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ НИТКОПОДАЧІ КРУГЛОВ'ЯЗАЛЬНИХ МАШИН

Після визначення оптимальної форми заправки нитки, необхідно визначити вплив ниткоспрямовувачів, нитконатягувачів в точках зламу лінії заправки на натяг нитки перед робочою зоною в'язальної машини та визначити їх оптимальні параметри.

На рисунку представлений загальний вигляд ниткоспрямовувачих елементів.



Аналіз умов взаємодії нитки з направляючими в точках зламу лінії заправки показує, що контакт між ниткою та направляючою поверхнею відбувається по деякій площині. Нитка рухається у жолобі, який створений внутрішньою поверхнею ниткоспрямовувача. Цю обставину необхідно

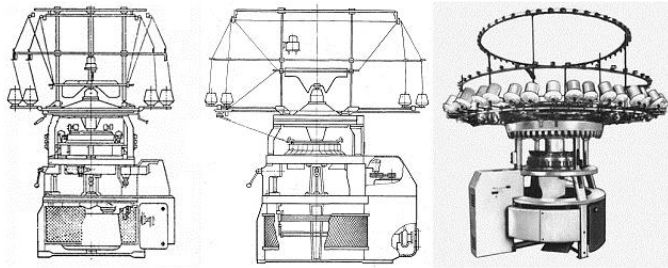
враховувати при складенні систем диференційних рівнянь, які описують рівновагу елемента нитки на напрямній поверхні.

Круглов'язальні машини, завдяки своїй продуктивності та широкому асортименту трикотажних полотен що виробляються на них, знаходять широке розповсюдження на трикотажних підприємствах та фірмах. В наш час широко використовуються круглов'язальні машини з утримувачем бобін, розташованим на підлозі. Це пов'язано з тим, що перенесення утримувача бобін на підлогу розвантажило корпус трикотажної машини, підвищило її стан рівноваги, зменшило динамічні навантаження, що, в свою чергу, дозволило підвищити швидкість обертання циліндра, збільшити масу та кількість бобін в заправці[10].

На рис.6.1 представлені різні види в'язальних машин. На рис.6.1а представлені машини з конструкцією утримувача бобін у вигляді парасольки. На рис.6.1б представлені машини з утримувачем бобін, розташованим на підлозі. На рис.6.1с представлені структурні схеми лінії заправки нитки, де 1 позначена схема заправки з конструкцією утримувача бобін у вигляді парасольки, а 2 позначена схема заправки з утримувачем бобін, розташованим на підлозі.

Аналіз структурної схеми лінії заправки нитки показує її дуже складну конфігурацію, як у площині так і у просторі габаритних розмірів трикотажної машини. В точках зламу лінії заправки має місце взаємодія нитки з направляючими отворами спрямовувачів нитки, пристроями що забезпечують натяг нитки[10, 12].

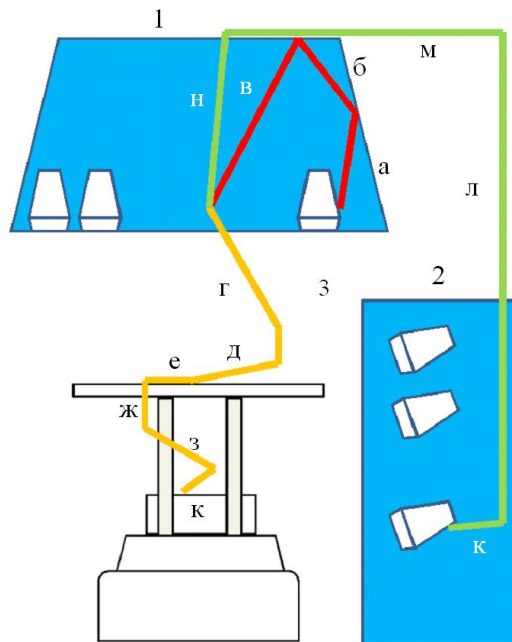
Величина кутів охоплення отворів спрямовувачів нитки, пристроїв що забезпечують натяг нитки напряму впливає на величину натягу після цих пристроїв.



а



б



в

Рис.6.1. Лінії заправки нитки на круглов'язальних машинах

Для машини з конструкцією утримувача бобін у вигляді парасольки нитка на ділянках *аб*, *бв*, *вг* має злам у отворах спрямовувачів нитки (червона лінія). На ділянці *гд* нитка проходить через отвір спрямовувача, нитконатягувальний пристрій та поступає у зону *е* дії механізму активної подачі. На ділянках *еж*, *жз*, *зк* нитка має злам у отворах спрямовувачів нитки, після чого вона поступає в зону в'язання.



Для машин з утримувачем бобін, розташованим на підлозі різниця у формі лінії заправки (зелена лінія) полягає у наступному. На ділянках *кл*, *лм*, *мн* лінія заправки нитки має злами проходячи скрізь отвір у синтетичній трубці, за допомогою якою вона транспортується до в'язальної машини. Після ділянки *нг* лінія заправки повторює форму, яку вона мала і у першому випадку (лінія коричневого кольору).

Аналіз цієї інформації показує, що задача обрання оптимальної форми лінії заправки є дуже складною, яка залежить від багатьох чинників і її розв'язання не можливе без використання ЕОМ та спеціальних алгоритмів[1-14].

### **6.1. Теоретичне обґрунтування обчислювальної схеми алгоритму послідовної оптимізації, що мінімізує пошуки в дереві варіантів**

В нашій роботі [10] пропонується обґрунтування алгоритмів розв'язку задачі дискретного програмування, що базується на обчислювальній схемі гілок та границь що є алгоритмами сортування дерева варіантів поєднаними з, алгоритмами елімінації недопустимих та неоптимальних варіантів, а також алгоритмів розділення дискретних множин, визначених в евклідовому просторі. Показано, що є можливою обчислювальна схема, що не потребує пошуку в дереві варіантів та обчислення границь.

Алгоритми аналізу задач дискретного програмування, що базуються на ідеології гілок і границь та динамічного програмування (на цих обчислювальних схемах базуються майже всі відомі алгоритми винятком алгоритмів відтинання Гоморі) є алгоритмами перебору варіантів. Пошук найбільш перспективних варіантів разом з обчисленням границь є одним з найважливіших факторів, що визначають ефективність алгоритму. Тому представляється доцільним формулювання задачі визначення

оптимального розв'язку таким чином, щоб зменшити затрати обчислень для розрахунків значень оцінок цільової функції та позбутись трудомісткої громіздкої операції сортування висячих вершин дерев розв'язків.

Постановка задачі та загальна схема методу.

Розглядається задача максимізації функції  $f_0(x)$  дискретного аргументу  $x$ ,  $x \in E_n$ ,  $x^t = \{x_1, \dots, x_j, \dots, x_n\}$ , або відшукування

$$x^* = \arg \max f_0(x). \quad (6.1)$$

$x \in G$  на скінченій множині  $G$ , яка задається таким чином

$$G = Q \cap G_1 \cap G_2 \cap \dots \cap G_i \cap \dots \cap G_m, \quad (6.2)$$

$$Q = [x / x_j \in Q_j, Q_j = \{h_{j1}, h_{j2}, \dots, h_{jN}\}], G_i = [x / f_i^H \leq f_i(x) \leq f_i^b]. \quad (6.3)$$

На функції  $f_i(x)$ ,  $i=0, \dots, m$ , накладається наступне додаткове обмеження:  $j$ -ті компоненти будь-яких векторів

$$x^{1i}, x^{2i}, x^{1i} = \arg \min_{x \in Q} f_i(x), x^{2i} = \arg \max_{x \in Q} f_i(x), i = 0, \dots, m,$$

Співвідношення  $x \in Q$  приймають одне й те саме значення при будь-яких значеннях інших компонент,  $x^{1i}, x^{2i} \in Q$ . Такій умові задовольняють, наприклад, монотонні та сепарабельні функції. Для легкої промисловості в такому вигляді, наприклад, формулюються будь які задачі розкрою. В цьому випадку  $x_j$  інтенсивність використання  $j$ - того способу розкрою – або ціле число, що визначає кількість розкладок які потрібно розкрити цим способом. Обмеження (6.3) гарантують, що кількість деталей буде

відповідати необхідній комплектації [10]. Визначимо множину  $G^k$  таким чином

$$G^k = G \cap G_0^k, G_0^k = \{x \mid f_0^{nk} \leq f_0(x) \leq f_0^{sk}, x \in Q^k\}, \quad (6.4)$$

де  $Q^k$  – деяка підмножина множини  $Q$ .

На  $k$ -тій ітерації алгоритму визначається деякий елемент  $\bar{x}^k$ ,  $\bar{x}^k \in G^k$ , значення функції цілі для якого не може бути покращено за допомогою покоординатного спуску. Назвемо формально задачею  $k$  задачу, яка полягає у відшуванні елемента  $\bar{x}^k$ , який задовольняє наступним умовам:  $\bar{x}^k \in G^k$ ;  $\exists x^{*k}$ ,  $x^{*k} \in G_k$ , такого, що усі компоненти  $x_j^{*k}$ , крім одного, дорівнюють відповідним компонентам вектора  $\bar{x}^k$ , та  $f_0(x^{*k}) > f_0(\bar{x}^k)$ .

Запропонований метод розв'язування задачі (6.1)-(6.3) зводиться до послідовного формування та розв'язування задач  $k$ ,  $k = 1, \dots, r$ . Алгоритм розв'язування цієї допоміжної послідовності задач побудований так, що розв'язок задачі  $k-1$  виконується для зменшення області  $G^k$ . Область  $G^k$  зменшується двома способами: зменшується інтервал зміни функції  $f_0(x)$ ; в множині  $Q^k$  відокремлюють та відкидають підмножини, які мають в собі неприпустимі плани задачі (не задовольняють умові 1), а також плани, які не задовольняють умові 6. Зрізання області  $G^k$  виконується так, що розв'язування задачі (6.1)-(6.3), якщо воно існує, належить  $G^k$ ,  $k = 1, \dots, r-1$ .

Позначимо:  $V^{lk}$  - множина планів  $x$ ,  $x \in Q$ , які у ході розв'язку  $k$ -тої задачі були відокремлені як неприпустимі,

$$V^{lk} \in \{x \mid x \in Q \setminus G^k\}, V^{-lk} = V^{1,1} \cup \dots \cup V^{1,2} \cup \dots \cup V^{1,k},$$

де  $V^{1,2}$  - множина планів, які у ході розв'язку задачі  $k$  були відокремлені як не її розв'язок, тобто з

$$x \in V^{2,k}, \text{ слідує } \exists x', x' \in G^k, f_0(x') > f_0(x),$$

$$V^{-2k} = V^{2,1} \cup \dots \cup V^{2,2} \cup \dots \cup V^{2,k}.$$

На основі введених позначень маємо можливість описати процес формування задач  $k$  таким чином

$f_0^{H1} = f_0^H$ ,  $f_0^H$  - деяка оцінка мінімального значення функції цілі  $f_0(x)$  на множині  $G$

$$f_0^H \leq \min_{x \in G} f_0(x);$$

$$x \in G$$

$f_0^{B1} = f_0^B$ ,  $f_0^B$  - деяка оцінка максимального значення функції цілі  $f_0(x)$  на множині  $G$

$$V^{-2k} = V^{2,1} \cup \dots \cup V^{2,2} \cup \dots \cup V^{2,k},$$

$$f_0^B \geq \max_{x \in G} f_0(x),$$

$$f_0^{nk} = f_0(x^{-k-1}), f_0^{Bk} = f_0^{B1}, k = 2, \dots, r, \quad (6.5)$$

$$Q^1 = Q, Q^k = \{x/x \in Q, x \notin V^{-1,k-1}, x \notin V^{2,k-1}\}, r = \min k / Gk = \emptyset.$$

Для зручності посилання назвемо лемами наступні твердження.

Лема 1. Існує таке число  $k$ ,  $k < |Q|$ , що  $G_k = \emptyset$  (тут  $|Q|$  - число елементів множини  $Q$ ).

Лема 6. Якщо при  $k = 1$ , не існує елементу  $x^k$ , який задовольняє умовам 1-2, то розв'язок задачі (6.1)-(3) також не існує.

Теорема 3. (Ознака оптимальності) У послідовності розв'язання допоміжних задач  $k$   $x^{-1}, \dots, x^{-k}, \dots, x^{-\tau-1}$ , що вироблюється алгоритмом, елемент  $x^{\tau-1}$  є розв'язком задачі (6.1)-(6.3).

Доведення теореми проведемо від протилежного. Припустимо, що існує вектор  $x', x' \in G$ , який є оптимальним планом (6.1)-(6.3) та  $f(x') > f(x^{\tau-1})$ . З способу визначення  $f_0^b$  та  $f_0^{h\tau}$  і останньої нерівності слідує, що  $x' \in G \cap G_{op}$  де

$$G_{op} = [x / f_0^{h\tau} \leq f(x) \leq f_0^b, x \in Q] = G_0^{\tau} \cup V^{-1, \tau-1} \cup V^{-2, \tau-1}.$$

По визначенню  $G^{\tau} = \emptyset$ , отже  $x' \in V^{-1, \tau-1} \cup V^{-2, \tau-1}$ . До цього множина  $V^{-1, \tau-1}$  була визначена як множина, що містить тільки ті елементи, що не входять у множину  $G$ , отже  $x' \in V^{-2, \tau-1}$ . Але тоді у відповідність з означенням множини  $V^{-2, \tau-1}$  існує елемент  $x'', x'' \in G$ , такий що  $f_0(x'') > f_0(x')$ . Ми прийшли до суперечки отже теорема стверджується. Сформульовані твердження - леми 1, 2, теорема 3 встановлюють еквівалентність задачі (6.1)-(6.3) і послідовність задач  $k$ .

Для суттєво дискретних задач алгоритми гілок і границь залишаються найбільш уживаними. Вважається що ці алгоритми базуються на процедурах упорядкування вершин дерева варіантів що вісять. Сформульовані твердження можуть бути використані як основа для побудови алгоритмів що не потребують сортування дерева варіантів та обчислення границь.

## 6.2. Обчислювальна реалізація алгоритму послідовної оптимізації, що мінімізує пошуки в дереві варіантів

Нами пропонується алгоритм розв'язку задачі дискретного програмування[1-14]. У ході розв'язку задача, яка аналізується, замінюється послідовністю задач пошуку точок, які належать деяким

підмножинам множини планів початкової задачі. Описан рекурентний спосіб побудови послідовності розв'язків допоміжних задач. Доведено, що ця скінченна послідовність збігається до розв'язку початкової задачі [10, 12].

Для задач знаходження мінімуму нелінійної функції що визначена на деякій дискретній множині елементів евклідового простору таких, що задовольняють системі нелінійних обмежень найбільш поширеними є обчислювальні схеми на основі схеми гілок і границь. В цьому випадку методи гілок та границь є алгоритмами сортування дерева варіантів що є поєднаними з алгоритмами елімінації недопустимих та неоптимальних варіантів та а також алгоритмах розділення дискретних множин, визначених в евклідовому просторі.

Алгоритми аналізу задач дискретного програмування, що базуються на ідеології гілок і границь та динамічного програмування (на цих обчислювальних схемах базуються майже всі відомі алгоритми за винятком алгоритмів відтинання Гоморі) є алгоритмами перебору варіантів. Пошук найбільш перспективних варіантів разом з обчисленням границь є одним з найважливіших факторів, що визначають ефективність алгоритму. Пропонується описаний алгоритм що використовує ідеологію гілок та границь але не потребує обчислення границь для кожної вершини, що висить та сортування вершин, що є висячими.

В підрозділі 6.1 встановлена еквівалентність задачі максимізації функції  $f_0(x)$  дискретного аргументу.

Та послідовністю задач ( $k=1, \dots$ ), які полягають у відшуванні елементу  $\bar{x}^k$ , що задовольняє наступним умовам:  $x^k \in G^k$ ;  $\exists x^{*k}, x^{*k} \in G_k$ , такого, що усі компоненти  $x_j^{*k}$ , крім одного, дорівнюють відповідним компонентам вектора  $x^k$ , та  $f_0(x^{*k}) > f_0(x^k)$ .

Алгоритм розв'язування задач  $k$  побудований на послідовному розбитті початкової множини  $Q$  на підмножині  $Q^S$

$$Q^S = [x/x_j \in Q_j^S, Q_j^S = \{h^S_{j1}, h^S_{j2}, \dots, h^S_{Ns}\}, Q_j^S \in Q_j], \quad (6.6)$$

та на відокремленні у підмножині з максимальним індексом  $S$  елементів, які не можуть бути розв'язком задачі  $k$ , яка аналізується. У ході аналізу задачі  $k$  виконуються наступні операції.

1. Розгалуження. Якщо існує індекс  $j$ , такий, що  $h^S_{j1} \neq h^S_{Ns}$ , множина  $Q^S$  ділиться на дві підмножини  $Q^{s1}$  та  $Q^{s2}$  таким чином

$$Q^{s1} = [x/x \in Q^S, h^S_{j1} \leq x_j \leq h^S_{j2}],$$

$$Q^{s2} = [x/x \in Q^S, h^S_{j, l+1} \leq x_j \leq h^S_{j, Ns}].$$

Розбиттю підлягає множина з максимальним індексом  $s, s = \check{S}$ . Після того як розгалуження проведено, вважаємо  $s1 = \check{S} \quad s2 = \check{S} + 1$ .

Надалі будемо вважати, що множина  $Q^{sj}$  впорядкована по зростанню значення функції  $f_0(x)$ , тобто з  $l_1 < l_2$ , для будь яких  $x^1, x^2$  що задовольняють умові

$$x^1_{j'} = h^S_{j', l1}, x^2_{j'} = h^S_{j', l2}, x^1_j = x^2_j, j = 1, \dots, j'-1, j+1, \dots, n,$$

тобто

$$f_0(x^1) > f_0(x^2). \quad (6.7)$$

Введена умова надає додаткове направлення процесу розгалуження.

Для  $x^1, x^1 \in Q^{s1}$ , та  $x^2, x^2 \in Q^{s2}$  нерівність (6.7) можна розглядати як співвідношення між грубими оцінками функції цілі. У процесі роботи алгоритму розгалуженню підлягає множина  $Q^{s2}$  з максимальною оцінкою.

6. Виділення планів, які не можуть бути розв'язком задачі  $k$ . Не дивлячись на велике розмаїття схем послідовного аналізу варіантів, загальним для

них є наявність операторів, які забезпечують виключення з подальшого розгляду підмножин планів, що не мають в собі розв'язку задачі (6.1). Наявність таких процедур дозволяє, в деяких випадках, суттєво, скоротити число варіантів, які аналізуються, і, отже, підвищити, ефективність розрахунків. Алгоритм, що пропонується передбачає застосування двох операторів  $\alpha_1, \alpha_2$ , перший з яких не дозволяє виключити з розглядання варіанти які не задовольняють умові 1, другий - варіанти, що не задовольняють умові б.

Нехай  $\Phi_s, \Phi_s = \{s+1, s+2, \dots\}$  множина індексів, що не відповідають підмножинам, які не можуть бути отримані з  $Q^s$  в результаті розгалуження. Оператори  $\alpha$  ( $\alpha = \alpha_1$  або  $\alpha_2$ ) мають такі властивості:

1.  $\alpha(Q_s) \subseteq Q_s$
- б.  $(\alpha(Q_s)) = \alpha(Q_s)$
3. Якщо  $Q_s \cap G = \emptyset$ , то  $\exists j, j \in \Phi_s, Q_j \neq \emptyset, \alpha_1(Q_j) = \emptyset$ .

Послідовне застосування операторів розгалуження та відокремлення з максимальним індексом  $S$  підмножин, які не мають в собі розв'язку задачі  $k$ , дозволяє не деякому кроці розгалуження отримати множину  $Q^S$ ,  $Q^S = \alpha(Q^S)$ , яка або має тільки один елемент, або пуста. В останньому випадку можливі ситуації:

$S > 1$  в такому випадку необхідно перейти до до альтернативної множини  $S-1$ ,  $S = 1$ , в такому випадку розв'язок задачі  $k$  не існує (справедливість цього твердження прямує з визначення операторів  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$ ),  $G_k = \emptyset$ .

Розглянемо більш уважно ситуацію, для якої множина  $Q^S$  має тільки один елемент  $x^S$ . Справедливо наступне твердження.

Лемма 4. (Признак оптимальності задач  $k$ ). Нехай  $s' = \min s / Q^S = x^S$ . В такому разі  $x^{s'}$  є розв'язком задачі  $k$ .



З властивості 3 оператора  $\alpha_1$ , виходить що  $x^{s'} \in G$  і, отже задовольняє умові 1 для розв'язку задачі  $k$ . Покажемо, що  $x^{s'}$  задовільняє також умові 6. Доведення проведемо від протилежного. Нехай існує план  $x'$ ,  $x' \in G^k$ , такий що  $x_j^{s'} = x_j'$ ,  $j=1, \dots, j'-1, \dots, j'+1, \dots, n, j \neq j'$ , та  $f_0(x') > f_0(x^{s'})$ . З способу побудови послідовності множин  $Q^s$  прямує існування індексу  $s''$  такого, що

$$s'' = \min s / x^{s'}, x' \in Q^s \cup Q^{s-1} \cup V^s, x^s \in Q^s, x' \notin Q^s,$$

де  $V^{s''}$  - множина елементів, які не були відокремлені у множині  $Q^{s''}$ ,  $Q^{s''} = \alpha_2(\alpha_1(\bar{Q}^{s''}))$ . У відповідність алгоритму множини  $Q^{s''-1}$  та  $\bar{Q}^{s''}$  були отримані в результаті розгалуження множини  $\bar{Q}^{s''}$   $\bar{Q}^{s''} = \bar{Q}^{s''} \cup Q^{s''-1}$ . З означення операторів  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$  прямує, що  $x' \in V^s$ . Тобто  $x' \in Q^{s''-1}$ . Але це неможливо, так як в такому випадку не виконується умова (6.7). Ми прийшли до суперечки, отже, твердження виконується.

3. Оператори  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$ . Раніше відмічалось, що розрахункові процедури, що не дозволяють виключати з множини варіантів що розглядаються, варіанти, які не можуть бути розв'язком задачі, є невід'ємним атрибутом багатьох розрахункових схем послідовної оптимізації. Наприклад, у роботі [12] змальовано ряд тестів відокремлення неприпустимих варіантів, які можуть бути використані при побудові оператора  $\alpha_1$ . Змальовані нижче розрахункові процедури оператору  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$  є модифікацією, що застосовується до задач  $k$ , алгоритмів відокремлення підмножин, що не мають припустимих оптимальних планів [12].

Позначимо

$$x^{i \min} (Q^S / \bar{x}j') = \arg \min f_i(x_1, \dots, x_{j'} = \bar{x}j', \dots, x_n),$$

$$x_j \in Q_j^S, j \in J(j'),$$

$$x^{i \max} (Q^S / \bar{x}j') = \arg \max f_i(x_1, \dots, x_{j'} = \bar{x}j', \dots, x_n),$$

$$x_j \in Q_j^S, j \in J(j'),$$

де  $J(j') = \{1, \dots, j, \dots, j'-1, j'+1, \dots, n\}$ .

Оператор  $\bar{\infty}1$  визначимо наступним чином

$$\bar{\infty}1(\bar{Q}^S) = \{x / x_j \in \bar{Q}_j^S \setminus \bar{V}_j^S\},$$

де  $\bar{V}_j^S = \{x_j / f_i(x^{i \max}(\bar{Q}^S / x_j)) < f_i^H\}$ , або

$$f_i(x^{i \min}(\bar{Q}^S / x_j)) > f_i^G, \exists i = 0, \dots, m\}. \quad (6.8)$$

Розрахункова процедура, яку реалізує оператор  $\bar{\infty}1$ , полягає в послідовному використанні до  $\bar{Q}^S$  оператору  $\bar{\infty}1$  до тих пір, поки не буде отримана множина  $Q^S$  така, що

$$\bar{\infty}1(Q^S) = Q^S.$$

Безпосередньою перевіркою легко переконатись в тому, визначений таким чином оператор  $\bar{\infty}1$  задовольняє властивостям 1-3, а з (6.8) маємо

$$\bar{Q}^S \setminus Q^S \notin G^k.$$

Позначимо:  $\theta_j(\tilde{Q}^S)$  множина індексів елементів множини  $\tilde{Q}_j^S$ , яка не задовольняє наступній умові

$$\theta_j(\tilde{Q}^S) = \{l / f_i(x^{i \max}(\tilde{Q}^S / x_j = hjl)) \leq f_i^G$$

$$f_i(x^{i \max}(\tilde{Q}^S / x_j = hjl)) \leq f_i^H, \forall i, i = 0, \dots, m\},$$

позначимо також  $\tilde{l} = \max l / l \in \theta_j(\tilde{Q}^S)$ .

Оператор  $\bar{\infty}2$  позначимо так

$$\bar{\infty}2(\bar{Q}^S) = \{x / x_j \in \bar{Q}_j^S \setminus \bar{V}_j^S\},$$

де  $\bar{V}_j^S = \{h^S_{jl} / l < \tilde{l}\}$ .

Також як і оператор  $\alpha_1$  оператор  $\alpha_2$  стоїть у послідовному використанні до множини  $\tilde{Q}^S$  оператора  $\bar{\alpha}_1$  до тих пір поки не буде отримана множина  $Q^S$  така, що

$$\bar{\alpha}_2(Q^S) = Q^S.$$

Справедливим є наступне твердження - з  $\tilde{x} \in Q^S \setminus \alpha_2(Q^S)$   $\tilde{x} \in G^k$  випливає, що  $\tilde{x}$  не задовольняє умові б.

Дійсно, що з того що  $\tilde{x} \in Q^S \setminus \alpha_2(Q^S)$  слідує існування такої компоненти  $\tilde{x}_j$  плану  $\tilde{x}$ , що  $\tilde{x}_j = h_{j',l}, l < \tilde{l}$ . Розглянемо вектор  $\bar{x} \quad \bar{x}_j = \tilde{x}_j, j = 1, \dots, j'-1, j'+1, \dots, n, \quad \bar{x}_j = h_{j',l}$ . Так як раніше було прийнято припущення, що будь яка множина  $Q_j^S$  впорядкована у порядку зростання функції  $f_0(x)$  тобто  $f_0(x) > f_0(x)$ . З (9) випливає, що будь який  $x \in Q^S$   $\bar{x}_j = h_{j',l}$ , задовольняє системі умов (4) і, отже,  $\bar{x} \in G^k$  Це свідчить про те що  $\tilde{x}$  не задовольняє умові б.

Перш за все, треба виділити, що основний об'єм роботи розрахунків, необхідний для реалізації запропонованого алгоритму, робиться операторами розгалуження та відокремлення планів задачі, які не можуть бути її розв'язком. Застосування різноманітних тестів відбору варіантів, які є припустимими дозволяє суттєво підвищити ефективність алгоритму типу "гілки та границі" та послідовного аналізу варіантів [10, 12]. Однак, поряд з операторами, які реалізують відбір неприпустимих варіантів, алгоритми "гілок та границь" та послідовного аналізу варіантів потребують розрахунків оцінок функцій цілі для кожної підмножини, що аналізується, та пошуку серед висячих вершин дерев розв'язків вершини з

максимальною оцінкою функцій цілі. Алгоритм, що пропонується, передбачає розрахунок оцінок значень функцій цілі тільки 2 рази, а сортування висячих вершин дерев розв'язків не потребує зовсім.

### **6.3. Задача синтезу системи подачі нитки на круглов'язальних машинах для випадку перешкод у вигляді вертикальних ліній**

При проектуванні апаратів легкої промисловості виникає завдання визначення траєкторії нитки так, щоб сумарна сила тертя, яка діє на нитку, була мінімальною. Початкові умови завдання містять координати початкової точки (джерела) траєкторії, кінцевої точки (цілі) і координати перешкод, мимо яких повинна проходити нитку. Якщо траєкторія огинає перешкоду, виникає сила тертя, яка залежить від кута обхвату тієї, що направляє. Таким чином, завдання полягає у визначенні траєкторії з мінімальною сумою кутів обхвату ниткою тієї, що направляє.

Відрізками найбільшої товщини зображені перешкоди, відрізки середньої товщини відображають одну з можливих траєкторій нитки. Точки  $s$  і  $t$  відображають відповідно джерело і мету. Кожною перешкодою  $p_i$  є вертикальний відрізок і характеризується позицією точок – верхньою  $u_i$  і нижньою  $l_i$ . Приведена на рис.6.2 траєкторія  $T = (s, u_2, l_3, l_5, t)$  змінює напрям руху нитки в точках  $u_2, l_3, l_5$ . Кути зміни напрямку відповідно складають  $\alpha, \beta, \gamma$ , а оцінка цієї траєкторії, або значення цільової функції на ній складає

$$F(t) = \alpha + \beta + \gamma. \quad (6.9)$$

Надалі використовуватимемо кут нахилу відрізка траєкторії, під яким розумітимемо кут між направленим відрізком траєкторії у напрямі руху нитки і віссю  $X$ . При цьому враховуватимемо знак кута. Так, наприклад, відрізок  $(s, u_2)$  має позитивний кут нахилу, а  $(u_2, l_3)$  – негативний.

Відмітимо, що при обгинанні перешкоди у верхній крапці кут нахилу суміжних відрізків траєкторії зменшується, а в нижній – зростає.

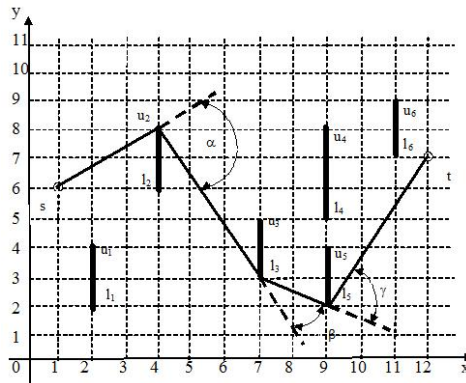


Рис.6.2. Приклад початкових умов завдання і допустимої траєкторії

Для визначення оптимальної траєкторії нитки пропонується скористатися моделлю у вигляді орієнтованого графа  $G = (V, E)$ , де  $V = \{v1, v2, \dots, v2n+2\}$  – безліч вершин,  $E = \{e1, e2, \dots, em\}$  – безліч ребер. Одна вершина  $vs$  графа  $G$  відповідає джерелу, друга вершина  $vt$  – цілі, а всі інші – кінцевим точкам перешкоди. Граф  $G$  містить ребро  $(vi, vj)$ , якщо можливе просування нитки від точки, яка відображається вершиною  $vi$  до точки, яка відображається вершиною  $vj$ . Граф  $G$  для початкових умов, показаних на рис.6.2, представлений на рис. 6.3. Для вершин графа застосовані позначення відповідних точок, а ребра зображені тонкими відрізками прямих. На малюнку навмисне залишені перешкоди (товсті відрізки), щоб наочно показати умови, яким задовольняють ребра графа  $G$ :

- 1) ребра не перетинають перешкоди;
- 2) для кожного ребра, що виходить з верхньої вершини  $ui$ , існує ребро  $el$ , що входить в  $ui$ , і кут нахилу ребра не більш ніж кут нахилу  $el$ ;
- 3) для кожного ребра, що виходить з нижньої вершини  $ui$ , існує ребро  $el$ , що входить в  $ui$ , і кут нахилу ребра не менше ніж кут нахилу  $el$ .

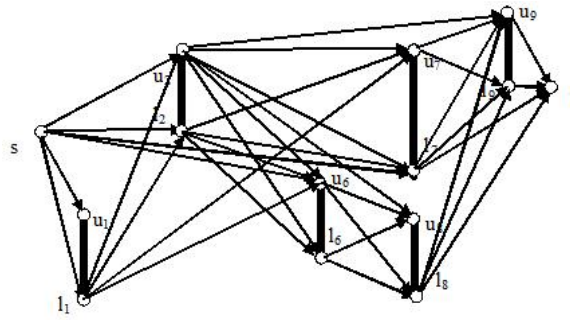


Рис.6.3. Граф  $G$  для початкових умов

Завдання пошуку шляху з вершини  $vs$  у вершину  $vt$  в графі  $G$  належить до класу завдань пошуку оптимального шляху графа. Відповідно до загальної методики вирішення завдань представленого класу необхідно визначити клас, до якого належить цільова функція. Приклад, приведений на рис.6.4, показує, що в завданні, яке розглядається, цільова функція належить до  $\gamma$ -класу. Дійсно, оптимальним  $(s, t)$ -шляхом для представленого графа є шлях  $r = (s, u1, u2, t)$ , якому відповідає значення цільової функції  $F(r) = \pi/6$ . Разом з тим, під шлях цього шляху  $q = (s, u1, u2)$  із значенням цільової функції  $F(q)$  не є оптимальним, оскільки існує інший шлях  $w = (s, l1, u2)$  з меншим значенням цільової функції  $F(w) < F(q)$ , а для шляху  $z = (s, l1, u2, t)$  маємо  $F(z) > 2\pi$ .

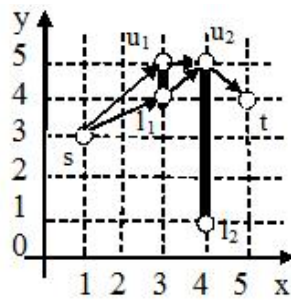


Рис.6.4. Визначення класу цільової функції

Як наголошувалося раніше, при цільовій функції, що належить до  $\gamma$ -класу, в процесі пошуку оптимального  $(s, t)$ -шляху треба запам'ятовувати всі шляхи в проміжні вершини, які не домінуються іншими шляхами. Це приводить до факторіальної, або експоненціальною, оцінці

обчислювальної і асимптотичній складності алгоритму. В той же час, як буде показано далі, облік специфічних властивостей представленого завдання дозволяє побудувати алгоритм з поліноміальною оцінкою.

Очевидною властивістю графа  $G$  є спрямованість кожного ребра  $(vi, vj)$  від вершини  $vi$  з меншим значенням координати  $X$  до вершини з великим значенням цієї координати.  $X$ -координата вершини  $vs$  має найменше значення, а  $vt$  - найбільше.

Значення цільової функції на довільному шляху  $p = (vs, v1, vб., v_b., v_{k-1}, vk)$  визначається як

$$F(p) = \sum_{i=1}^{k-1} |\alpha_i|,$$

де  $\alpha_i$  - кут між ребрами шляху  $p$ , які інцидентні вершині  $vi$ .

Тому при доповненні шляху  $p$  новим ребром  $(vk, vk+1)$  ( $p1 = p \cup (vk, vk+1)$ ) значення цільової функції збільшується на значення кута між ребрами  $(vk-1, vk)$  і  $(vk, vk+1)$

$$F(p_i) = F(p) + |\alpha_k|.$$

Отже, приріст цільової функції при доповненні шляху ребром однозначно визначається координатами нової точки  $vk+1$ , координатами останньої точки  $vk$  і кутом нахилу останнього ребра  $(vk-1, vk)$  шляху  $p$ .

Припустимо, існує інший шлях  $p' = (vs, v'1, v'б., v'_b., v'_r, vk)$ , якому відповідає значення цільової функції  $F(p')$ , і  $p'1 = p' \cup (vk, vk+1)$ . Тоді, якщо

$$F(p) + |\alpha_k| \leq F(p') + |\alpha'_k|, \quad (6.10)$$

де  $\alpha'_k$  - кут між ребрами  $(v'r, vk)$  і  $(vk, vk+1)$ .

Будь-яке доповнення шляху  $p1$  шляхом  $q$  має не більше значення цільової функції, чим доповнення  $p'1$  - шляхом  $q$ . Це означає, що набір параметрів  $Q$ , якими визначається домінування шляхів, для

представленого завдання містить два елементи: значення цільової функції і останнє ребро.

Кожне ребро  $(vk, vk+1)$  можна розглядати як останнє ребро  $(vs, vk+1)$  -пути. Враховуючи (6.10), ребру  $(vk, vk+1)$  доцільно поставити у відповідність мінімальне значення цільової функції  $(vs, vk+1)$  - шляху, який закінчується цим ребром. Позначимо це значення як  $f(vk, vk+1)$ . Якщо відомі значення функції  $f$  на всіх ребрах, які входять у вершину  $vk$ , то  $f(vk, vk+1)$  визначається наступним шляхом

$$f(v_k, v_{k+1}) = \min\{f(v_r, v_k) + \alpha((v_r, v_k), (v_k, v_{k+1}))\}, \forall (v_r, v_k) \in E, \quad (6.11)$$

где  $\alpha((v_r, v_k), (v_k, v_{k+1}))$  – угол между ребрами  $(v_r, v_k)$  и  $(v_k, v_{k+1})$ .

Співвідношення (6.11) зв'язує значення цільової функції на довгому шляху (траєкторії) і значення цільової функції на менш коротких шляхах і таким чином є рівняннями Белмана для представленого завдання. Оскільки на ребрах, які виходять з вершини  $vs$  функція  $f$  приймає нульове значення, починаючи з вершини  $vs$  і розглядаючи вершини графа  $G$  по порядку зростання координати  $X$ , можна визначити значення  $f$  на всіх ребрах графа  $G$ . Тоді оптимальне значення цільової функції  $Fmin$  на  $(s, t)$  - шляху визначається як

$$Fmin = \min\{f(v_r, v_t)\}, \forall (v_r, v_t) \in E.$$

Алгоритм пошуку оптимальної траєкторії нитки складається з двох етапів: 1) побудова графа  $G$  і 2) визначення ребра, інцидентного вершині  $vt$ , з мінімальним значенням функції  $f$ . Оскільки на обох етапах треба розглядати кінцеві точки перешкод в порядку зростання координати  $X$ , етапи виконуються не послідовно, а паралельно. Покроковий опис алгоритму має такий вигляд.

1. Упорядкувати перешкоди по неспівпаданню координати  $X$ , а перешкоди з однаковою координатою  $X$  упорядкувати по неспівпаданню



координати  $Y$  верхньої точки і помістити впорядковану сукупність перешкод в список  $L$ . Доповнити  $L$  двома виродженими перешкодами, які складаються з однієї точки - джерелом і метою. Джерело – перший елемент списку, а мета – останній.

2. Для кожної вершини  $v$ , яка належить  $L$ , сформувати порожній список  $I(v)$  вхідних ребер; покласти  $H(vs) = 2 * NP \pi$  ( $NP$  – кількість перешкод) для всіх вершин окрім  $vs$ . Покласти  $H(vs) = 0$  і  $R = 2 * NP \pi$ .

3. Вилучити перший елемент-вершину списку  $L$  і запам'ятати цю вершину  $v$ .

4. Якщо  $v = vt$ , перейти до кроку 1б.

5. Якщо  $H(vL) \geq R$ , перейти до кроку 3.

6. Для вершини  $vL$  визначити вершину  $v_N$  таку, що відрізок  $(vL, vN)$  розглядається вперше і не перетинає ні єдину перешкоду. Якщо така вершина не існує, перейти до кроку 3.

7. Якщо список  $I(vL)$  порожній, додати ребро  $(vL, vN)$  до графа  $G$ , покласти  $f(vL, vN) = 0$  і  $H(vL) = 0$ , внести  $(vL, vN)$  до списку  $I(vN)$  і перейти до кроку 6. Інакше покласти  $f(vL, vN) = 2 * NP \pi$  і встановити покажчик  $q$  поточного вхідного ребра на перший елемент списку  $I(vL)$ .

8. Вибрати поточний елемент  $(vL, vN)$  із списку  $I(vL)$ , і якщо для ребер  $(vP, vL)$  і  $(vL, vN)$  виконується умова 2) або 3), а також  $f(vP, vL) + \alpha((vP, vL), (vL, vN)) < f(vL, vN)$ , виконати наступні дії:

8.а) покласти  $f(vL, vN) = f(vP, vL) + \alpha((vP, vL), (vL, vN))$ ;

8.б) запам'ятати вершину  $vP$ , яка використовувалася при визначенні  $(vL, vN)$ , –  $P((vL, vN)) = vP$ ;

8.в) якщо  $f(vL, vN) < H(vN)$ , покласти  $H(vN) = f(vL, vN)$ .

9. Якщо існує наступний елемент списку  $I(vL)$ , встановити на нього покажчик  $q$  і перейти до кроку 8.

10. Якщо  $f(vL, vN) = 2 * NP \pi$ , перейти до кроку 6.

11. Якщо  $vN = vt$  і  $f(vL, vN) < R$ , покласти  $R = f(vL, vN)$  і запам'ятати передостанню вершину шуканого шляху –  $vf = vL$ . Перейти до кроку 6.

12. Визначити ребро шуканого шляху  $e = (vf, vt)$ .

13. Якщо  $vf = vs$  - кінець алгоритму. Інакше покласти  $v = P((vf, vt))$ ,  $vt = vf$ ,  $vf = v$  і перейти до кроку 16.

Зробимо зауваження, які відносяться до приведеного алгоритму. Оскільки в кожній точці значення кута зміни напрямку не перевищує  $\pi$ , а кількість точок дорівнює подвійній кількості перешкод, то величина  $2*NP\pi$  є верхньою оцінкою цільової функції на будь-якому шляху. Функція  $H(v)$  приймає поточне мінімальне значення цільової функції на  $(vs, v)$ -шляху і після аналізу всіх ребер, які входять у вершину  $v$ , дорівнює мінімальній вартості досягнення  $v$ .

На кроці 6 для поточної вершини  $vL$  визначаються всі початкові ребра. Для визначення кожного ребра розглядається кожна вершина  $v$ , у якої координата  $X$  більше, ніж в  $vL$ . Якщо ребро  $(vL, v)$  задовольняє умові 2) або 3), перевіряються перетини цього ребра зі всіма перешкодами, що мають координату  $X$  більшу, ніж у вершини  $vL$  і меншу, ніж у вершини  $v$ . При цьому вважається, що ребро  $(vL, v)$  перетинає перешкода  $p = (vu, vl)$ , якщо пряма, проведена через точки  $vL, v$ , містить точку з координатами  $(X(p), Y)$ , де  $X(p)$  –  $X$ -координата перешкоди  $p$ , і  $Y(vl) < Y < Y(vu)$  ( $Y(vl)$ ,  $Y(vu)$  -координати точок  $vl, vu$  відповідно). У разі відсутності перетинів  $(vL, v)$  включається в безліч  $E$  ребер графові  $G$ . Багаторазове виконання кроків 12, 13 забезпечує прохід від мети до джерела за допомогою функції  $P(e)$ , тобто по ребрах створюючим оптимальний  $(s, t)$ -шлях.

Проаналізуємо трудомісткість алгоритму. Перший крок впорядкування перешкод вимагає кількості операцій, яка складає  $O(NPlgNP)$ . Кількість операцій на другому кроці -  $O(NP)$ . Кроки 3-11

входять в цикл, кількість повторень якого дорівнює кількості вершин графа  $G$ , тобто складає  $O(NP)$ .

На кожній ітерації цього циклу на кроці 6 здійснюється аналіз кожної вершини  $vN$ ,  $X$ -координата якої більше  $X$ -координаті  $vL$ . Кількість таких вершин -  $O(NP)$ . Оскільки для кожної вершини  $vN$  при визначенні  $f((vL, vN))$  розглядаються всі ребра, які входять у вершину  $vL$ , кількість яких також  $O(NP)$ , кількість операцій для визначення  $f((vL, vN))$  складає  $O(NP)$ .

Для перевірки перетинів ребра  $(vL, vN)$  з перешкодами на кроці 6 аналізуються всі перешкоди, розташовані лівіше  $vN$  і правіше  $vL$ . Кількість таких перешкод буде рівна  $O(NP)$  і оскільки визначення  $f((vL, vN))$  і перевірка перетинів виконуються послідовно, кількість операцій обробки однієї вершини складає  $O(NP)$ . Тому кількість операцій обробки однієї вершини  $vL$  складає  $O(NP^2)$ , а всіх вершин списку  $L$  -  $O(NP^3)$ .

Кроки 12, 13 очевидно вимагають  $O(NP)$  операцій. Отже, загальна асимптотична обчислювальна складність алгоритму складає  $O(NP^3)$ .

Оцінимо витрати пам'яті, або асимптотичну ємкісну складність алгоритму. Для збереження списку  $L$  витрати пам'яті складають  $O(NP)$ . Оскільки для кожної вершини треба пам'ятати список вхідних ребер, кількість яких дорівнює  $O(NP)$ , загальна асимптотична ємкість складності алгоритму -  $O(NP^2)$ .

Розглянемо приклад застосування алгоритму до вхідних умов, показаних на рис.6.6. Після завершення аналізу вершини-джерела, побудована частина графа  $G$ , яка показана на рис.6.5.

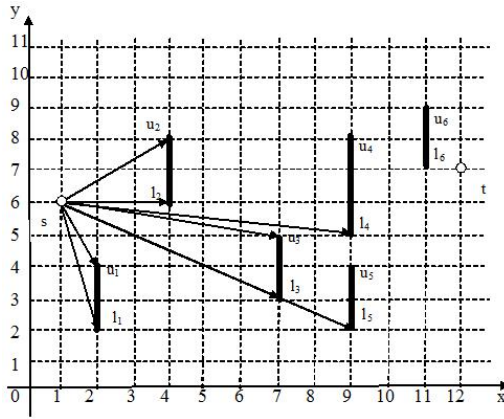


Рис.6.5. Частина графу з вершиною-джерела

Значення функції  $f$  для всіх ребер на рис.6.5 дорівнює нулю. Після розкриття вершин з координатою  $X \leq 7$  отримуємо ситуацію, зображену на рис.6.6.

Як показано на рис.6.6, при розкритті вершини  $l3$  досягається мета із значенням цільової функції  $F = \arctg(4/5) + \arctg(1/2) \approx 1,14$ . При цьому  $R \approx 1,14$  і  $P((l3, t)) = s$ . На наступному етапі маємо  $H(u6) = \arctg(2/3) - \arctg(1/7)$ ,  $H(l6) = \arctg(2/3) + \arctg(1/2)$ ,  $R = H(t) = \arctg(1/8) + \arctg(2/3) \approx 0,71$ . Оскільки  $H(l6) > R$ , вершина  $l6$  в подальшому не розкривається. Розкриття вершин  $u6$  і  $l5$  показує, що набути меншого значення  $R$  неможливо. Тому шлях  $(s, l4, t)$  – оптимальний.

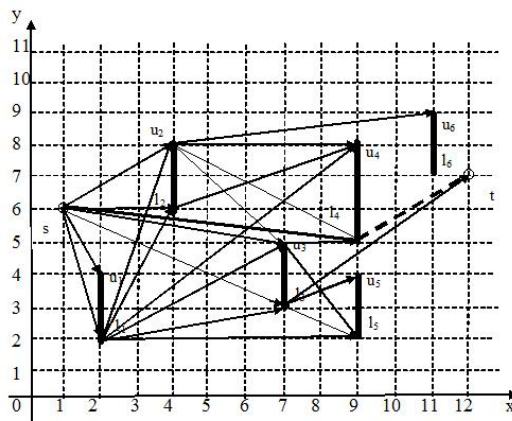
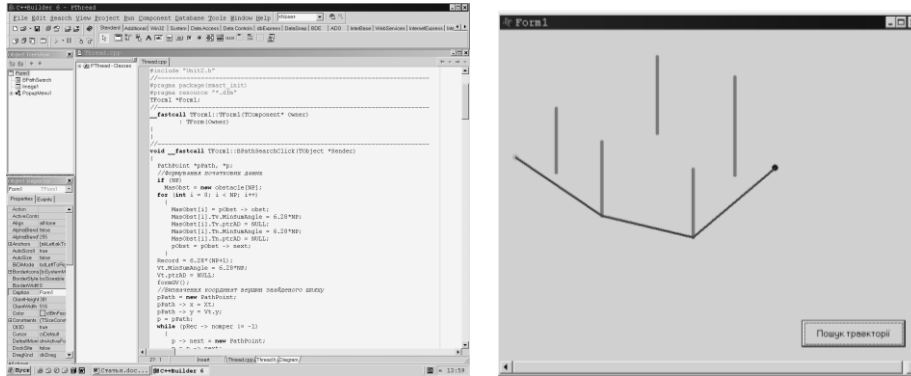


Рис.6.6. Кінцевий вигляд оптимальної траєкторії нитки

Викладені результати можуть бути застосовані при формах перешкод, які відрізняються від вертикальних відрізків. Наприклад, якщо

перешкодами є кола різних радіусів. В цьому випадку траєкторія нитки складатиметься з ділянок дотичних до двох кіл і відповідних дуг. Загальна схема алгоритму при цьому, в цілому, зберігається і відрізняється від описаної вище схеми технічними деталями.

На рис.6.7а та 6.7б показаний фрагмент реалізації програмного забезпечення, яке приведене в додатку Б.



а

б

Рис.6.7. Програмна реалізація алгоритму

#### 6.4. Оптимізація плоскої траєкторії нитки в круглов'язальних машинах у випадку перешкод у вигляді кіл

В даному підрозділі розглядається задача визначення траєкторії нитки у системі подачі нитки круглов'язальних трикотажних машин. Дана траєкторія являє собою послідовність відрізків прямої та дуг, що з'єднують вузол (джерело) первісного подавання нитки із вузлом (ціллю) кінцевого приймання. При умові, що траєкторія нитки лежить у одній площині, джерело, ціль та перешкоди представляються колами різних радіусів. Тоді прямолінійні ділянки нитки представляються відрізками дотичних до двох відповідних кіл, а ділянки, що обгинають перешкоди, - дугами відповідних радіусів. Запропоновано алгоритм визначення траєкторії, за якою сумарна сила тертя, що діє на нитку, набуває мінімального значення[12, 19-28].

При проектуванні системи подачі нитки на круглов'язальних трикотажних машинах виникає задача визначення траєкторії нитки таким чином, щоб сумарна сила тертя, що діє на нитку, була мінімальною. Вихідні умови задачі містять координати джерела, цілі та перешкод, які являють собою кола поданих радіусів. При обгинанні ниткою кожної перешкоди виникає сила тертя, пропорційна куту зміни напрямку руху [21]. Тому представляється доцільним формулювання задачі визначення оптимальної траєкторії нитки як задачі пошуку траєкторії з мінімальною сумою кутів зміни напрямку руху. Предметом дослідження в поданій роботі є властивості запропонованої цільової функції і побудова алгоритму розв'язання сформульованої задачі.

Нитка, траєкторію якої треба визначити, умовно розглядається як абсолютно гнучка, нерозтяжна та невагома. Траєкторія нитки складається з сукупності дотичних до кіл і дуг. Приклад вихідних умов і можливої траєкторії показаний на рис.6.8, де джерело має позначення  $s$ , ціль -  $t$ , а перешкоди - 1 і 2. Отже, подані координати центрів і радіуси кіл  $s$ ,  $t$ , 1 і 2. Серед усіх можливих траєкторій треба знайти таку, якій відповідає мінімальна сума кутів між усіма послідовними відрізками. Для траєкторії на рис.6.8 цільова функція дорівнює сумі двох кутів: між дотичними до кіл  $s$ , 1 та 1, 2 і 1, 2 та 2,  $t$ .

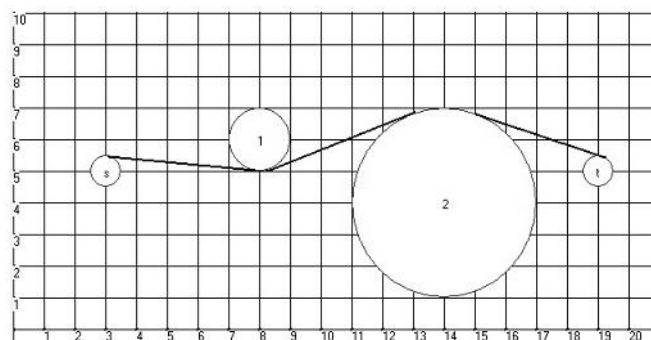


Рис.6.8. Вихідні умови задачі

Розв'язок задачі пошуку оптимальної траєкторії можна отримати, скориставшись моделлю у вигляді неорієнтованого графа  $G = (V, E)$

де  $V$  – множина вершин,

$E$  – множина ребер.

Множина вершин  $V$  складається з вершини  $s$ , яка відображає джерело, вершини  $t$ , яка відображає ціль, та сукупності вершин, які взаємно однозначно відповідають перешкодам. Множина ребер  $E$  взаємно однозначно відповідає відрізкам дотичних, що не перетинають перешкод.

Кожній перешкоді  $v$  ставиться у відповідність дві вершини графа – при огинанні зліва  $v_1$  і при огинанні справа  $v_2$ . Відрізки шляху задовольняють наступним умовам:

1. Для кожного ребра  $e_k$ , що входить у вершину  $v_1$  зліва, існує ребро  $e_l$ , що виходить з  $v_1$  і кут нахилу ребра  $e_k$  не більший ніж кут нахилу ребра  $e_l$ . Для кожного ребра  $e_k$ , що входить у вершину  $v_2$  справа, існує ребро  $e_r$ , що виходить з  $v_2$  і кут нахилу ребра  $e_k$  не менший ніж кут нахилу ребра  $e_r$ . Тобто при огинанні перешкоди зліва кут нахилу суміжних відрізків траєкторії спадає, а справа – зростає.
2. Ребра не перетинають перешкод.

Задача пошуку шляху з вершини  $s$  у вершину  $t$  у графі  $G$  належить до класу задач пошуку оптимального шляху графа [19, 21]. Як показано в [10], у задачі, що розглядається, цільова функція належить до  $\gamma$  - класу. Це видно з того, що оптимальний шлях може містити підшлях, який не є оптимальним. Приклад оптимального шляху, що містить неоптимальний підшлях показано на рис.6.9.

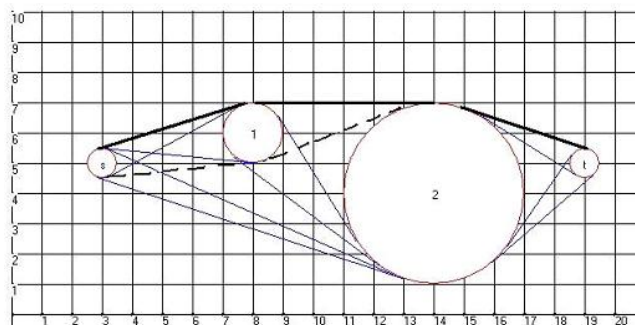


Рис.6.9. Шлях, що містить неоптимальний підшлях

Тому, у процесі пошуку оптимального  $(s,t)$ - шляху треба запам'ятовувати усі шляхи у проміжні вершини, які не домінуються іншими шляхами. Значення цільової функції на довільному шляху  $p=(s, v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_{k-1}, v_k)$  визначається таким чином

$$F(p) = \sum_{i=1}^{k-1} |\alpha_i|, \quad (6.12)$$

де  $\alpha_i$  – кут між ребрами шляху  $p$ , що інцидентні вершині  $v_i$ .

Тому при доповненні шляху  $p$  новим ребром  $(v_k, v_{k+1})$ ,  $(p_1 = p \cup (v_k, v_{k+1}))$  значення цільової функції збільшується на значення кута між ребрами  $(v_{k-1}, v_k)$  і  $(v_k, v_{k+1})$ .

$$F(p_1) = F(p) + |\alpha_k|. \quad (6.13)$$

Отже, приріст цільової функції при доповненні шляху ребром однозначно визначається координатами нової вершини  $v_{k+1}$ , координатами останньої вершини  $v_k$  і кутом нахилу останнього ребра  $(v_{k-1}, v_k)$  шляху  $p$ .

Припустимо, існує інший шлях  $p'=(s, v_1', v_2', \dots, v_i', \dots, v_{k-1}', v_k)$ , якому відповідає значення цільової функції  $F(p')$ , і  $p_1' = p' \cup (v_k, v_{k+1})$ . Тоді, якщо

$$F(p) + |\alpha_k| \leq F(p') + |\alpha_k'|, \quad (6.14)$$

де  $\alpha_k'$  – кут між ребрами  $(v_{k-1}', v_k)$  і  $(v_k, v_{k+1})$ , будь-яке доповнення шляху  $p_1$  шляхом  $q$  має не більше значення цільової функції, ніж доповнення  $p_1'$  шляхом  $q$ .

Це означає, що набір параметрів  $Q$ , за яким визначається домінування шляхів, для поданої задачі містить два елементи: значення цільової функції і останнє ребро.

Кожне ребро  $(v_k, v_{k+1})$  можна розглядати як останнє ребро  $(s, v_{k+1})$  - шляху. Враховуючи (6.14), ребру  $(v_k, v_{k+1})$  доцільно поставити у відповідність мінімальне значення цільової функції на  $(s, v_{k+1})$  - шляху, що закінчується цим ребром. Позначимо це значення як  $f(v_k, v_{k+1})$ . Якщо відомі



значення функції  $f$  на всіх ребрах, що входять у вершину  $v_k$ , то  $f(v_k, v_{k+1})$  визначається таким чином

$$f(v_k, v_{k+1}) = \min\{f(v_r, v_k) + \alpha((v_r, v_k), (v_k, v_{k+1}))\} \forall (v_r, v_k) \in E, \quad (6.15)$$

де  $\alpha((v_r, v_k), (v_k, v_{k+1}))$  – кут між ребрами  $(v_r, v_k)$  і  $(v_k, v_{k+1})$ .

Співвідношення (6.15) зв'язує значення цільової функції на довільному шляху та значення цільової функції на коротших шляхах. Оскільки на ребрах, що виходять з вершини  $s$ , функція  $f$  приймає нульове значення, починаючи з вершини  $s$  і розглядаючи вершини графа  $G$  в певній послідовності, можна визначити значення  $f$  на всіх ребрах графа  $G$ . Тоді оптимальне значення цільової функції  $F_{min}$  на  $(s, t)$ -шляху визначається як

$$F_{min} = \min\{f(v_r, v_t)\} \forall (v_r, v_t) \in E \quad (6.16)$$

Будь-який підшлях  $(s, v_i)$  оптимального шляху  $(s, t)$  при заданому куті нахилу ребра  $(v_{i-1}, v_i)$  оптимальний. Тому для кожної досягнутої вершини  $v_i$  в процесі пошуку достатньо запам'ятовувати оцінку ребра  $(v_{i-1}, v_i)$  і його кут нахилу.

В [10, 12] запропоновано застосування розглянутого алгоритму для розв'язання задачі визначення траєкторії з мінімальною сумою кутів зміни напрямку руху нитки, коли перешкоди представляються відрізками прямих перпендикулярних до переважного напрямку. Обчислювальна складність алгоритму, запропонованого в [12] дорівнює  $O(n^3)$ , де  $n$  – кількість вершин моделі, або кількість перешкод.

Покажемо, що для розв'язання розглянутої задачі можна застосувати і іншу модель, основна позитивна риса якої полягає в тому, що цільова функція належить до класу  $\alpha$ -функцій. Це дає змогу застосовувати класичні алгоритми пошуку оптимального шляху в графі. Побудуємо модель у вигляді орієнтованого графа  $G^* = (V^*, E^*)$ , де  $V^*$  – множина вершин,  $E^*$  – множина ребер. Множина вершин  $V^*$  взаємно однозначно відповідає відрізкам дотичних, які не перетинають перешкод. Дві вершини

$v_i, v_j$  з'єднуються ребром тоді і тільки тоді, коли відповідні відрізки дотичні до спільної перешкоди  $p$ , і перехід від відрізка, що відповідає  $v_i$ , до відрізка  $v_j$  задовольняє умові обгинання  $p$ . Кожному ребру множини  $E$  присвоюється вартість, яка дорівнює куту між відповідними дотичними.

В моделі  $G^*$  вартість будь-якого шляху  $w$  дорівнює сумі вартостей ребер, що належать  $w$ . Тому задача пошуку оптимальної траєкторії зводиться до визначення в  $G^*$  найкоротшого шляху, що з'єднує деяку вершину, якій відповідає відрізок дотичний до джерела, з вершиною, якій відповідає відрізок дотичний до цілі. Іншими словами отримуємо задачу пошуку найкоротшого шляху в графі з декількома джерелами і декількома цілями.

Для розв'язання останньої задачі можна скористатися відомими алгоритмами і, зокрема, алгоритмом Дейкстри, обчислювальна складність якого дорівнює  $O(n^2)$ , де  $n$  – кількість вершин моделі  $G^*$ , або кількість відрізків дотичних до перешкод.

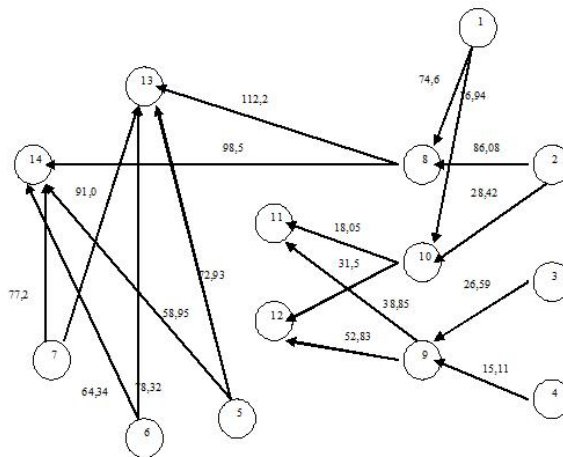


Рис.6.10. Модель для розв'язання задачі

Для прикладу візьмемо вихідні умови задачі, зображені на рис.6.8. Модель для розв'язання задачі показана на рис.6.10.

Модель, побудовану вказаним способом, можна спростити. Спочатку виконаємо операцію злиття тих вершин графа, які відповідають відрізкам прямих, що виходять з джерела. А потім тих вершин, які відповідають відрізкам прямих, що входять в ціль. Спрощений таким чином граф зображено на рис.6.11.

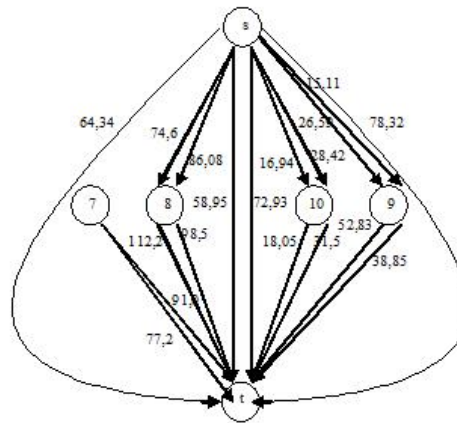


Рис.6.11. Модель для розв'язання задачі після виконання операції злиття вершин

Якщо в отриманому мультиграфі з вершини  $v_m$  у вершину  $v_n$  ведуть декілька ребер, то на другому етапі спрощення моделі серед цих ребер вибирається лише те, яке має мінімальну вартість. Спрощений таким чином граф зображено на рис.6.16.

Далі, застосовуючи алгоритм Дейкстри, отримаємо найкоротший шлях з  $s$  в  $t$ , який для даної моделі дорівнює 34,99. На основі загального підходу оптимізації шляхів у графі розроблено алгоритм з асимптотичною обчислювальною складністю  $O(n^3)$  для розв'язання задачі пошуку оптимальної траєкторії нитки на площині при умові, що перешкоди представляються колами. Запропоновано модель для розв'язання задачі визначення траєкторії нитки, за якої сила тертя, що діє на нитку, набуває мінімального значення. Для побудованої моделі застосовано алгоритм Дейкстри, який має обчислювальну складність  $O(n^2)$ . Отримані результати можуть бути узагальнені на випадок перешкод довільної форми, коли

можливі відрізки траєкторії нитки між сусідніми перешкодами визначаються однозначно формою цих перешкод.

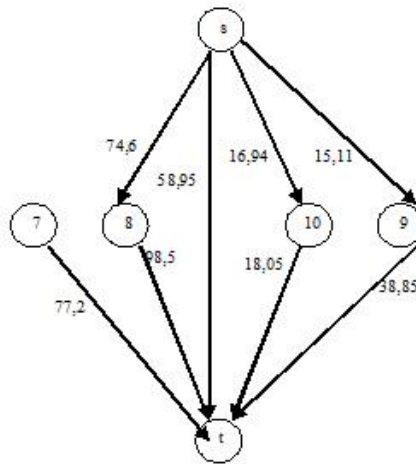


Рис.6.16. Остаточний вигляд моделі для розв’язання задачі

### 6.5. Програмна реалізація алгоритму пошуку оптимальної траєкторії заправки нитки в круглов’язальних машинах

В додатку Б представлений програмний код. Дана програма складається з одного модуля MainUnit.pas, що відповідає головній формі програми. Для зручності користування програмою створено меню за допомогою компонента MainMenu. Для відображення графічної інформації використано компонент Image, а прокрутка зображення реалізована за допомогою елементів керування ScrollBar. Для реалізації можливостей завантаження даних з файлу та збереження їх у файл використано елементи OpenFileDialog та SaveDialog відповідно.

Для збереження даних та їх використання під час розрахунків використані такі структури даних як TList та Record.

З метою зменшення програмного коду створено процедури та функції, які неодноразово використовуються у програмі. Основні з них описано нижче.

- Функція

FindAngle(x1\_1,y1\_1,x1\_2,y1\_2,x2\_1,y2\_1,x2\_2,y2\_2:real):real шукає кут

між двома дотичними. Параметрами функції є координати точок дотику першої та другої дотичних.

- Функція `FindNaklon(x1,y1,x2,y2:real):real` розраховує кут нахилу дотичної.

- Функція `FindCross(x1,y1,x2,y2,xc,yc,R:real):boolean` перевіряє перетин відрізка дотичної з колом.

- Процедура `DrawAxis(sx,fx,sy,fy:integer)` рисує на компоненті `Image` вісі координат та координатну сітку.

- Процедура `DrawMyEllipse(xc,yc,R:real;mytype:string)` рисує коло з заданими параметрами (координати центра та радіус) та ставить номер цього кола.

- Процедура `ReDrawEllipse(shift_x,shift_y:integer)` перерисовує кола, які вже існують, дотичні (якщо вони побудовані) та шлях (якщо він знайдений). Ця процедура використовується під час прокрутки зображення, зміні масштабу, побудові моделі, редагуванні та в інших випадках.

- Процедура `BuildTangent(e11,e12:string;xc1,yc1,R1,xc2,yc2,R2:real)` знаходить координати точок дотику спільної дотичної до двох кіл та заносить ці дані у список дотичних.

- Процедура `Koord(u,v:real)` переводить математичні координати до координат приладу.

- Процедура `MathKoord(ks,et:real)` переводить координати приладу до математичних координат.

Для ефективного використання програми та запобігання виникненню проблем необхідно ознайомитися з даною інструкцією.

Запуск програми здійснюється файлом `Project1.exe`.

Для роботи з програмою створене меню, зображене на рис. 5.1, яке складається з наступних пунктів:

Файл; Вихідні дані; Пошук; Убрати модель; Розміри поля; Редагування; Масштаб; Очистити.

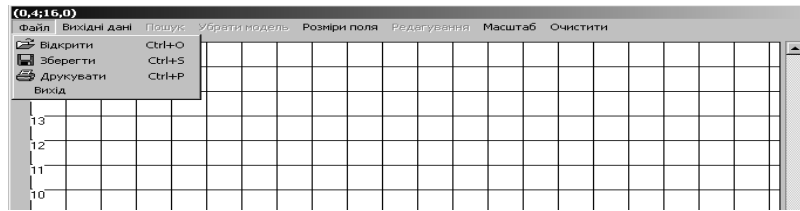


Рис.6.13. Меню для роботи з програмою

Розглянемо меню Файл. Поки не задані вихідні умови задачі, деякі пункти меню, а саме: Пошук, Убрати модель, Редагування, знаходяться в неактивному стані. Для зручності вихідні умови задачі можна завантажити з файлу, в якому зберігаються координати джерела, цілі і перешкод та їх радіуси. Для завантаження вихідних даних з файлу необхідно вибрати в меню “Файл” підпункт “Відкрити”. Коли вибрано цей пункт, на екрані з’являється діалогове вікно “Відкрити”, де можна обрати необхідний файл з даними. Для можливості збереження даних створено підпункт “Зберегти”. Після обрання цього пункту умови задачі зберігаються в обраному файлі.

У будь-який час роботи з програмою є можливість вивести на принтер зображення форми. Для цього необхідно вибрати підпункт “Друківання” та у вікні, що з’явиться, підтвердити бажання вивести форму на друк. Коректний вихід із програми здійснюється кнопкою “Вихід”.

Розміри поля можна задати, вибравши в меню пункт “Розміри поля”. При цьому з’являється вікно, яке показано на рис. 6.14, для введення максимального значення координати X та Y.

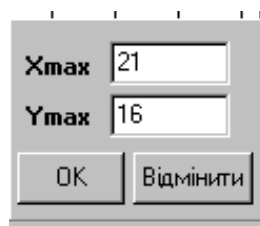
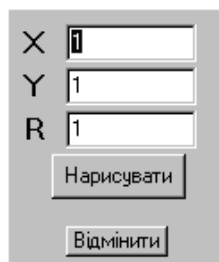


Рис.6.14. Вікно для завдання розмірів поля

Пункт меню “Вихідні дані” дозволяє вручну вводити вихідні дані задачі. Підпункти “Джерело” та “Ціль” дозволяють задати координати джерела та цілі відповідно, а також їх радіуси. Для унеможливлення введення більш ніж одного джерела або цілі ці підпункти меню стають неактивними. Якщо дані були завантажені з файлу, в якому вже були вказані характеристики джерела та цілі, то ці підпункти стають неактивними.

Додати перешкоду можна за допомогою кнопки “Коло”. При цьому з'являється панель, яка зображена на рис. 6.15, з полями, в які необхідно вводити дані, а саме: координати центра кола та його радіус. Для того щоб нарисувати це коло необхідно натиснути кнопку “Нарисувати”. Також є можливість відмінити введення даних, натиснувши кнопку “Відмінити”. Після введення даних автоматично здійснюється перевірка на перетин цього кола з іншими колами. Якщо це коло перетинає будь-яке коло, яке було задано раніше, то з'явиться попередження про неможливість додання такого кола. Підпункт меню “Відмінити” дозволяє відмінити введення останнього кола.



X	<input type="text" value="1"/>
Y	<input type="text" value="1"/>
R	<input type="text" value="1"/>
<input type="button" value="Нарисувати"/>	
<input type="button" value="Відмінити"/>	

Рис.6.15. Вікно для введення параметрів кола

Коли виникає необхідність внести зміни у розташування джерела, цілі або перешкод, то немає необхідності відмінити введення. Для цього випадку в програмі передбачена можливість редагування координат центру. В меню “Редагування”, яке стає активним після введення хоча б одної перешкоди, необхідно вибрати пункт “Почати”. У верхньому правому куті з'явиться напис “Редагування”. Після цього, навівши курсор

на коло, перетягти його у інше місце. Після наведення курсору на коло він змінює свій вигляд. Програмою передбачена перевірка на перетинання колом інших кіл. Якщо перетягти коло так, щоб воно перетинало інше, то це коло повернеться на своє початкове місце розташування. Режим редагування зображений на рис. 6.16. Для закінчення редагування необхідно вибрати пункт “Закінчити”. Після цього змінювати розташування кіл стає неможливим.

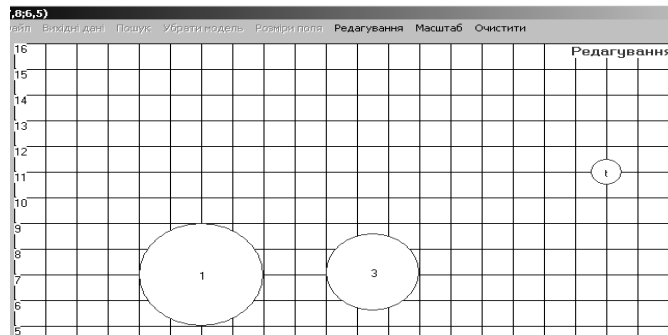


Рис.6.16. Режим редагування

Розглянемо “Меню Пошук”. Перед тим, як знайти шлях необхідно побудувати модель. Підпункт “Модель” стає активним, якщо були задані координати джерела та цілі. Після натискання цієї кнопки будується та з’являється на екрані модель для розв’язання задачі. Після цього є можливість знайти розв’язок задачі, вибравши підпункт “Шлях”. Якщо розв’язок задачі знайдено, то на екрані цей шлях буде виділено зеленим кольором. В лівому нижньому куті екрану з’явиться напис “Сумарний кут” та число, що є розв’язком задачі. Приклад знайденого шляху зображено на рис. 6.17.

Для зручності перегляду результатів є можливість убрати модель для розв’язання задачі, натиснувши кнопку “Убрати модель”. При цьому на екрані залишаються лише перешкоди та знайдений шлях, як показано на рис. 6.18.

Якщо у користувача виникають сумніви щодо правильності знаходження шляху, то дана програма передбачає знаходження значення



цільової функції по вибраним вручну ребрам. Така можливість з'являється після побудови моделі і нею можна скористатися до пошуку шляху або після його знаходження. Для виділення ребер в меню “Редагування” треба вибрати пункт “Ребра”. Після цього з'являється можливість вибрати необхідні ребра, клацнувши по ребру мишею. При цьому змінюється вигляд курсору і ребро виділяється червоним кольором. Після виділення всього шляху можна знайти значення цільової функції, вибравши в меню “Редагування” пункт “Пошук по ребрам”. Знайдене значення з'являється в лівому нижньому куті екрану.

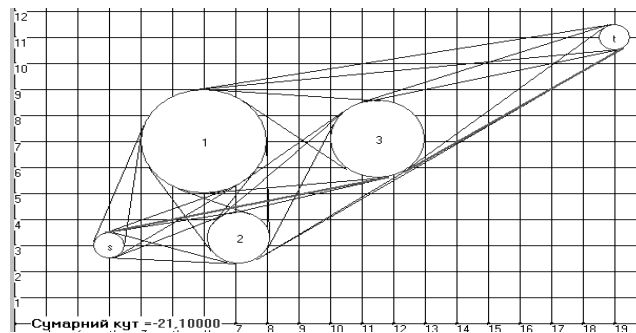


Рис.6.17. Результат роботи програми

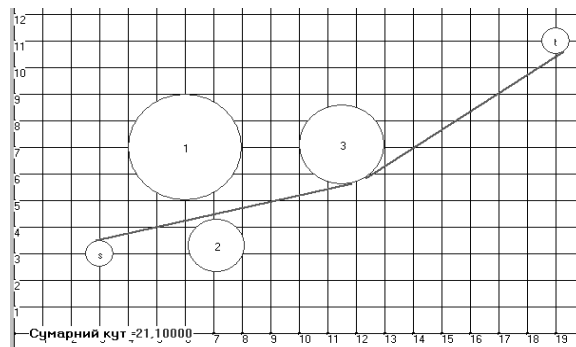


Рис.6.18. Результат роботи програми після прибрання моделі

Якщо картинка повністю не відображається на екрані, то можна зменшити масштаб, вибравши відповідний пункт в меню “Масштаб”. При бажанні розглянути знайдену траєкторію більш детально, масштаб можна збільшити. Для продовження роботи з програмою можна вибрати пункт меню “Очистити” і вводити нові дані.

### **6.6. Математичне та програмне забезпечення системи проектування лінії заправки в круглов'язальних машинах у просторі**

Пружна система заправки є складовою частиною системи подачі нитки технологічного устаткування. Недосконалість структури пружної системи заправки не дозволяє здійснювати мінімізацію натягу в процесі роботи технологічного устаткування і призводить до порушення технологічного режиму, обривам. В першу чергу, на це впливає недосконалість форми пружної системи заправки, нитконапрямних елементів, великими кутами охоплення ниткою напрямних, нерівномірність нитки по діаметру, що зумовлено її структурою і матеріалом, специфікою виготовлення нитки, довжиною окремих філаментів та їх взаємним розташуванням відносно один до одного, а також нерівномірність вхідного натягу[1, 10,12].

Розробка оптимальної форми пружної системи заправки трикотажних машин можна ефективно здійснювати з використанням ЕОМ. На рис.6.19 представлена загальна графічна схема робочої зони трикотажної машини. Її розміри визначаються як її конструкцією, так і функціональним призначенням. Розробка програмного забезпечення, блок-схема якого представлена на рис.6.20, необхідно з визначення габаритних розмірів проектуємої пружної системи заправки. Її розміри визначаються як її конструкцією, так і функціональним призначенням.

Наступним етапом буде визначення координат закритих зон. Під цим терміном будемо мати на увазі ті ділянки, через які нитка не може проходити. Це різні елементи станини трикотажної машини, допоміжні механізми. До цих зон можна віднести ділянки загального простору робочої зони трикотажної машини, де необхідно забезпечити нормальні умови обслуговування трикотажної машини.

До вхідних даних, при розробці основ математичного та програмного забезпечення САПР форми пружної системи заправки трикотажних

машин, необхідно віднести величину натягу нитки перед зоною в'язання, довжину нитки в зоні подачі нитки, координати точок входу та виходу з робочої зони трикотажної машини.

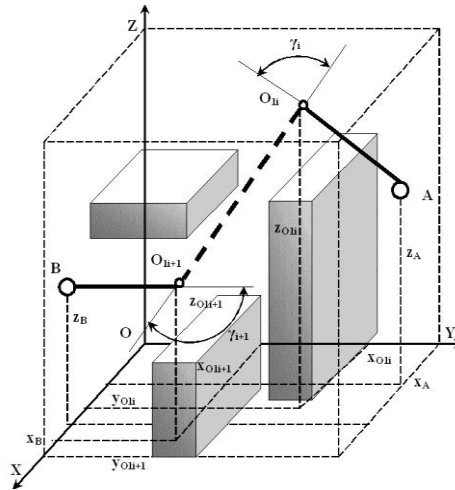


Рис.6.19. Графічна схема робочої зони трикотажної машини

При побудові форми пружної системи заправки трикотажних машин, на початковому етапі, приймаємо нульовий варіант, коли нитка після вихідного отвору А (після балону) не має точок перегину і потрапляє в точку В (зона в'язання). У випадку, коли пряма АВ перетинає закриті зони, програма обирає із сформованого масиву першу точку перегину. Після цього знову будується нова пряма, яка єднає останню точку з точкою виходу В. Знову виконується перевірочний розрахунок. Коли умова не виконується, обирається наступна точка перегину.

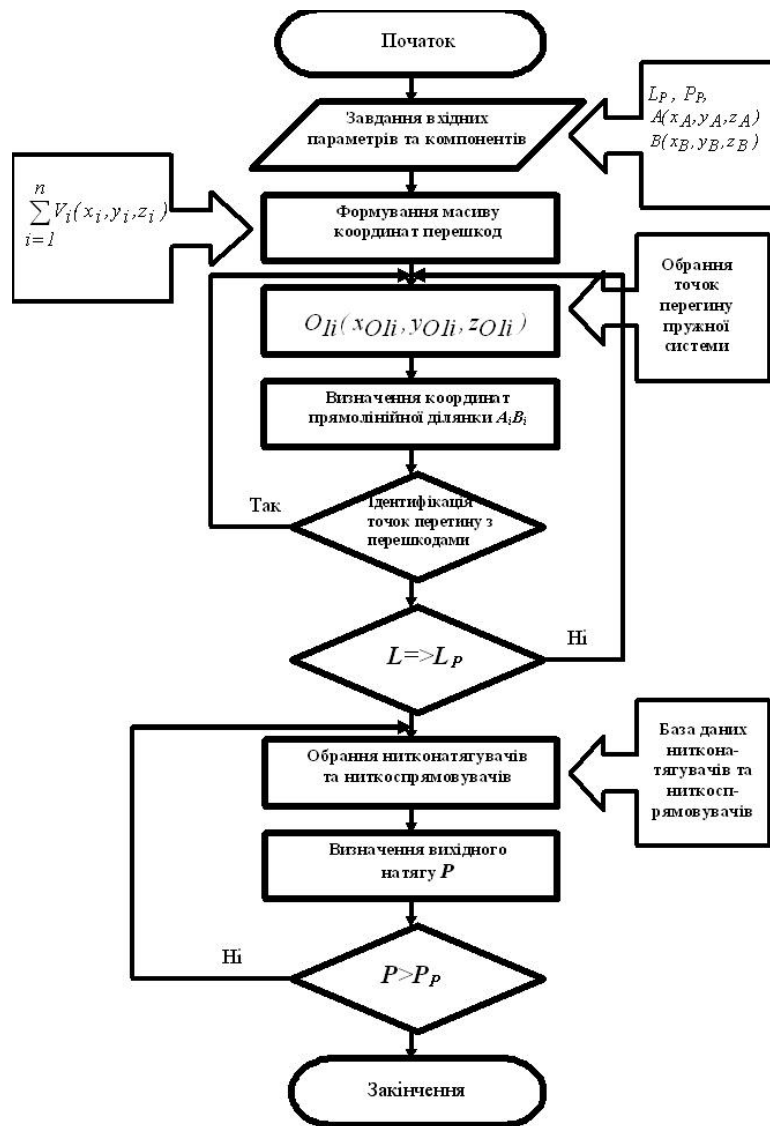


Рис.6.20. Блок-схема алгоритму побудови форми пружної системи заправки

Отримана форма пружної системи заправки трикотажних машин перевіряється на предмет заданої довжини нитки. Цю вимогу необхідно виконати для забезпечення необхідної жорсткості нитки при розтягненні. При малій довжині приведений коефіцієнт жорсткості буде більшим, а при більшій довжині збільшуються розміри зони подачі нитки.

Після формування пружної системи заправки обираються нитконапрямні та нитконатягувальні елементи системи подачі нитки. Для цього використовуються підпрограми визначення вихідного натягу для нитконатягувачів.

Далі, згідно з наведеною блок-схемою (рис.6.20), здійснюється перевірка отриманого значення вихідного натягу в точці В з заданим. У випадку його підвищеного значення необхідно зменшити величину кута охоплення отворів нитконатягувача чи змінити форму пружної системи заправки трикотажної машини. Число нитконатягувачів в розрахунках приймалося рівним одному. Це пояснюється тим, що існуючі нитконатягувачі можуть змінити величину натягу в досить широких межах. На рис.6.21 представлена розрахункова схема для визначення кута охоплення для  $i$ - напрямляючої в точці перегину. Система рівнянь для його визначення має вигляд

$$\begin{aligned}
 O_{Li}E_i &= z_{O_{Li}} - z_{B_i}, \quad O_{Li}K_i = z_{O_{Li}} - z_{A_i}, \\
 \beta_i &= \beta_{1i} + \beta_{2i}, \quad \alpha_i = \alpha_{1i} + \alpha_{2i}, \quad \gamma_i = \alpha_i + \beta_i, \\
 E_iB_i &= \sqrt{(x_{O_{Li}} - x_{B_i})^2 + (y_{B_i} - y_{O_{Li}})^2}, \\
 K_iA_i &= \sqrt{(x_{A_i} - x_{O_{Li}})^2 + (y_{O_{Li}} - y_{A_i})^2}, \\
 O_{Li}B_i &= \sqrt{(x_{O_{Li}} - x_{B_i})^2 + (y_{B_i} - y_{O_{Li}})^2 + (z_{O_{Li}} - z_{B_i})^2}, \\
 O_{Li}A_i &= \sqrt{(x_{O_{Li}} - x_{A_i})^2 + (y_{A_i} - y_{O_{Li}})^2 + (z_{O_{Li}} - z_{A_i})^2}, \\
 O_{Li}B_i &= \frac{R_i}{\sin \beta_{1i}} = \frac{O_{Li}E_i}{\sin \beta_{2i}}, \quad O_{Li}A_i = \frac{R_i}{\sin \alpha_{1i}} = \frac{O_{Li}K_i}{\sin \alpha_{2i}}, \quad \alpha_{1i} = \arcsin\left(\frac{R_i}{O_{Li}A_i}\right), \\
 \alpha_{2i} &= \arcsin\left(\frac{O_{Li}K_i}{O_{Li}A_i}\right), \quad \beta_{1i} = \arcsin\left(\frac{R_i}{O_{Li}B_i}\right), \quad \beta_{2i} = \arcsin\left(\frac{O_{Li}E_i}{O_{Li}B_i}\right),
 \end{aligned} \tag{6.17}$$

де  $x_{O_{Li}}, y_{O_{Li}}, z_{O_{Li}}$  - координати  $i$  – циліндричної напрямної;

$x_{A_i}, y_{A_i}, z_{A_i}$  - координати  $i$  – точки перегину;

$x_{B_i}, y_{B_i}, z_{B_i}$  - координати  $i+1$  – точки перегину;

$R_i$  - радіус  $i$  – циліндричної напрямної;

$\gamma_i$  - сумарний кут охоплення ниткою  $i$  – циліндричного ниткоспрямовувача.

Система (6.17) використовується для реалізації алгоритму при побудові точок перегину. Реалізація алгоритму дозволила удосконалити форму пружної системи заправки для круглов’язальних машин.

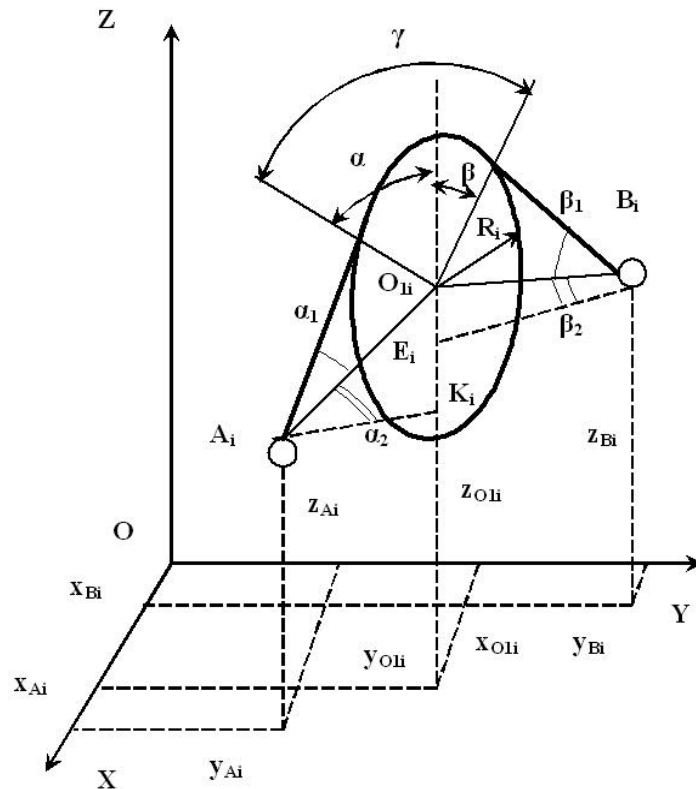


Рис.6.21. Розрахункова схема

1. Аналіз структурних схем лінії заправки нитки круглов'язальних машин показав, що вони мають дуже складну конфігурацію, як у площині так і у просторі габаритних розмірів. В точках зламу лінії заправки має місце взаємодія нитки з направляючими отворами спрямовувачів нитки, пристроями що забезпечують натяг нитки.

6. Вперше проведено теоретичне обґрунтування обчислювальної схеми алгоритму послідовної оптимізації, що мінімізує пошуки в дереві варіантів, що дало змогу виконати обчислювальну реалізацію алгоритму послідовної оптимізації, що мінімізує пошуки в дереві варіантів.

3. На основі реалізації розробленого алгоритму вирішена задача синтезу системи подачі нитки на круглов'язальних машинах для випадку перешкод у вигляді вертикальних ліній та розроблено програмне забезпечення для пошуку оптимальної форми заправки нитки на круглов'язальній машині.

4. На основі застосованого алгоритму Дейкстри виконана оптимізація плоскої траєкторії нитки в круглов'язальних машинах у випадку перешкод у вигляді кіл.
5. Виконана програмна реалізація алгоритму пошуку оптимальної траєкторії заправки нитки в круглов'язальних машинах.
6. На основі системного аналізу отримане математичне та програмне забезпечення системи проектування форми лінії заправки в круглов'язальних машинах у просторі, що дозволило оптимізувати конструктивні параметри.

---

## ЗАГАЛЬНІ ВИВОДИ, РЕКОМЕНДАЦІЇ І ПЕРСПЕКТИВНІ ПИТАННЯ

З позицій розроблених наукових основ взаємодії ниток з направляючими викладені обґрунтовані технічні і технологічні рішення, реалізація яких вносить помітний внесок до науково-технічного прогресу, а саме, при вдосконаленні технологічних процесів і устаткування текстильної і легкої промисловості.

Вирішення наукової проблеми по розробці основ взаємодії ниток з направляючими при формуванні тканини і трикотажу дозволило отримати наступні основні результати:

1. Виконані комплексні теоретичні дослідження по:

- визначенню головних компонентів кривизни і кручення осі нитки з урахуванням зминання в зоні контакту з направляючою поверхнею довільного профілю;

- визначенню швидкості і прискорення точок осі ниток здатних до деформації в перетині при її русі по направляючій великій кривизни;

- опису динаміки процесу взаємодії здатних до деформації в перетині, жорстких на вигин ниток з направляючою великою кривизни з урахуванням і без урахування її деформації.

2. Розробка основ механіки здатної до деформації в перетині, жорсткої на вигин нитки дозволила вирішити ряд конкретних завдань механіки нитки:

- отримати вирази для визначення форми осі і натягнення нитки у разі подовжнього і поперечного ковзання по напрямній з урахуванням сили тяжіння, коефіцієнта жорсткості на вигин;

- у полі сили тяжіння визначити форму рівноваги жорстких на вигин ниток з двома точками закріплення;

- описати процес взаємодії здатних до деформації в перетині, жорстких на вигин ниток з направляючими великою кривизни;



- встановити вплив форми направляючої поверхні на натяг монониток, комплексних ниток і пряжі.

- здійснити вибір критеріїв оптимізації розмірів спрямовувачів нитки різних трикотажних машин;

3. Для реалізації планів експериментальних досліджень і перевірки правильності і коректності зроблених допущень при теоретичних дослідженнях:

- запропоновані методи і розроблені установки, захищені авторськими свідоцтвами та патентами України, для визначення натягу ниток при їх взаємодії з напрямними, натягувачами нитки і робочими органами машин легкої і текстильної промисловості з урахуванням фізико-механічних властивостей (змінання, жорсткості на вигин, анізотропії тертя);

- відповідно до планів експерименту для 15 видів ниток реалізований ортогональний план 2-го порядку за визначенням впливу натягу веденої гілки, кута обхвату, радіусу кривизни направляючої поверхні і швидкості руху нитки на натяг ведучої гілки, визначені відповідні коефіцієнти в рівняннях регресії, які з 95% довірчою вірогідністю описують даний процес;

- встановлений зв'язок між умовами взаємодії ниток з направляючою і їх питомим розривним навантаженням і відносним розривним подовженням після проходження останньої;

- за наслідками експериментальних досліджень підтверджена прийнятність використання визначених раніше критеріїв по вибору розмірів спрямовувачів нитки і робочих органів машин легкої і текстильної промисловості з урахуванням змінання і жорсткості на вигин, що дозволило зменшити відносний натяг в робочій зоні на 10.45%, зменшити обривність на 16.35%;

- запропоновані принципово нові способи визначення натягу ниток при взаємодії з приладами для натягу нитки, що дозволило розробити

рекомендації для їх істотної модернізації.

4. Реалізація комплексних теоретико-експериментальних досліджень дозволила отримати наступні практичні результати:

- виходячи з реальних умов взаємодії ниток з направляючими, оптимізувати геометричні розміри останніх для кожного конкретного виду ниток;

- отримати пакети прикладних програм для визначення технологічних зусиль при переробці ниток на технологічному устаткуванні, регресійні залежності, нові методи визначення фізико-механічних властивостей тканин і ниток з них можуть бути використані на машинобудівних підприємствах, фабриках, НДІ даного профілю для модернізації існуючого устаткування і розробки нового;

- результати теоретичних і експериментальних досліджень упровадити в учбовий процес Київського національного університету технологій і дизайну при читанні спеціального розділу "Математичне моделювання", "Основи механіки нитки".

5. До найбільш перспективних питань даного наукового напрямку можна віднести наступні:

- визначення впливу будови нитки на умови її взаємодії з направляючими поверхнями великої кривизни довільного профілю;

- вивчення взаємодії ниток з направляючою поверхнею, що деформується, з урахуванням анізотропії фізико-механических властивостей як нитки, так і направляючої;

- розробка універсальних вимірювальних комплексів для дослідження взаємодії ниток з спрямовувачами і натягувачами нитки сучасного технологічного устаткування;

- вдосконалення конструкції спрямовувачів і натягувачів нитки трикотажних машин і, як наслідок, вдосконалення системи подачі нитки на основі стабілізації і мінімізації натягу нитки перед зоною в'язання.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Щербань В.Ю. Механика нити/В.Ю.Щербань, О.Н.Хомяк, Ю.Ю.Щербань. -К.:Бібліотека офіційних видань, 2002.- 196 с.
2. Щербань В.Ю. Вступ до механіки зім'ятих ниток і основні питання її застосування.-К.:НМК ВО, 1992. - 52 с.
3. Ресурсоощадні технології виробництва текстилю, одягу та взуття: монографія: в 2 т. Т.1/Теоретичні основи та методи розроблення ресурсоощадних технологій та обладнання для виробництва текстилю, одягу та взуття/ В.Ю.Щербань, Б.Ф.Піпа, В.В.Чабан та ін. – К.:КНУТД, 2016. – 373 с.
4. Ресурсоощадні технології виробництва текстилю, одягу та взуття: монографія: в 2 т. Т.2/Підвищення надійності ресурсоощадних виробництв текстилю, одягу і взуття на основі новітніх технологій та системного управління/ В.Ю.Щербань, Б.Ф.Піпа, В.В.Чабан та ін. – К.:КНУТД, 2016. – 214 с.
5. Ресурсоощадні технології та обладнання швейної та текстильної промисловості: монографія: в 2 ч. Ч.1/Наукові основи та інженерні методи проектування ресурсоощадних технологій і обладнання швейної та текстильної промисловості/ В.Ю.Щербань, Г.Б.Параска, Б.В.Орловський та ін. – К.:КНУТД, 2015. – 339 с.
6. Ресурсоощадні технології та обладнання швейної та текстильної промисловості: монографія: в 2 ч. Ч.2/Шляхи підвищення ефективності швейної та текстильної галузей України на базі новітніх технологій та управління/ В.Ю.Щербань, Г.Б.Параска, Б.В.Орловський та ін. – К.:КНУТД, 2015. – 270 с.
7. Прогнозування фізико-механічних властивостей текстильних матеріалів побутового призначення/А.М. Слізков , В.Ю. Щербань ,С.М. Краснитський , О.Б. Демківський. –К.:КНУТД, 2013. – 223 с.
8. Щербань В. Ю.Інформаційні технології в науці, виробництві та підприємстві/В.Ю.Щербань.-К.:КНУТД, 2016. – 184 с.
9. Щербань В. Ю.Інформаційні технології в науці, виробництві та підприємстві/В.Ю.Щербань.-К.:Освіта України, 2017. – 238 с.

10. Щербань В.Ю. Алгоритмічні, програмні та математичні компоненти САПР в індустрії моди/ В.Ю.Щербань, О.З.Колиско, М.І.Шолудько, В.Ю.Калашник. – К.:Освіта України, 2017. – 745 с.
11. Прогнозування процесів на основі моделювання часових рядів: навч. Посіб./П.І.Бідюк, В.Ю.Щербань, Є.О.Демківський, Т.І.Демківська.-К.:КНУТД, 2017.-324 с.
12. Щербань В.Ю. Математичні та програмні компоненти САПР технологічних процесів та обладнання текстильної та взуттєвої галузі/ В.Ю.Щербань, О.З.Колиско, М.І.Шолудько, В.Ю.Калашник. – К.:Бумсервіс, 2016. – 588 с.
13. Слізков А.М., Щербань В.Ю., Кизимчук О.П. Механічна технологія текстильних матеріалів. Частина II. (Ткацьке, трикотажне та неткане виробництво): підручник / А.М.Слізков, В.Ю.Щербань, О.П.Кизимчук. – К.:КНУТД, 2018. – 276 с.
14. Щербань В.Ю. Особенности взаимодействия сминаемых, жестких на изгиб нитей с рабочими органами трикотажных и швейных машин//Изв.вузов. Технология легкой промышленности. - 1988. - № 4. - С.126-130.
15. Щербань В.Ю. Взаимодействие нити с рабочими органами трикотажных и швейных машин//Изв.вузов. Технология легкой промышленности.- 1986. - № 6. -С.88-91.
16. Щербань В.Ю. О критериях выбора размеров нитенаправителей машин легкой промышленности//Изв.вузов. Технология легкой промышленности. - 1989.- № 4. -С.95-97.
17. Щербань В.Ю. Влияние формы направляющей поверхности на натяжение нити//Изв.вузов. Технология легкой промышленности. - 1989. - № 5. - С.119-122.
18. Щербань В.Ю. К вопросу об обрывности нитей при их переработке//Изв.вузов. Технология легкой промышленности. - 1992. - № 5-6. - С.81-84.
19. Vasilchenko V.N. Steady motion of a textile yarn with two anchoring points

over a rough surface / V.N. Vasilchenko, V.Yu. Shcherban, Ts.V. Apokin // Technology of the textile industry. - 1985. - № 4. - P.54-56.

20. Vasilchenko V.N. Equilibrium of a filament of a root base in the zone of formation of a multilayer technical fabric / V.N. Vasilchenko, V.Yu. Shcherban // Technology of the textile industry. - 1986. - № 5. - P.44-47.

21. Vasilchenko V.N. Influence of the twist of a capron complex filament on the value of its flexural rigidity / V.N. Vasilchenko, V.Yu. Shcherban // Technology of the textile industry. - 1986. - №4. - P.8-9.

22. Scherban V.Yu. Determination of the geometric characteristics of the shape of the filament axis moving along the deformable guide surface / V.Yu. Shcherban // Technology of the textile industry. - 1990. - №6. - P.52-55.

23. Scherban V.Yu. Determination of technological efforts in the process of surf during the formation of multilayer technical fabric / V.Yu. Shcherban // Technology of the textile industry. - 1990. - №3. - P.44-47.

24. Scherban V.Yu. Investigation of the process of duck surf during the formation of multilayer technical fabric / V.Yu. Shcherban // Technology of the textile industry. - 1990. - №4. - P.41-44.

25. Yakubitskaya I.A. Dynamic analysis of layout conditions on the end sections of the groove of the winding drum / I.A. Yakubitskaya, V.V. Chugin, V.Yu. Shcherban // Technology of the textile industry. - 1997. - №5. - P.33-37.

26. Yakubitskaya I.A. Differential equations of the relative motion of the filament element on the end sections of the coil of the winding drum / I.A. Yakubitskaya, V.V. Chugin, V.Yu. Shcherban // Technology of the textile industry. - 1997. - №6. - P.50-54.

27. Scherban V. Interaction yarn guide surface/V.Scherban, M. Sholudko, V. Kalashnik, O. Kolisko//Intellectual Archive, Toronto: Shiny World Corp., Richmond Hill, Ontario, Canada. – May 2015. – Volume 4.- Number 3. – P. 10-15.

28. Scherban V. Kinematics of threads cooperates with the guiding surfaces of

- arbitrary profile /V. Scherban, N. Murza, O. Kolisko, M. Sheludko, I. Semenova //Intellectual Archive, Toronto: Shiny World Corp., Richmond Hill, Ontario, Canada. – May/June - 2016. – Volume 5.- Number 3. – P. 23-27.
29. Scherban V. Basic parameters of curvature and torsion of the deformable thread in contact with runner/V. Scherban, N.Murza, A.Kirichenko, O. Kolisko, M. Sholudko //Intellectual Archive, Toronto: Shiny World Corp., Richmond Hill, Ontario, Canada. – Nov/Des - 2016. – Volume 10.- Number 2. – P. 18-23.
30. Scherban V. Equalizations of dynamics of filament interactive with surface/V. Scherban, G. Melnik, A.Kirichenko, O. Kolisko, M. Sheludko//Intellectual Archive, Toronto: Shiny World Corp., Richmond Hill, Ontario, Canada. – January/February 2017. – Volume 6.- Number 1. – P. 22-26.
31. Shcerban V.Yj. Determination of the transfer function of the comb tensioner of the thread/V.Yj.Shcerban , I.S.Semenova , O.Z.Kolysko , M.I.Sholudko , N.I.Murza //Вісник КНУТД, 2016.- №3.- С.44-49.
32. Щербань В.Ю. Порівняльний аналіз роботи нитконатягувачів текстильних машин/ В.Ю.Щербань, Н.І.Мурза, А.М. Кириченко, М.І.Шолудько//Вісник ХНУ.- 2016.-№6(243). - с.18-21.
33. Щербань В.Ю. Ефективність роботи компенсаторів натягу нитки трикотажних машин/В.Ю.Щербань, Н.І.Мурза, А.М. Кириченко, М.І.Шолудько //Вісник ХНУ.- 2017.-№1(245). - с.83-86.
34. Щербань В.Ю. Динамічні навантаження рукавичних автоматів зі зворотно-поступальним рухом кареток/В.Ю.Щербань, Б.Ф.Пипа, О.В.Чабан//Вісник КНУТД, 2016.- №3.- С.118-125.
35. Колиско М.І. Визначення оптимальних геометричних параметрів циліндричних нитконапрямних машин легкої промисловості/ М.І.Колиско, В.Ю.Щербань// Вісник КНУТД. – 2014. - №1. – С. 119-124.
36. Колиско М.І. Дослідження взаємодії нитки з циліндричною напрямною поверхнею/ М.І.Колиско, В.Ю.Щербань// Вісник КНУТД. – 2013. - №5. – С44-47.

37. Колиско М.І. Визначення впливу зминання та жорсткості на згин на натяг нитки при її взаємодії з циліндричною напрямною/ М.І.Колиско, В.Ю.Щербань// Вісник ХНУ. – 2013. - №6. – С.10-13.
38. Щербань В.Ю. Дослідження впливу матеріалу нитки і анізотропії тертя на її натяг і форму осі/ В.Ю.Щербань, В.Ю.Калашник, О.З.Колиско, М.І.Шолудько // Вісник ХНУ. – 2015. - №2. - С.25-29.
39. Щербань В.Ю. Оптимізація процесу взаємодії нитки з напрямними з урахуванням анізотропії фрикційних властивостей/ В.Ю.Щербань, М.І.Шолудько, О.З.Колиско, В.Ю.Калашник // Вісник ХНУ. – 2015. - №3. - С.30-33.
40. Щербань В.Ю. Визначення приведенного коефіцієнту тертя для кільцевих та трубчатих спрямовувачів нитки трикотажних машин/В.Ю.Щербань, Н.І.Мурза, А.М. Кириченко, М.І.Шолудько//Вісник ХНУ.- 2017.-№6(255). - С.23-27.
41. Щербань В.Ю. Визначення натягу нитки при її взаємодії з трубчастими спрямовувачами/В.Ю.Щербань, Н.І.Мурза, А.М. Кириченко, М.І.Шолудько//Вісник ХНУ.- 2018.-№1 (257). - С.213-217.
42. Патент 80199 UA, МКИ D04B 15/38/ Пристрій для визначення фрикційних властивостей нитки/ Мельник Г.В., Калашник В.Ю., Колиско М.І., Щербань В.Ю., Колиско О.З. (UA). – №u 2013 04588; заявл.12.04.2013; опубл. 13.05.2013, Бюл. N 9.
43. Патент 110982 UA, МКИ D05B 47/00/ Нитконатягувальний пристрій/ Щербань В.Ю., Мурза Н.І., Колиско О.З., Шолудько М.І., Семенова І.С. (UA). – №u 2016 04374; заявл.21.04.2016; опубл. 25.10.2016, Бюл. N 20.
44. Патент 110548 UA, МКИ D04B 15/38/ Система ниткоподачі/ Щербань В.Ю., Мурза Н.І., Колиско О.З., Шолудько М.І., Семенова І.С. (UA). – №u 2016 04693; заявл.26.04.2016; опубл. 10.10.2016, Бюл. N 19.
45. Патент 117290 UA, МКИ D05B 47/00/ Компенсатор натягу/ Щербань В.Ю., Мурза Н.І., Кириченко А.М., Колиско О.З., Шолудько М.І. (UA). –

№и 2016 13188; заявл.23.12.2016; опубл. 26.06.2017, Бюл.№ 12.

46. Патент 117289 UA, МКИ D05B 47/00/ Нитконатягувач/ Щербань В.Ю., Мурза Н.І., Кириченко А.М., Колиско О.З., Шолудько М.І. (UA). – №и 2016 13187; заявл.23.12.2016; опубл. 26.06.2017, Бюл.№ 12.



ДОДАТКИ

Програма для визначення натягу нитки, коефіцієнта жорсткості на згин на основі реалізації методу дихотомії

uses

Forms,

TUDI1 in 'TUDI1.pas' {frmTUDI1}, TUDI2 in 'TUDI2.pas' {frmTUDI2},

Synt in 'Synt.pas', UErrors in 'UErrors.pas' {FErrors};

{\$R \*.res} begin Application.Initialize; Application.CreateForm(TfrmTUDI1, frmTUDI1); Application.CreateForm(TfrmTUDI2, frmTUDI2);

Application.CreateForm(TFErrors, FErrors); Application.Run; end. unit TUDI1;

Interface uses Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics,

Controls, Forms, Dialogs, StdCtrls, jpeg, ExtCtrls; type TfrmTUDI1 =

class(TForm) lbl11TUDI: TLabel; lbl12TUDI: TLabel; lbl13TUDI: TLabel;

lbl14TUDI: TLabel; btn11TUDI1: TButton; img1TUDI1: TImage;

Image1: TImage; Image2: TImage; Image3: TImage; Image4: TImage;

Image5: TImage; Label1: TLabel; procedure btn11TUDI1Click(Sender:

TObject);

Private { Private declarations } public { Public declarations } end; var

frmTUDI1: TfrmTUDI1; implementation uses TUDI2; {\$R \*.dfm}

procedure TfrmTUDI1.btn11TUDI1Click(Sender: TObject); begin

frmTUDI1.Hide; frmTUDI2.Show; end; end. unit TUDI2; interface uses

Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,

Dialogs, StdCtrls, Math; type TfrmTUDI2 = class(TForm) lbl21TUDI2: TLabel;

lbl22TUDI2: TLabel; lbl23TUDI2: TLabel; lbl24TUDI2: TLabel;

lbl25TUDI2: TLabel; lbl26TUDI2: TLabel; edt21TUDI2: TEdit; edt22TUDI2:

TEdit; edt23TUDI2: TEdit; Memo1: TMemo; mem21TUDI2: TMemo;

edt24TUDI2: TEdit; btn21TUDI2: TButton; btn22TUDI2: TButton;

btn23TUDI2: TButton; procedure btn23TUDI2Click(Sender: TObject);

```

procedure btn22TUDI2Click(Sender: TObject); procedure
btn21TUDI2Click(Sender: TObject); private { Private declarations }
public { Public declarations } end; var frmTUDI2: TfrmTUDI2;
a,b,e,X,c,g,k:Real;
code,n:Integer; X1,n1:string; implementation uses TUDI1,Synt,UErrors;
{$R *.dfm} procedure vova(var g:real;x:real); begin SetData('X',X);
Calculate(g);
if g>=0 then begin k:=1; end else begin k:=-1; end; end
procedure vova1(var g:real;x:real); begin SetData('X',X); Calculate(g);
end; procedure TfrmTUDI2.btn23TUDI2Click(Sender: TObject); begin
frmTUDI1.Close; end; procedure TfrmTUDI2.btn22TUDI2Click(Sender:
TObject); begin edt21TUDI2.Clear; edt22TUDI2.Clear; edt23TUDI2.Clear;
edt24TUDI2.Clear; mem21TUDI2.Clear; Memo 2.Clear; end;
procedure TfrmTUDI2.btn21TUDI2Click(Sender: TObject); begin
val(edt21TUDI2.Text,a,code); val(edt22TUDI2.Text,b,code);
val(edt23TUDI2.Text,e,code); if (FErrors <> nil) then FErrors.Close;
if not CreatePZ(Memo1.Text) then begin Application.CreateForm(TFErrors,
FErrors); FErrors.LBErrors.Items.Assign(ErrorList); FErrors.Show; exit;
end; if(not Calculate(g)) then begin Application.MessageBox(
'Ошибка вычислений', 'Ошибка',MB_OK+MB_ICONSTOP); exit; end; n:=0;
Repeat X:=a; vova(g,x); X:=(a+b)/2; vova1(g,x); g:=k*g; if g>0 then begin
a:=X; end else begin b:=X; end; n:=n+1; until b-a<e;
X1:=format('% 10.4f',[X]);
n1:=format('% 5.0d',[n]); mem21TUDI2.Lines.Add(' X='+X1);
edt24TUDI2.Text:=n1; end; end. Interface uses classes; type TData = record
Name: string; Data:real; end; var NConst: integer = 100; ErrorList: TStringList;
PZ: array of integer; DataList: array of TData; const MConst = 2;
{Чтение очередной лексемы в тексте S,
начиная с позиции Pos. First - начинается ли чтение,

```

```

или продолжается}
procedure SyntItem(S:string; First:boolean=false; Pos:Integer=1);
function CreatePZ(S:string):boolean;
function Calculate(var R:real):boolean;
function SetData(Name:string; Data:real):boolean;
function GetData(Name:string; var Data:real):boolean;
implementation uses Sysutils, Math, Dialogs, TUDI2, UErrors; type
TType = (None, Number, Divider, Ident, Func, Part, All); TSynt = record
Number:real; Ident:string; Error:boolean; Pos1,Pos2:integer; end;
Const SetNum: set of char=['0'..'9', ',']; SetDiv: set of char=[';', '(', ')', '=', '+', '-',
 '/', '*', '^', '{', '}', #13]; SetChar: set of char=['a'..'z', 'A'..'Z', '_']; NFunc = 9;
Functions: array[1..NFunc] of string =
('exp', 'sin', 'cos', 'sqrt', 'abs', 'ln', 'tg', 'arctan', 'arccos'); var SItem: TSynt;
TrStack: array of char; ConstList: array of real; Position: Integer;
procedure SyntItem(S:string; First:boolean=false; Pos:Integer=1); var i:integer;
begin if (S = "") then begin SItem.mode := All; exit; end; if (First) then Position
:= Pos; repeat if (S[Position] = '{') then begin repeat Inc(Position)
until (Position >= Length(S)) or (S[Position] = '}'); Inc(Position);
end; if (Position <= Length(S)) then while ((S[Position] = ' ') or (S[Position] =
#13) or (S[Position] = #10) or (S[Position] = #0)) do Inc(Position);
until (S[Position] <> '{'); SItem.Error:=false; SItem.Pos1:=Position;
if (Position > Length(S)) then begin SItem.mode := All; exit; end;
SItem.Ident := S[Position]; if (S[Position] in SetChar) then SItem.mode :=
Ident
else if (S[Position] in SetNum) then SItem.mode := Number
else if (S[Position] in SetDiv) then begin if (S[Position] <> ';')
then SItem.mode := Divider else SItem.mode := Part; Inc(Position); exit; end
else begin SItem.mode := None; Inc(Position); exit; end; Inc(Position);
if (SItem.mode = Number) and ((S[Position] = '-') or (S[Position] = '+')) and

```

---

```

(UpCase(S[Position-1])='E') then SItem.Ident := SItem.Ident + S[Position]
else if ((Position > Length(S))or(S[Position] in SetDiv)) then begin
if(SItem.mode = Number) then try SItem.Number := StrToFloat(SItem.Ident)
except on EConvertError do SItem.Error := true; end; for i:=1 to NFunc do
if (LowerCase(SItem.Ident) = Functions[i]) then begin SItem.mode:=Func;
SItem.Number:=i; break; end; SItem.Pos2:=Position-1; exit; end
else SItem.Ident := SItem.Ident + S[Position]; until false; end; procedure
ClearPZ;
begin ErrorList.Clear; SetLength(ConstList,0); SetLength(DataList,MConst);
SetLength(PZ,0); end; function CreatePZ(S:string):boolean; var
lend:boolean; i:integer; Assign:boolean; Adress: integer;
OldMode: TType; // Характер предыдущей лексемы
OldS: char; // Первый символ предыдущей лексемы procedure code;
Begin SetLength(PZ,High(PZ)+2); case TrStack[High(TrStack)] of
'+': PZ[High(PZ)] := -1; '-': PZ[High(PZ)] := -2; '*': PZ[High(PZ)] := -3;
'/': PZ[High(PZ)] := -4; '^': PZ[High(PZ)] := -5; 'M': PZ[High(PZ)] := -6;
end; end; procedure proc1; begin SetLength(TrStack,High(TrStack)+2);
TrStack[High(TrStack)] := SItem.Ident[1]; end; procedure proc2; begin
code; TrStack[High(TrStack)] := SItem.Ident[1]; end; procedure proc3;
begin code; SetLength(TrStack,High(TrStack)); lend:=false; end; procedure
proc4;
SetLength(TrStack,High(TrStack)); end; procedure proc5; begin
SetLength(TrStack,High(TrStack)+2);
TrStack[High(TrStack)] := Chr(127+Round(SItem.Number)); end;
procedure proc6; begin SetLength(PZ,High(PZ)+2);
PZ[High(PZ)] := -Ord(TrStack[High(TrStack)]+27;
SetLength(TrStack,High(TrStack)); end; begin ClearPZ; SetLength(TrStack,1);
TrStack[0] := '0'; OldMode := None; OldS := ' '; Assign := true;
SyntItem(S,true);

```

```

if (SItem.mode = All) then begin ErrorList.Add('Не введено никакого текста');
Result := false; exit; end; repeat if ((OldMode = Func)and(SItem.Ident[1] <>
'('))
then ErrorList.Add('Пропущена скобка после функции в позиции
'+IntToStr(SItem.Pos1)); case SItem.mode of Number: begin
if((OldMode <> Divider)and(OldMode <> None)and
then ErrorList.Add('В позиции '+IntToStr(SItem.Pos1)+' должен быть
разделитель'); if (SItem.Error)
then ErrorList.Add('Ошибка в позициях '+IntToStr(SItem.Pos1)+
' - '+IntToStr(SItem.Pos2)) else begin SetLength(ConstList,High(ConstList)+2);
ConstList[High(ConstList)] := SItem.Number; SetLength(PZ,High(PZ)+2);
PZ[High(PZ)] := High(ConstList); end; Assign:=false; end; Ident: begin
if((OldMode <> Divider)and(OldMode <> None)and
(OldMode <> Part))
then ErrorList.Add('В позиции '+IntToStr(SItem.Pos1)+' должен быть
разделитель'); for i:=0 to High(DataList) do begin
if (UpperCase(SItem.Ident) = DataList[i].Name) then begin
SetLength(PZ,High(PZ)+2); PZ[High(PZ)] := NConst+i; break; end;
if(i = High(DataList)) then begin SetLength(DataList,High(DataList)+2);
DataList[High(DataList)].Name:=UpperCase(SItem.Ident);
DataList[High(DataList)].Data:=0; SetLength(PZ,High(PZ)+2);
PZ[High(PZ)] := NConst+High(DataList); end; end; All,Part:begin repeat
lend:=true; case TrStack[High(TrStack)] of '0': begin if (Adress <> 0) then begin
SetLength(PZ,High(PZ)+3); PZ[High(PZ)-1] := -7; PZ[High(PZ)] := Adress;
Adress := 0; end; break; end; '(' : ErrorList.Add('Лишняя открытая скобка');
else proc3; end; until lend; if (ErrorList.Count = 0) then Result:=true
else Result:=false; if (SItem.mode = All) then exit else begin Assign := true;
SItem.mode := None; end; Divider:begin if((OldMode = Divider)and
((SItem.Ident[1]<>'='))and (SItem.Ident[1]<>'(')and (SItem.Ident[1] <> ')'))and

```

```

((OldS <> '(')and (OldS <> ')')and (OldS <> '=')) then begin
ErrorList.Add('Позиция '+IntToStr(SItem.Pos1)+' : два подряд символа
операции'); break; end; lend:=true; case SItem.Ident[1] of
'=': if Assign and (OldMode = Ident) then begin Address := PZ[High(PZ)];
SetLength(PZ,High(PZ)); SItem.mode := None;
else ErrorList.Add('Позиция '+IntToStr(SItem.Pos1)+
': символ "=" здесь недопустим'); '(': if(OldMode = Ident) or (OldMode =
Number) then ErrorList.Add('Ошибочная скобка в позиции
'+IntToStr(SItem.Pos1)) else proc1; '+','-','M': begin if((OldMode =
None)or(OldS = '(')) then if (SItem.Ident[1] = '+') // Игнорируется then break
else SItem.Ident[1] := 'M'; case TrStack[High(TrStack)] of '0','(': proc1;
'+','-','M': proc2; '*','/','^': proc3; end; end; if OldS = '('
then ErrorList.Add('Ошибочная операция в позиции '+IntToStr(SItem.Pos1))
else case TrStack[High(TrStack)] of '0','(','+', '-', 'M': proc1; '*','/': proc2;
'^': proc3; end; if OldS = '(' then ErrorList.Add('Ошибочная операция в
позиции
'+IntToStr(SItem.Pos1)) else case TrStack[High(TrStack)] of
'0','(','+', '-', '*', '/', 'M': proc1; '^': proc2; end; case TrStack[High(TrStack)] of
'0': ErrorList.Add('Лишняя закрытая скобка'); '(': begin proc4;
if (Ord(TrStack[High(TrStack)]) > 127) then proc6; end; '+','-','*','/','^','M':
proc3;
end; end; until lend; Assign:=false; end; Func: begin repeat lend:=true;
until lend; Assign:=false; end; None: ErrorList.Add('Непонятный символ в
позиции '+IntToStr(SItem.Pos1)); end; OldMode := SItem.mode;
OldS := SItem.Ident[1]; SyntItem(S);until false; if(ErrorList.Count = 0)
then Result := true else Result := false; end; function Calculate(var
R:real):boolean; var Stack: array of real; i:integer; begin for i:=0 to High(PZ) do
begin if (i > 0) then if (PZ[i-1] = -7) and (i < High(PZ)) then Continue;
if PZ[i] < -100 then begin try case -PZ[i]-100 of

```

---

```

1: Stack[High(Stack)]:=Exp(Stack[High(Stack)]);
2: Stack[High(Stack)]:=Sin(Stack[High(Stack)]);
3: Stack[High(Stack)]:=Cos(Stack[High(Stack)]);
4: Stack[High(Stack)]:=Sqrt(Stack[High(Stack)]);
5: Stack[High(Stack)]:=Abs(Stack[High(Stack)]);
6: Stack[High(Stack)]:=Ln(Stack[High(Stack)]);
7: Stack[High(Stack)]:=Tan(Stack[High(Stack)]);
8: Stack[High(Stack)]:=ArcTan(Stack[High(Stack)]);
9: Stack[High(Stack)]:=ArcCos(Stack[High(Stack)]);
End except Result := false; end; if(FloatToStr(Stack[High(Stack)]) = 'NaN') or
(FloatToStr(Stack[High(Stack)]) = 'INF') or (FloatToStr(Stack[High(Stack)]) =
'-INF') then begin Result := false; exit; end else if PZ[i] < 0 then begin try
case -PZ[i] of 1: Stack[High(Stack)-1]:= Stack[High(Stack)-
1]+Stack[High(Stack)]; 2: Stack[High(Stack)-1]:= Stack[High(Stack)-1]-
Stack[High(Stack)]; 3: Stack[High(Stack)-1]:= Stack[High(Stack)-
1]*Stack[High(Stack)]; 4: Stack[High(Stack)-1]:= Stack[High(Stack)-
1]/Stack[High(Stack)]; 5: Stack[High(Stack)-1]:= Power(Stack[High(Stack)-
1],Stack[High(Stack)]); 6: Stack[High(Stack)]:= -Stack[High(Stack)];
7: DataList[PZ[i+1]-NConst].Data := Stack[High(Stack)]; end; Result := false;
exit; end; if (PZ[i] <> -6) // Не унарная операция then
SetLength(Stack,High(Stack)); else begin SetLength(Stack,High(Stack)+2);
if (PZ[i] < NConst) then Stack[High(Stack)]:=ConstList[PZ[i]]
else Stack[High(Stack)]:=DataList[PZ[i]-NConst].Data; end; end; Result :=
true;
R :=Stack[High(Stack)]; end; function SetData(Name:string; Data:real):boolean;
var i:integer; begin for i:=MConst to High(DataList) do
if (UpperCase(Name) = DataList[i].Name) then begin DataList[i].Data := Data;
Result:=true; end; Result := false; end;
function GetData(Name:string; var Data:real):boolean; var i:integer; begin

```

```

for i:=0 to High(DataList) do if (UpperCase(Name) = DataList[i].Name)
then begin Data := DataList[i].Data; Result:=true; exit; Result := false; end;
initialization SetLength(DataList,MConst); DataList[0].Name:='PI';
DataList[0].Data:=Pi; DataList[1].Name:='E'; DataList[1].Data:=2.71828183;
ErrorList := TStringList.Create; finalization ErrorList.Free; End unit UErrors;
Interface uses Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics,
Controls, Forms, Dialogs, StdCtrls; type TFEErrors = class(TForm)
LBEErrors: TListBox; private { Private declarations } public { Public
declarations } end; var FEErrors: TFEErrors; implementation uses Synt,TUDI2;
{$R *.dfm}
end.

```

Програма для визначення оптимального радіусу кривини направляючої

```

program PSTUMN; uses Forms, STUMN1 in 'STUMN1.pas' {frmSTUMN1},
STUMN2 in 'STUMN2.pas' {frmSTUMN2}, Synt in 'Synt.pas',
UErrors in 'UErrors.pas' {FEErrors}; {$R *.res} begin Application.Initialize;
Application.CreateForm(TfrmSTUMN1, frmSTUMN1);
Application.CreateForm(TfrmSTUMN2, frmSTUMN2);
Application.CreateForm(TFEErrors, FEErrors); Application.Run; unit STUMN1;
Interface uses Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics,
Controls, Forms, Dialogs, jpeg, ExtCtrls, StdCtrls; type
TfrmSTUMN1 = class(TForm) lbl1STUMN1: TLabel; lbl2STUMN1: TLabel;
lbl3STUMN1: TLabel; lbl4STUMN1: TLabel; btn1STUMN1: TButton;
lbl5STUMN1: TLabel; img1STUMN1: TImage; lbl6STUMN1: TLabel;
procedure btn1STUMN1Click(Sender: TObject); private { Private declarations }
public { Public declarations } end; var frmSTUMN1: TfrmSTUMN1;
implementation uses STUMN2; {$R *.dfm}
procedure TfrmSTUMN1.btn1STUMN1Click(Sender: TObject);
begin frmSTUMN1.Hide; frmSTUMN2.Show; end; end. unit STUMN2;

```



```

interface uses Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics,
Controls, Forms, Dialogs, Math, StdCtrls; type TfrmSTUMN2 = class(TForm)
btn1STUMN2: TButton; lbl1STUMN2: TLabel; edt1STUMN2: TEdit;
mem1STUMN2: TMemo; btn2STUMN2: TButton; lbl2STUMN2: TLabel;
edt2STUMN2: TEdit; lbl3STUMN2: TLabel; edt3STUMN2: TEdit;
Memo1: TMemo; lbl4STUMN2: TLabel; btn3STUMN2: TButton;
lbl5STUMN2: TLabel; edt4STUMN2: TEdit; lbl7STUMN2: TLabel;
procedure btn1STUMN2Click(Sender: TObject);
procedure btn2STUMN2Click(Sender: TObject);
procedure btn3STUMN2Click(Sender: TObject); private
{ Private declarations } public { Public declarations } end; type
xf=array [1..50]of Real; var frmSTUMN2: TfrmSTUMN2;
N,code,s1,M,R:integer; e,h,x1,g:Real; A:array[1..50,1..50] of Real;
B:array[1..50]of Real; F,X:xf; x0,xx:array[1..50] of string; ii,ss,xxx:string;
Implementation uses STUMN1,Synt,UErrors; {$R *.dfm} procedure v(var
F:xf; X:xf); var i:Integer; begin SetData('X[1]',X[1]); SetData('X[2]',X[2]);
SetData('X[3]',X[3]); SetData('X[4]',X[4]); SetData('X[5]',X[5]);
SetData('X[6]',X[6]); SetData('X[7]',X[7]); SetData('X[8]',X[8]);
SetData('X[9]',X[9]); SetData('X[10]',X[10]); SetData('X[11]',X[11]);
SetData('X[12]',X[12]); SetData('X[13]',X[13]); SetData('X[14]',X[14]);
SetData('X[15]',X[15]); SetData('X[16]',X[16]); SetData('X[17]',X[17]);
SetData('X[18]',X[18]); SetData('X[19]',X[19]); SetData('X[20]',X[20]);
SetData('X[21]',X[21]); SetData('X[22]',X[22]); SetData('X[23]',X[23]);
SetData('X[24]',X[24]); for i:=1 to N do begin Calculate(F[i]); end;
GetData('F[1]',F[1]); GetData('F[2]',F[2]); GetData('F[3]',F[3]);
GetData('F[4]',F[4]); GetData('F[5]',F[5]); GetData('F[6]',F[6]);
GetData('F[7]',F[7]); GetData('F[8]',F[8]); GetData('F[9]',F[9]);
GetData('F[10]',F[10]); GetData('F[11]',F[11]); GetData('F[12]',F[12]);
GetData('F[13]',F[13]); GetData('F[14]',F[14]); GetData('F[15]',F[15]);

```

```

GetData('F[16]',F[16]); GetData('F[17]',F[17]); GetData('F[18]',F[18]);
GetData('F[19]',F[19]); GetData('F[20]',F[20]); GetData('F[21]',F[21]);
GetData('F[22]',F[22]); GetData('F[23]',F[23]); GetData('F[24]',F[24]); end;
procedure TfrmSTUMN2.btn1STUMN2Click(Sender: TObject);
begin frmSTUMN1.Close; end;
procedure TfrmSTUMN2.btn2STUMN2Click(Sender: TObject); Var
i,j,k:Integer; begin s1:=0; Val(edt1STUMN2.Text,N,code);
Val(edt2STUMN2.Text,M,code); Val(edt3STUMN2.Text,e,code);
for i:=1 to N do begin ii:= format('%2.0d',[i]);
mem1STUMN2.Lines.Add('=','0');
Val(x0[i],x[i],code); xx[i]:=format('%12.5f',[x[i]]);
mem1STUMN2.Lines.Add('x('+ii+')='+xx[i]); end;
if (FErrors <> nil) then FErrors.Close; if not CreatePZ(Memo1.Text)
then begin Application.CreateForm(TFEErrors, FErrors);
FEErrors.LBErrors.Items.Assign(ErrorList); FErrors.Show; exit; end; repeat
v(F,X); for i:=1 to N do begin B[i]:=-F[i]; end; for j:=1 to N do begin
x1:=x[j]; h:=e*abs(x1); x[j]:=x1+h; v(F,X); for i:=1 to N do begin
A[i,j]:=(F[i]+B[i])/h; x[j]:=x1; end; s1:=s1+1; if s1=M+1 then begin
ss:=format('%3.0d',[s1]); edt4STUMN2.Text:=ss; Break; end;
for i:=1 to N-1 do begin for j:=i+1 to N do begin A[j,i]:=-A[j,i]/A[i,i];
for k:=i+1 to N do begin A[j,k]:=A[j,k]+A[j,i]*A[i,k]; end;
B[j]:=B[j]+A[j,i]*B[i]; end; end; F[N]:=B[N]/A[N,N]; for i:=N-1 downto 1 do
Begin h:=B[i]; for j:=i+1 to N do begin h:=h-F[j]*A[i,j]; F[i]:=h/A[i,i]; end;
R:=0; for i:=1 to N do begin x[i]:=x[i]+F[i]; if abs(F[i]/x[i])>e then R:=1;
end; if R=1 then Continue; mem1STUMN2.Lines.Add(); for i:=1 to N do
begin ii:= format('%2.0d',[i]); xxx:=format('%11.5f',[x[i]]);
mem1STUMN2.Lines.Add('x('+ii+')='+xxx); end; ss:=format('%3.0d',[s1]);
edt4STUMN2.Text:=ss; Break; until false; end;
procedure TfrmSTUMN2.btn3STUMN2Click(Sender: TObject);

```

```
begin edt1STUMN2.Clear; edt2STUMN2.Clear; edt3STUMN2.Clear;  
edt4STUMN2.Clear; Memo1.Clear; mem1STUMN2.Clear; end; end.
```

**Програма для чисельного інтегрування системи диференційних  
рівнянь з використанням метода Рунге-Кутта-Мерсона з  
автоматичним обранням крока інтегрування**

```
unit SDU1; interface uses  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes,  
Graphics, Controls, Forms,  Dialogs, StdCtrls, jpeg, ExtCtrls;  
type  TfrmSDU1 = class(TForm) lbl1SDU1: TLabel;  lbl2SDU1: TLabel;  
lbl4SDU1: TLabel; lbl5SDU1: TLabel;  lbl6SDU1: TLabel;  
lbl7SDU1: TLabel; btn1SDU1: TButton;  Image1: TImage;  Label1: TLabel;  
Label2: TLabel; Label3: TLabel;  Label4: TLabel; Label5: TLabel;  
procedure btn1SDU1Click(Sender: TObject); private { Private declarations }  
public { Public declarations } end; var frmSDU1: TfrmSDU1;  
implementation  uses SDU2; {$R *.dfm}  
procedure TfrmSDU1.btn1SDU1Click(Sender: TObject); begin frmSDU1.Hide;  
frmSDU2.Show; end; unit SDU2; interface uses
```

---

Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs, StdCtrls, Math, Chart, ExtCtrls, TeeProcs, TeEngine, Series; Type TfrmSDU2 = class(TForm) btn1SDU2: TButton; lbl1SDU2: TLabel; lbl2SDU2: TLabel; lbl3SDU2: TLabel; lbl4SDU2: TLabel; lbl5SDU2: TLabel; lbl6SDU2: TLabel; lbl7SDU2: TLabel; lbl8SDU2: TLabel; Memo1: TMemo; edt1SDU2: TEdit; edt2SDU2: TEdit; edt3SDU2: TEdit; edt4SDU2: TEdit; edt5SDU2: TEdit; mem1SDU2: TMemo; btn2SDU2: TButton; btn3SDU2: TButton; Chart1: TChart; Button1: TButton; Series1: TLineSeries; Series2: TLineSeries; procedure btn1SDU2Click(Sender: TObject); procedure btn3SDU2Click(Sender: TObject); procedure btn2SDU2Click(Sender: TObject); procedure Button1Click(Sender: TObject); private { Private declarations } public { Public declarations } end; type mm=array[1..50]of Real; var frmSDU2: TfrmSDU2; N,j,d1,code,i,t,t1:Integer; x,h,xm,e1,e2,e3,b1,b2,b3,b4:Real; y,w,c,F,a,d,e:mm; Y0,xx,yy:array[1..50]of String; ii,xxx,jj:String; aa,aaa,aaa1:array[1..200]of Real; implementation uses SDU1,Synt,UErrors; {\$R \*.dfm} procedure V1(var F:mm; X:Real;y:mm); begin SetData('X',X); SetData('Y[1]',Y[1]); SetData('Y[2]',Y[2]); SetData('Y[3]',Y[3]); SetData('Y[4]',Y[4]); SetData('Y[5]',Y[5]); SetData('Y[6]',Y[6]); SetData('Y[7]',Y[7]); SetData('Y[8]',Y[8]); SetData('Y[9]',Y[9]); SetData('Y[10]',Y[10]); SetData('Y[11]',Y[11]); SetData('Y[12]',Y[12]); SetData('Y[13]',Y[13]); SetData('Y[14]',Y[14]); SetData('Y[15]',Y[15]); SetData('Y[16]',Y[16]); SetData('Y[17]',Y[17]); SetData('Y[18]',Y[18]); SetData('Y[19]',Y[19]); SetData('Y[20]',Y[20]); SetData('Y[21]',Y[21]); SetData('Y[22]',Y[22]); SetData('Y[23]',Y[23]); SetData('Y[24]',Y[24]); for i:=1 to N do begin Calculate(F[i]); end; GetData('F[1]',F[1]); GetData('F[2]',F[2]); GetData('F[3]',F[3]); GetData('F[4]',F[4]);

```

GetData('F[5]',F[5]); GetData('F[6]',F[6]); GetData('F[7]',F[7]);
GetData('F[8]',F[8]); GetData('F[9]',F[9]); GetData('F[10]',F[10]);
GetData('F[11]',F[11]); GetData('F[12]',F[12]); GetData('F[13]',F[13]);
GetData('F[14]',F[14]); GetData('F[15]',F[15]); GetData('F[16]',F[16]);
GetData('F[17]',F[17]); GetData('F[18]',F[18]); GetData('F[19]',F[19]);
GetData('F[20]',F[20]); GetData('F[21]',F[21]); GetData('F[22]',F[22]);
GetData('F[23]',F[23]); GetData('F[24]',F[24]); end;
procedure TfrmSDU2.btn1SDU2Click(Sender: TObject); begin
frmSDU1.Close; end; procedure TfrmSDU2.btn3SDU2Click(Sender: TObject);
begin edt1SDU2.Clear; edt2SDU2.Clear; edt3SDU2.Clear;
edt4SDU2.Clear; edt5SDU2.Clear; Memo1.Clear; mem1SDU2.Clear;
end; procedure TfrmSDU2.btn2SDU2Click(Sender: TObject); begin
Val(edt1SDU2.Text,N,code); Val(edt2SDU2.Text,x,code);
Val(edt3SDU2.Text,xm,code); Val(edt4SDU2.Text,e1,code);
Val(edt5SDU2.Text,h,code); for i:=1 to N do begin ii:= format('%2.0d',[i]);
mem1SDU2.Lines.Add(y'); Y0[i]:=InputBox( Y0('+ii+')=',"");
Val(Y0[i],w[i],code); y[i]:=w[i]; xx[i]:=format('%12.5f',[w[i]]);
mem1SDU2.Lines.Add('Y0('+ii+')='+xx[i]); end;
if (FErrors <> nil) then FErrors.Close; if not CreatePZ(Memo1.Text)
then begin Application.CreateForm(TFEErrors, FErrors);
FEErrors.LBErrors.Items.Assign(ErrorList); FErrors.Show; exit; end;
t:=0; repeat t:=t+1; e3:=0; V1(F,X,Y); d1:=0; for j:=1 to N do begin
a[j]:=F[j]*h; y[j]:=w[j]+(a[j]/3); end; x:=x+(h/3); V1(F,X,Y);
for j:=1 to N do begin y[j]:=w[j]+((a[j]+F[j]*h)/6); end; V1(F,X,Y);
for j:=1 to N do begin c[j]:=F[j]*h; y[j]:=w[j]+(a[j]/8)+0.375*c[j]; end;
x:=x+(h/6); V1(F,X,Y); for j:=1 to N do begin d[j]:=F[j]*h;
y[j]:=w[j]+(a[j]/2)-1.5*c[j]+2*d[j]; end; x:=x+h/2; V1(F,X,Y);
for j:=1 to N do begin e[j]:=F[j]*h; y[j]:=w[j]+(a[j]+4*d[j]+e[j])/6;

```

```

e2:=(abs(-2*a[j]+9*c[j]-8*d[j]+e[j]))/30; if e2<=e1 then begin if e2<(e1/20)
then
begin d1:=d1+1; end; end else begin e3:=1; end; end; if e3=0 then
begin if d1=N then begin h:=h+h; end; aa[t]:=x; aaa[t]:=y[1]; aaa1[t]:=y[2];
xxx:=Format('%17.8f',[x]); mem1SDU2.Lines.Add('X='+xxx);
for j:=1 to N do begin jj:=format('%2.0d',[j]); yy[j]:=format('%17.8f',[y[j]]);
mem1SDU2.Lines.Add('Y['+jj+']='+yy[j]); w[j]:=y[j]; end; end else begin
x:=x-h; for j:=1 to N do begin y[j]:=w[j]; end; h:=h/2; end; until x>xm;
t1:=t; end; procedure TfrmSDU2.Button1Click(Sender: TObject); begin
with Series1 do begin for t:=1 to t1-1 do begin
Series1.AddXY(aa[t],aaa[t],"clRed); { Series2.AddXY(aa[t],aaa1[t],"clRed);}
end; end; with Series2 do begin for t:=1 to t1-1 do begin
Series2.AddXY(aa[t],aaa1[t],"clBlue); end; end; end; unit Synt; interface
uses classes; type TData = record Name: string; Data:real; end;
var NConst: integer = 100; ErrorList: TStringList; PZ: array of integer;
DataList: array of TData; const MConst = 2;
procedure SyntItem(S:string; First:boolean=false; Pos:Integer=1);
function CreatePZ(S:string):boolean; function Calculate(var R:real):boolean;
function SetData(Name:string; Data:real):boolean;
function GetData(Name:string; var Data:real):boolean;
implementation uses Sysutils, Math, Dialogs; type
TType = (None, Number, Divider, Ident, Func, Part, All); TSynt = record
mode: TType; Number:real Ident:string; Error:boolean;
Pos1,Pos2:integer; end; const SetNum: set of char=['0'..'9', ','];
SetDiv: set of char=[';', '(', ')', '=', '+', '-', '/', '*', '^', '{', '}', #13];
SetChar: set of char=['a'..'z','A'..'Z','_']; NFunc = 9;
Functions: array[1..NFunc] of string =
('exp','sin','cos','sqrt','abs','ln','tg','arctan','arccos');
Var SItem: TSynt; TrStack: array of char; ConstList: array of real;

```

```

Position: Integer;
procedure SyntItem(S:string;First:boolean=false;Pos:Integer=1);
var i:integer; begin if (S = "") then begin SItem.mode := All; exit; end;
if(First) then Position := Pos; repeat if (S[Position] = '{') then begin
repeat Inc(Position) until (Position >= Length(S)) or (S[Position] = '}');
Inc(Position); end; if(Position <= Length(S)) then while ((S[Position] = ' ')or
(S[Position] = #13)or (S[Position] = #10)or (S[Position] = #0)) do Inc(Position);
until (S[Position] <> '{'); SItem.Error:=false; SItem.Pos1:=Position;
if(Position > Length(S)) then begin SItem.mode := All; exit; end;
SItem.Ident := S[Position]; if (S[Position] in SetChar) then SItem.mode := Ident
else if (S[Position] in SetNum) then SItem.mode := Number
else if (S[Position] in SetDiv) then begin if (S[Position] <> ';')
then SItem.mode := Divider else SItem.mode := Part; Inc(Position); exit;
end else begin SItem.mode := None; Inc(Position); exit; end; repeat
Inc(Position); if (SItem.mode = Number)and
((S[Position] = '-')or(S[Position] = '+'))and (UpCase(S[Position-1])='E')
then SItem.Ident := SItem.Ident + S[Position]
else if ((Position > Length(S))or(S[Position] in SetDiv)) then begin
if(SItem.mode = Number) then try SItem.Number := StrToFloat(SItem.Ident)
except on EConvertError do SItem.Error := true; end; for i:=1 to NFunc do
if (LowerCase(SItem.Ident) = Functions[i]) then begin SItem.mode:=Func;
SItem.Number:=i; break; end; SItem.Pos2:=Position-1; exit; end
else SItem.Ident := SItem.Ident + S[Position]; until false; end; procedure
ClearPZ;
begin ErrorList.Clear; SetLength(ConstList,0); SetLength(DataList,MConst);
SetLength(PZ,0); end; function CreatePZ(S:string):boolean; var
lend:boolean; i:integer; Assign:boolean; Adress: integer; OldMode: TType;
OldS: charprocedure code; begin SetLength(PZ,High(PZ)+2);

```

```

case TrStack[High(TrStack)] of '+' : PZ[High(PZ)] := -1; '-' : PZ[High(PZ)] := -
2;
'*' : PZ[High(PZ)] := -3; '/' : PZ[High(PZ)] := -4; '^' : PZ[High(PZ)] := -5;
'M' : PZ[High(PZ)] := -6; end; end; procedure proc1; begin
SetLength(TrStack,High(TrStack)+2);      TrStack[High(TrStack)]      :=
SItem.Ident[1];
end; procedure proc2; begin code; TrStack[High(TrStack)] := SItem.Ident[1];
end; procedure proc3; begin code; SetLength(TrStack,High(TrStack));
lend:=false; end; procedure proc4; begin SetLength(TrStack,High(TrStack));
end; procedure proc5; SetLength(TrStack,High(TrStack)+2);
TrStack[High(TrStack)] := Chr(127+Round(SItem.Number));
end; procedure proc6; SetLength(PZ,High(PZ)+2);
PZ[High(PZ)] := -Ord(TrStack[High(TrStack)]+27;
SetLength(TrStack,High(TrStack)); end; begin ClearPZ; SetLength(TrStack,1);
TrStack[0] := '0'; OldMode := None; OldS := ' '; Assign := true; Adress := 0;
SyntItem(S,true); if (SItem.mode = All) then begin ErrorList.Add();
Result := false; exit; end; repeat if ((OldMode = Func)and(SItem.Ident[1] <> '('))
then ErrorList.Add('+IntToStr(SItem.Pos1)); case SItem.mode of
Number: begin if((OldMode <> Divider)and(OldMode <> None)and
(OldMode <> Part)) then ErrorList.Add('+IntToStr(SItem.Pos1)+' );
if (SItem.Error) then ErrorList.Add('+IntToStr(SItem.Pos1)+
' - '+IntToStr(SItem.Pos2)) else begin SetLength(ConstList,High(ConstList)+2);
ConstList[High(ConstList)] := SItem.Number; SetLength(PZ,High(PZ)+2);
PZ[High(PZ)] := High(ConstList); end; Assign:=false; end; Ident: begin
if((OldMode <> Divider)and(OldMode <> None)and (OldMode <> Part))
then ErrorList.Add('Â ñçèèè '+IntToStr(SItem.Pos1)+' );
for i:=0 to High(DataList) do begin
if (UpperCase(SItem.Ident) = DataList[i].Name)
then begin SetLength(PZ,High(PZ)+2); PZ[High(PZ)] := NConst+i; break;

```



```

end; if(i = High(DataList)) then begin SetLength(DataList,High(DataList)+2);
DataList[High(DataList)].Name:=UpperCase(SItem.Ident);
DataList[High(DataList)].Data:=0; SetLength(PZ,High(PZ)+2);
PZ[High(PZ)] := NConst+High(DataList); end; end; end;
All,Part:begin repeat lend:=true; case TrStack[High(TrStack)] of
'0': begin if (Adress <> 0) then begin SetLength(PZ,High(PZ)+3);
PZ[High(PZ)-1] := -7; PZ[High(PZ)] := Adress; Adress := 0; end; break; end;
'(': ErrorList.Add(); else proc3; end; until lend; if (ErrorList.Count = 0)
then Result:=true else Result:=false; if (SItem.mode = All) then exit
else begin Assign := true; SItem.mode := None; end end; Divider:begin
if((OldMode = Divider)and ((SItem.Ident[1]<>'=')and (SItem.Ident[1]<>'(')and
(SItem.Ident[1] <> ')'))and ((OldS <> '(')and (OldS <> ')')and (OldS <> '=')))
then begin ErrorList.Add(' '+IntToStr(SItem.Pos1)+' '); break; end; repeat
lend:=true; case SItem.Ident[1] of '=': if Assign and (OldMode = Ident)
then begin Adress := PZ[High(PZ)]; SetLength(PZ,High(PZ));
SItem.mode := None; end else ErrorList.Add('Ĭĭçèöèÿ '+IntToStr(SItem.Pos1)+
' '); '(': if(OldMode = Ident) or (OldMode = Number)
then ErrorList.Add('+IntToStr(SItem.Pos1)) else proc1; '+','-', 'M': begin
if((OldMode = None)or(OldS = '(')) then if (SItem.Ident[1] = '+') //
then break else SItem.Ident[1] := 'M'; case TrStack[High(TrStack)] of
'0','(': proc1; '+','-', 'M': proc2; '*', '/', '^': proc3; end; end; '*', '/': if OldS = '('
then ErrorList.Add('+IntToStr(SItem.Pos1)) else case TrStack[High(TrStack)]
of
'0','(','+', '-', 'M': proc1; '*', '/': proc2; '^': proc3; end; '^': if OldS = '('
then ErrorList.Add('+IntToStr(SItem.Pos1)) else case TrStack[High(TrStack)]
of
'0','(','+', '-', '*', '/', 'M': proc1; '^': proc2; end; ')':case TrStack[High(TrStack)] of
'0': ErrorList.Add(); '(': begin proc4; if (Ord(TrStack[High(TrStack)]) > 127)
then proc6; end; '+','-', '*', '/', '^', 'M': proc3; end; end; until lend; Assign:=false;

```

```

end; Func:  begin repeat lend:=true; proc5 until lend; Assign:=false;
end; None:  ErrorList.Add('+IntToStr(SItem.Pos1)); end;
OldMode := SItem.mode; OldS := SItem.Ident[1]; SyntItem(S); until false;
if(ErrorList.Count = 0) then Result := true else Result := false; end;
function Calculate(var R:real):boolean; var Stack: array of real; i:integer;
begin for i:=0 to High(PZ) do begin if (i > 0) then
if (PZ[i-1] = -7) and (i < High(PZ)) then Continue; if PZ[i] < -100 then begin
try case -PZ[i]-100 of 1: Stack[High(Stack)]:=Exp(Stack[High(Stack)]);
2: Stack[High(Stack)]:=Sin(Stack[High(Stack)]);
3: Stack[High(Stack)]:=Cos(Stack[High(Stack)]);
4: Stack[High(Stack)]:=Sqrt(Stack[High(Stack)]);
5: Stack[High(Stack)]:=Abs(Stack[High(Stack)]);
6: Stack[High(Stack)]:=Ln(Stack[High(Stack)]);
7: Stack[High(Stack)]:=Tan(Stack[High(Stack)]);
8: Stack[High(Stack)]:=ArcTan(Stack[High(Stack)]);
9: Stack[High(Stack)]:=ArcCos(Stack[High(Stack)]); end except Result := false;
exit; end; if(FloatToStr(Stack[High(Stack)]) = 'NAN') or
(FloatToStr(Stack[High(Stack)]) = 'INF') or
(FloatToStr(Stack[High(Stack)]) = '-INF') then begin Result := false; exit;
End end else if PZ[i] < 0 then begin try case -PZ[i] of 1: Stack[High(Stack)-1]:=
Stack[High(Stack)-1]+Stack[High(Stack)]; 2: Stack[High(Stack)-1]:=
Stack[High(Stack)-1]-Stack[High(Stack)]; 3: Stack[High(Stack)-1]:=
Stack[High(Stack)-1]*Stack[High(Stack)]; 4: Stack[High(Stack)-1]:=
Stack[High(Stack)-1]/Stack[High(Stack)]; 5: Stack[High(Stack)-1]:=
Power(Stack[High(Stack)-1],Stack[High(Stack)]);
6: Stack[High(Stack)]:= -Stack[High(Stack)];
7: DataList[PZ[i+1]-NConst].Data := Stack[High(Stack)]; end; except
Result := false;exit; end; if (PZ[i] <> -6) then SetLength(Stack,High(Stack));
End else begin SetLength(Stack,High(Stack)+2); if (PZ[i] < NConst)

```

```

then Stack[High(Stack)]:=ConstList[PZ[i]]
else Stack[High(Stack)]:=DataList[PZ[i]-NConst].Data; end; end;
Result := true; R :=Stack[High(Stack)]; end;
function SetData(Name:string; Data:real):boolean; var i:integer; begin
for i:=MConst to High(DataList) do if (UpperCase(Name) = DataList[i].Name)
then begin DataList[i].Data := Data; Result:=true; exit; end; Result := false;
end; function GetData(Name:string; var Data:real):boolean; var i:integer;
begin for i:=0 to High(DataList) do if (UpperCase(Name) = DataList[i].Name)
then begin Data := DataList[i].Data; Result:=true; exit; end; Result := false;
end; initialization SetLength(DataList,MConst); DataList[0].Name:='PI';
DataList[0].Data:=Pi; DataList[1].Name:='E'; DataList[1].Data:=2.71828183;
ErrorList := TStringList.Create; finalization ErrorList.Free; unit UErrors;
Interface uses Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics,
Controls, Forms,Dialogs, StdCtrls; type TFEErrors = class(TForm)
LBEErrors: TListBox; private { Private declarations } public
{ Public declarations } end; var FEErrors: TFEErrors; implementation {$R *.dfm}

```

**Програма для апроксимації та інтерполяції за методом найменших квадратів з можливістю автоматичного обрання ступеня полінома**

```

unit APIN1; interface uses Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes,
Graphics, Controls, Forms,Dialogs, jpeg, ExtCtrls, StdCtrls; type
TfrmAPIN1 = class(TForm) lbl1APIN1: TLabel; lbl2APIN1: TLabel;
lbl3APIN1: TLabel; lbl4APIN1: TLabel; lbl5APIN1: TLabel;
lbl6APIN1: TLabel; lbl7APIN1: TLabel; btn1APIN1: TButton;
img1APIN1: TImage; Label1: TLabel; procedure btn1APIN1Click(Sender:
TObject); private { Private declarations } public { Public declarations }
end; var frmAPIN1: TfrmAPIN1; implementation uses APIN2; {$R *.dfm}
procedure TfrmAPIN1.btn1APIN1Click(Sender: TObject); begin

```

---

```

frmAPIN1.Hide; frmAPIN2.Show; end; unit APIN2; interface uses
Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
Dialogs, StdCtrls,Math;type TfrmAPIN2 = class(TForm) lbl1APIN2: TLabel;
lbl2APIN2: TLabel;lbl3APIN2: TLabel; edt1APIN2: TEdit;      edt2APIN2:
TEdit;
lbl4APIN2: TLabel; mem1APIN2: TMemo; btn1APIN2: TButton;
btn2APIN2: TButton; btn3APIN2: TButton; lbl5APIN2: TLabel;
edt3APIN2: TEdit; procedure btn3APIN2Click(Sender: TObject);
procedure btn2APIN2Click(Sender: TObject);
procedure btn1APIN2Click(Sender: TObject);private { Private declarations }
public { Public declarations } end; var frmAPIN2: TfrmAPIN2;
i,H,VV,N,j,k,N1,k1,j1,M,L,M2,code:Integer; E1,R,F,U,S,E,p,Q1:Real;
X:array[1..50]of Real; Y:array[1..50]of Real; Z:array[1..50]of Real;
B:array[1..50]of Real; G:array[1..50]of Real; A:array[1..50,1..50]of Real;
C:array[1..50,1..50]of Real; D:array[1..100]of Real;
vv7,EE1,EE2,NN1,EEE,ikpl,kpl:String; aa:array[1..50]of String;
aa1:array[1..50]of String; implementation uses APIN1; {$R *.dfm}
PROCEDURE V1V1; begin N:=N+1; for j:=0 to 2*N-1 do begin if j>N then
Begin D[j]:=0; end else begin B[j]:=0; D[j]:=0; end; end; for i:=1 to H do
Begin R:=Y[i]; F:=1; for j:=1 to 2*N-1 do begin if j>N then begin
D[j]:=D[j]+F; F:=F*X[i]; end else begin B[j]:=B[j]+R; R:=R*X[i];
D[j]:=D[j]+F; F:=F*X[i]; end; end; end; for i:=1 to N do begin k:=i;
for j:=1 to N do begin A[i,j]:=D[k]; k:=k+1; end; end; N1:=N-1; for k:=1 to N1
do
begin if abs(A[k,k])>0 then begin end else begin k1:=k+1; for M:=k1 to N do
begin if abs(A[M,k])=0 then begin end else begin for L:=1 to N do begin
U:=A[k,L]; A[k,L]:=A[M,L]; A[M,L]:=U; end; end; end; U:=B[k]; B[k]:=B[M];
B[M]:=U; end; G[k]:=B[k]/A[k,k]; k1:=k+1; for i:=k1 to N do begin

```

```

B[i]:=B[i]-A[i,k]*G[k]; for j1:=k to N do begin j:=N-j1+k;
C[k,j]:=A[k,j]/A[k,k];
A[i,j]:=A[i,j]-A[i,k]*C[k,j]; end; end; end; M:=N; Z[M]:=B[M]/A[M,M];
Repeat M:=M-1; S:=0; for L:=M to N1 do begin S:=S+C[M,L+1]*Z[L+1];
end; Z[M]:=G[M]-S; until M<=1; E:=0; for i:=1 to H do begin S:=Y[i]; R:=1;
for j:=1 to N do begin S:=S-R*Z[j]; R:=R*X[i]; end; E:=E+S*S; end;
E:=sqrt(E/H); end; procedure TfrmAPIN2.btn3APIN2Click(Sender: TObject);
Begin frmAPIN1.Close; end;
procedure TfrmAPIN2.btn2APIN2Click(Sender: TObject); begin
edt1APIN2.Clear; edt2APIN2.Clear; edt3APIN2.Clear; mem1APIN2.Clear;
end; procedure TfrmAPIN2.btn1APIN2Click(Sender: TObject); label M1;
begin Val(edt1APIN2.Text,H,code); for i:=1 to H do begin
vv7:=format('%3.0d',[i]);
aa[i]:=InputBox('Введение значений', ' X['+vv7+']=''); Val(aa[i],X[i],code);
mem1APIN2.Lines.Add('X('+vv7+)'='+aa[i]);
aa1[i]:=InputBox('Введение значений', ' Y['+vv7+']=''); Val(aa1[i],Y[i],code);
mem1APIN2.Lines.Add('Y('+vv7+)'='+aa1[i]); end; N:=1;
Val(edt2APIN2.Text,VV,code); if VV=0 then begin
EE1:=InputBox('Среднеквадратичная погрешность','Задайте
среднеквадратичную погрешность'); Val(EE1,E1,code);
edt3APIN2.Text:=EE1; end else begin
EE2:=InputBox('Степень полинома','Введите степень М полинома
(M<N)');
Val(EE2,N,code); end; V1V1; if VV=1 then begin NN1:=format('%3.0d',[N-1]);
mem1APIN2.Lines.Add('Степень полинома N='+NN1);
EEE:=format('%9.5f',[E]);
mem1APIN2.Lines.Add('Погрешность результатов E='+EEE);
mem1APIN2.Lines.Add('Коэффициенты полинома'); for i:=1 to N do
begin ikpl:=format('%2.0d',[i-1]); kpl:=format('%14.5f',[Z[i]]);

```

```

mem1APIN2.Lines.Add('A('+ikpl+')='+kpl); end; end else begin M1:
if E<=E1 then begin NN1:=format('%3.0d',[N-1]);
mem1APIN2.Lines.Add('Степень полинома N='+NN1);
EEE:=format('%9.5f',[E]);
mem1APIN2.Lines.Add('Погрешность результатов E='+EEE);
mem1APIN2.Lines.Add('Если E больше заданной, увеличиваем N и
повторяем вычисления'); mem1APIN2.Lines.Add('Коэффициенты
полинома');
for i:=1 to N do begin ikpl:=format('%2.0d',[i-1]); kpl:=format('%14.5f',[Z[i]]);
mem1APIN2.Lines.Add('A('+ikpl+')='+kpl); end; end else begin if N<H then
begin V1V1; goto M1; end else begin NN1:=format('%3.0d',[N-1]);
mem1APIN2.Lines.Add('Степень полинома N='+NN1);
EEE:=format('%9.5f',[E]);
mem1APIN2.Lines.Add('Погрешность результатов E='+EEE);
mem1APIN2.Lines.Add('Если E больше заданной, увеличиваем N и
повторяем вычисления'); mem1APIN2.Lines.Add('Коэффициенты
полинома');
for i:=1 to N do begin ikpl:=format('%2.0d',[i-1]); kpl:=format('%14.5f',[Z[i]]);
mem1APIN2.Lines.Add('A('+ikpl+')='+kpl); end; end; end; end.

```

### **Програмне забезпечення для обчислення визначених інтегралів**

```

unit IMT1; interface uses Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes,
Graphics, Controls, Forms, Dialogs, jpeg, ExtCtrls, StdCtrls; type
TfrmIMT1 = class(TForm) lbl1IMT1: TLabel; lbl2IMT1: TLabel; lbl3IMT1:
TLabel; lbl4IMT1: TLabel; lbl5IMT1: TLabel; btn1IMT1: TButton;
img1IMT1: TImage; Label1: TLabel; Label2: TLabel; Label3: TLabel;
procedure btn1IMT1Click(Sender: TObject); private { Private declarations }
public { Public declarations } end; var frmIMT1: TfrmIMT1; implementation

```

```

uses IMT2; {$R *.dfm} procedure TfrmIMT1.btn1IMT1Click(Sender:
TObject);
begin frmIMT1.Hide; frmIMT2.Show; end; unit IMT2; interface uses
Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
Dialogs, StdCtrls,Math; type TfrmIMT2 = class(TForm) lbl1IMT2: TLabel;
lbl2IMT2: TLabel; lbl3IMT2: TLabel; edt1IMT2: TEdit; edt2IMT2: TEdit;
edt3IMT2: TEdit; lbl4IMT2: TLabel; Memo1: TMemo; lbl5IMT2: TLabel;
btn1IMT2: TButton; btn2IMT2: TButton; btn3IMT2: TButton;
edt4IMT2: TEdit; procedure btn3IMT2Click(Sender: TObject);
procedure btn2IMT2Click(Sender: TObject);
procedure btn1IMT2Click(Sender: TObject); private { Private declarations }
public { Public declarations }end; var frmIMT2: TfrmIMT2;
a,b,h,x,y,io,s,ia,ib:Real; i,m,code:Integer; io1:string; implementation
uses IMT1,Synt,UErrors; {$R *.dfm} procedure v(var y:Real;x:Real);
begin SetData('X',X); Calculate(y); end;
procedure TfrmIMT2.btn3IMT2Click(Sender: TObject); begin frmIMT1.Close;
end; procedure TfrmIMT2.btn2IMT2Click(Sender: TObject);
begin edt1IMT2.Clear; edt2IMT2.Clear; edt3IMT2.Clear; Memo1.Clear;
edt4IMT2.Clear; end;
procedure TfrmIMT2.btn1IMT2Click(Sender: TObject); begin
Val(edt1IMT2.Text,a,code); Val(edt2IMT2.Text,b,code);
Val(edt3IMT2.Text,m,code); if (FErrors <> nil) then FErrors.Close;
if not CreatePZ(Memo1.Text) then begin
Application.CreateForm(TFErrors, FErrors);
FErrors.LBErrors.Items.Assign(ErrorList); FErrors.Show; exit; end;
if(not Calculate(y)) then begin Application.MessageBox(
MB_OK+MB_ICONSTOP); exit; end; h:=(b-a)/m; x:=a; V(y,x); ia:=y*h/2;
x:=b; V(y,x); ib:=y*h/2; s:=0; x:=a; s:=0; i:=1; repeat begin x:=x+h;
s:=s+y; end; i:=i+1; until i>m-1; io:=s*h+ia+ib; io1:=format('%11.4f',[io]);

```

```
edt4IMT2.Text:=(I='+io1); end.
```

Програма для розв'язання задачі пошуку оптимальної траєкторії нитки  
на трикотажній машині

```
unit MainUnit; interface uses Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes,  
Graphics, Controls, Forms, Dialogs, StdCtrls, ExtCtrls, Math, Menus;  
type TForm1 = class(TForm) Image1: TImage; ScrollBar1: TScrollBar;  
ScrollBar2: TScrollBar; Panel1: TPanel; Edit1: TEdit; Edit2: TEdit;  
Edit4: TEdit; Button3: TButton; Label1: TLabel; Label2: TLabel;  
Label4: TLabel; Button8: TButton; Panel2: TPanel; Edit7: TEdit;  
Edit8: TEdit; Label6: TLabel; Label7: TLabel; Button9: TButton; Button10:  
TButton;  
Label3: TLabel; MainMenu1: TMainMenu; N12: TMenuItem;  
N13: TMenuItem; N14: TMenuItem; N15: TMenuItem; N16: TMenuItem;  
N17: TMenuItem; N18: TMenuItem; N19: TMenuItem; N20: TMenuItem;  
N21: TMenuItem; N22: TMenuItem; N23: TMenuItem; N24: TMenuItem;  
N26: TMenuItem; N27: TMenuItem; N28: TMenuItem; N29: TMenuItem;  
N30: TMenuItem; N31: TMenuItem; N32: TMenuItem; Label5: TLabel;  
Label8: TLabel; N2: TMenuItem; N3: TMenuItem; N4: TMenuItem;  
N5: TMenuItem; N6: TMenuItem; OpenFileDialog1: TOpenDialog;  
SaveDialog1: TSaveDialog; MainMenu2: TMainMenu; N1: TMenuItem;  
procedure ScrollBar1Scroll(Sender: TObject; ScrollCode: TScrollCode;  
var ScrollPos: Integer);  
procedure ScrollBar2Scroll(Sender: TObject; ScrollCode: TScrollCode;  
var ScrollPos: Integer);
```



```

procedure Image1MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X, Y:
Integer);
procedure Button3Click(Sender: TObject); procedure FormShow(Sender:
TObject);
procedure Button8Click(Sender: TObject); procedure Button9Click(Sender:
TObject);
procedure Button10Click(Sender: TObject);
procedure Image1MouseDown(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
procedure Image1MouseUp(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
procedure N29Click(Sender: TObject); procedure N27Click(Sender: TObject);
procedure N28Click(Sender: TObject); procedure N31Click(Sender: TObject);
procedure N32Click(Sender: TObject); procedure N16Click(Sender: TObject);
procedure N17Click(Sender: TObject); procedure N18Click(Sender: TObject);
procedure N19Click(Sender: TObject); procedure N13Click(Sender: TObject);
procedure N14Click(Sender: TObject); procedure N21Click(Sender: TObject);
procedure N20Click(Sender: TObject); procedure N23Click(Sender: TObject);
procedure N24Click(Sender: TObject); procedure N2Click(Sender: TObject);
procedure N3Click(Sender: TObject); procedure N4Click(Sender: TObject);
procedure N5Click(Sender: TObject); procedure N6Click(Sender: TObject);
private { Private declarations } public { Public declarations } end;
type PMyListE = ^EList; //список окружностей EList = record
x_c,y_c,R:real; elnumber:string{ char }; end; type
PMyListM = ^MdList; //список рёбер графа MdList = record
numrebra:integer; x1,y1,x2,y2:real; el1,el2:string; dest_in:char; naklon:real;
end; type PListL = ^LList; //список L LList = record NumEl:string;
x1,y1,x2,y2:real; numrebra:integer; sumang:real; path:string;
vn:char; end; type PListM = ^MList; //список M MList = record

```

```

NumEl:string; x1,y1,x2,y2:real; numrebra:integer; sumang:real; path:string;
vn:char; end; type PListSm = ^SmList; //список смежных рёбер
SmList = record numreb:integer; numsmreb:array[1..50]of integer;
kolsmreber:integer; end; type MyD = record //текущее описание
NumEl:string; x1,y1,x2,y2:real; numrebra:integer; sumang:real;
path:string; vn:char; end; var Form1: TForm1;
ksi,eta,x0,y0,math_x,math_y:real; //для расчёта координат
mx,my:integer; //масштаб
MyListE: TList; //список окружностей
ElRecord1: PMyListE; //запись в списке окружностей
MyListM: TList; //список рёбер модели
MdRecord: PMyListM; //запись в списке рёбер модели
ListL: TList; //список L
ListM: TList; //список M
MRecord: PListM; //запись в списке M
ListSm: TList; //список смежных рёбер
ListReb: TList;
RebRecord: PMyListM;
scr_pos1,scr_pos2:integer; //позиции скроллов
xmax,ymax:integer; //максимальные значения координатной сетки
num_el,num_rebra:integer; //нумерация окружностей, нумерация рёбер
is_source,is_target:boolean; //для определения заданы ли источник и цель
source,target:boolean; //для определения заданы ли источник и цель
clear:boolean; //для удаления лишних рёбер после нахождения пути
editing:boolean; //редактирование
moving:boolean; //перемещение окружности
num:integer; //номер окружности в списке
CopyElRecord:PMyListE;

```

---

```

x_start,y_start:real; //для возвращения окружности к исходному
положению...
elnum:string; //...при пересечении другой окружности
finding_rebro:boolean; //используется при поиске мышью рёбер
implementation {$R *.dfm} procedure Koord(u,v:real);
//перевод математических координат в координаты прибора
Begin if (u<320)and(v>240)then begin ksi:=x0+u*mx; eta:=y0+v*my; end;
if (u<320)and(v<240)then begin ksi:=x0+u*mx; eta:=y0-v*my; end;
if (u>320)and(v<240)then begin ksi:=x0-u*mx; eta:=y0-v*my;
end; if (u>320)and(v>240)then begin ksi:=x0-u*mx; eta:=y0+v*my;
end;
end; procedure MathKoord(ks,et:real);
//перевод координат прибора в математические координаты begin
math_x:=(ks-x0)/mx; math_y:=(et-y0)/(-my); end;
function FindAngle(x1_1,y1_1,x1_2,y1_2,x2_1,y2_1,x2_2,y2_2:real):real;
//поиск угла между двумя прямыми (касательными)
var a,b:real; begin if (x1_1=x1_2)and(y1_1=y1_2) then FindAngle:=0
end; a:=arctan((y1_2-y1_1)/(x1_2-x1_1))*180/pi;
b:=arctan((y2_2-y2_1)/(x2_2-x2_1))*180/pi; if (a>=0)and(b>=0)and(b<a) then
FindAngle:=a-b else if (a>=0)and(b>=0)and(b>a) then
FindAngle:=b-a else if (a>=0)and(b<=0) then
FindAngle:=a+abs(b) else if (a<=0)and(b<=0)and(b<a) then
FindAngle:=abs(b)-abs(a) else if (a<=0)and(b<=0)and(b>a) then
FindAngle:=abs(a)-abs(b) else {if (a<0)and(b>0) then }
FindAngle:=abs(a)+b; end; end; function FindNaklon(x1,y1,x2,y2:real):real;
//пошук кута нахилу дотичної begin if x1=x2 then begin
FindNaklon:=0; exit; end else begin FindNaklon:=arctan((y2-y1)/(x2-
x1))*180/pi;
end; end; procedure DrawAxis(sx,fx,sy,fy:integer);

```

```

//рисование координатных осей и сетки
Var i,k:integer; begin form1.Image1.Canvas.Pen.Color:=clBlack;
  k:=0; for i:=sx to fx do begin Koord(k,0); k:=k+1;
  form1.Image1.Canvas.MoveTo(trunc(ksi),trunc(eta));
  form1.Image1.Canvas.LineTo(trunc(ksi),trunc(eta));
  form1.Image1.Canvas.Pen.Width:=1;
  form1.Image1.Canvas.LineTo(trunc(ksi),0); if i<>0 then
  form1.Image1.Canvas.TextOut(trunc(ksi),trunc(eta),inttostr(i));
  form1.Image1.Canvas.Pen.Width:=4; end; k:=0; for i:=sy to fy do
  begin Koord(0,k); k:=k+1;
  form1.Image1.Canvas.MoveTo(trunc(ksi),trunc(eta));
  form1.Image1.Canvas.LineTo(trunc(ksi),trunc(eta));
  form1.Image1.Canvas.Pen.Width:=1;
  form1.Image1.Canvas.LineTo(640,trunc(eta)); if i<>0 then
  form1.Image1.Canvas.TextOut(trunc(ksi),trunc(eta),inttostr(i));
  form1.Image1.Canvas.Pen.Width:=4; end;
  form1.Image1.Canvas.Pen.Width:=1;
  form1.Image1.Canvas.Pen.Color:=clBlack;
end; Procedure DrawMyEllipse(xc,yc,R:real;mytype:string);
//рисование окружности
var R_p,xc_p,yc_p:integer; //характеристики окружности begin
  koord(xc,yc); xc_p:=trunc(ksi); yc_p:=trunc(eta); koord(R,0);
  R_p:=trunc(ksi); form1.Image1.Canvas.Pen.Color:=clRed;
  form1.Image1.Canvas.Ellipse(xc_p-R_p,yc_p+R_p,xc_p+R_p,yc_p-R_p);
//подпись окружностей
Form1.Image1.Canvas.TextOut(xc_p-2,yc_p-5,mytype);
form1.Image1.Canvas.Pen.Color:=clBlack; end;
Procedure ReDrawEllipse(shift_x,shift_y:integer);

```

---

```
//перерисовка окружностей, рёбер графа(модели) и оптимального
пути(если он найден)
var i:integer; xc,yc,R:real;//характеристики окружности
x1,x2,y1,y2:real; path:string; //найденный оптимальный путь begin
if MyListE.Count<>0 then //перерисовка окружностей
begin for i:=0 to MyListE.Count-1 do begin ElRecord1:=MyListE.Items[i];
xc:=ElRecord1.x_c-shift_x; yc:=ElRecord1.y_c-shift_y; R:=ElRecord1.R;
DrawMyEllipse(xc,yc,R,ElRecord1.elnumber) end; end; if clear<>true then
Begin if MyListM.Count<>0 then //перерисовка рёбер
begin form1.image1.Canvas.Pen.Color:=clBlue; for i:=0 to MyListM.Count-
1 do
begin MdRecord:=MyListM.Items[i]; x1:=MdRecord.x1-shift_x;
y1:=MdRecord.y1-shift_y;Koord(x1,y1);
form1.Image1.Canvas.MoveTo(trunc(ksi),trunc(eta));
x2:=MdRecord.x2-shift_x; y2:=MdRecord.y2-shift_y; Koord(x2,y2);
form1.Image1.Canvas.LineTo(trunc(ksi),trunc(eta)); end;
form1.image1.Canvas.Pen.Color:=clBlack; end; end;
if ListM.Count<>0 then //рисование найденного пути begin
MRecord:=ListM.Items[ListM.Count-1]; Form1.Image1.Canvas.Pen.Width:=2;
Form1.Image1.Canvas.Pen.Color:=clGreen; path:=MRecord.path;
delete(path,length(path),1); while path<>" do begin
x1:=strtofloat(copy(path,1,pos('*',path)-1)); delete(path,1,pos('*',path));
y1:=strtofloat(copy(path,1,pos('*',path)-1)); delete(path,1,pos('*',path));
x2:=strtofloat(copy(path,1,pos('*',path)-1)); delete(path,1,pos('*',path));
if pos('*',path)=0 then begin y2:=strtofloat(path); delete(path,1,length(path));
end else begin y2:=strtofloat(copy(path,1,pos('*',path)-1));
delete(path,1,pos('*',path)); end; Koord(x1-shift_x,y1-shift_y);
Form1.Image1.Canvas.MoveTo(trunc(ksi),trunc(eta));
Koord(x2-shift_x,y2-shift_y);
```

```

Form1.Image1.Canvas.LineTo(trunc(kxi),trunc(eta)); end;
Form1.Image1.Canvas.Pen.Width:=1;
Form1.Image1.Canvas.Pen.Color:=clBlack;
end; end; procedure Sort;
//сортировка окружностей по возрастанию координаты Xc (пузырьком)
var i,j,flag:integer;
TmpRecord1,TmpRecord2: PMyListE; //временные записи для сортировки
Окружностей begin i:=1; repeat  flag:=0; for j:=MyListE.Count-1 downto i do
Begin ElRecord1:=MyListE.Items[j]; TmpRecord1:=MyListE.Items[j-1];
if (ElRecord1.x_c=TmpRecord1.x_c)and(ElRecord1.y_c<TmpRecord1.y_c)
then
begin TmpRecord2:=TmpRecord1; MyListE.Items[j-1]:=MyListE.Items[j];
MyListE.Items[j]:=TmpRecord2; end; if (ElRecord1.x_c<TmpRecord1.x_c)
then
Begin TmpRecord2:=TmpRecord1; MyListE.Items[j-1]:=MyListE.Items[j];
MyListE.Items[j]:=TmpRecord2; flag:=1; end;  end; i:=i+1; until flag=0;
//перенумерация
j:=1; for i:=0 to MyListE.Count-1 do begin ElRecord1:=MyListE.Items[i];
if (ElRecord1.elnumber<>'s')and(ElRecord1.elnumber<>'t')then begin
ElRecord1.elnumber:=inttostr(j); MyListE.Items[i]:=ElRecord1;  j:=j+1;
end; end; end;
procedure BuildTangent(el1,el2:string;xc1,yc1,R1,xc2,yc2,R2:real);
//построение касательных
Var d:real; //расстояние между центрами окружностей
beta:real; //угол наклона прямой, соединяющей центры окружностей
sn_beta,cs_beta:real; //sin и cos угла наклона прямой, соединяющей центры
окружностей
sn_alpha,cs_alpha:real; //sin и cos угла наклона касательной
x1,y1,x2,y2:real; //координаты построенной касательной

```

```

begin if xc1=xc2 then d:=abs(yc1-yc2) else
d:=sqrt((yc2-yc1)*(yc2-yc1)+(xc2-xc1)*(xc2-xc1));
if xc2=xc1 then beta:=90*pi/180 else beta:=arctan((yc2-yc1)/(xc2-xc1));
sn_beta:=sin(beta); cs_beta:=cos(beta); //внешние касательные
sn_alpha:=(R2-R1)/d; cs_alpha:=sqrt(1-sn_alpha*sn_alpha);
//внешняя верхняя касательная
x1:=((xc1*cs_beta+yc1*sn_beta)-R1*sn_alpha)*cs_beta-((-
xc1*sn_beta+yc1*cs_beta)+R1*cs_alpha)*sn_beta;
y1:=((xc1*cs_beta+yc1*sn_beta)-R1*sn_alpha)*sn_beta+((-
xc1*sn_beta+yc1*cs_beta)+R1*cs_alpha)*cs_beta;
x2:=((xc2*cs_beta+yc2*sn_beta)-R2*sn_alpha)*cs_beta-((-
xc2*sn_beta+yc2*cs_beta)+R2*cs_alpha)*sn_beta;
y2:=((xc2*cs_beta+yc2*sn_beta)-R2*sn_alpha)*sn_beta+((-
xc2*sn_beta+yc2*cs_beta)+R2*cs_alpha)*cs_beta;
num_rebra:=num_rebra+1;
New(MdRecord); //добавление одного ребра графа(новой записи в список)
MdRecord.el1:=e11; MdRecord.el2:=e12;
MdRecord.numrebra:=num_rebra; MdRecord.x1:=x1;
MdRecord.y1:=y1; MdRecord.x2:=x2;
MdRecord.y2:=y2; MdRecord.naklon:=FindNaklon(x1,y1,x2,y2);
MyListM.Add(MdRecord);
//внешняя нижняя касательная
x1:=((xc1*cs_beta+yc1*sn_beta)-R1*sn_alpha)*cs_beta-((-
xc1*sn_beta+yc1*cs_beta)-R1*cs_alpha)*sn_beta;
y1:=((xc1*cs_beta+yc1*sn_beta)-R1*sn_alpha)*sn_beta+((-
xc1*sn_beta+yc1*cs_beta)-R1*cs_alpha)*cs_beta;
x2:=((xc2*cs_beta+yc2*sn_beta)-R2*sn_alpha)*cs_beta-((-
xc2*sn_beta+yc2*cs_beta)-R2*cs_alpha)*sn_beta;

```

---

```

y2:=((xc2*cs_beta+yc2*sn_beta)-R2*sn_alpha)*sn_beta+((-
xc2*sn_beta+yc2*cs_beta)-R2*cs_alpha)*cs_beta;
num_rebra:=num_rebra+1;
New(MdRecord); //добавление одного ребра графа(новой записи в список)
MdRecord.el1:=e11; MdRecord.el2:=e12;
MdRecord.numrebra:=num_rebra; MdRecord.x1:=x1;
MdRecord.y1:=y1; MdRecord.x2:=x2; MdRecord.y2:=y2;
MdRecord.naklon:=FindNaklon(x1,y1,x2,y2); MyListM.Add(MdRecord);
//-----
//внутренние касательные
sn_alpha:=(R1+R2)/d; cs_alpha:=sqrt(1-sn_alpha*sn_alpha);
//внутренняя верхняя касательная
x1:=((xc1*cs_beta+yc1*sn_beta)+R1*sn_alpha)*cs_beta-((-
xc1*sn_beta+yc1*cs_beta)+R1*cs_alpha)*sn_beta;
y1:=((xc1*cs_beta+yc1*sn_beta)+R1*sn_alpha)*sn_beta+((-
xc1*sn_beta+yc1*cs_beta)+R1*cs_alpha)*cs_beta;
x2:=((xc2*cs_beta+yc2*sn_beta)-R2*sn_alpha)*cs_beta-((-
xc2*sn_beta+yc2*cs_beta)-R2*cs_alpha)*sn_beta;
y2:=((xc2*cs_beta+yc2*sn_beta)-R2*sn_alpha)*sn_beta+((-
xc2*sn_beta+yc2*cs_beta)-R2*cs_alpha)*cs_beta;
num_rebra:=num_rebra+1;
New(MdRecord); //добавление одного ребра графа(новой записи в список)
MdRecord.el1:=e11; MdRecord.el2:=e12; MdRecord.numrebra:=num_rebra;
MdRecord.x1:=x1; MdRecord.y1:=y1; MdRecord.x2:=x2;
MdRecord.y2:=y2; MdRecord.naklon:=FindNaklon(x1,y1,x2,y2);
MyListM.Add(MdRecord);
//внутренняя нижняя касательная
x1:=((xc1*cs_beta+yc1*sn_beta)+R1*sn_alpha)*cs_beta-((-
xc1*sn_beta+yc1*cs_beta)-R1*cs_alpha)*sn_beta;

```



```

y1:=((xc1*cs_beta+yc1*sn_beta)+R1*sn_alpha)*sn_beta+((-
xc1*sn_beta+yc1*cs_beta)-R1*cs_alpha)*cs_beta;
x2:=((xc2*cs_beta+yc2*sn_beta)-R2*sn_alpha)*cs_beta-((-
xc2*sn_beta+yc2*cs_beta)+R2*cs_alpha)*sn_beta;
y2:=((xc2*cs_beta+yc2*sn_beta)-R2*sn_alpha)*sn_beta+((-
xc2*sn_beta+yc2*cs_beta)+R2*cs_alpha)*cs_beta;
num_rebra:=num_rebra+1;
New(MdRecord); //добавление одного ребра графа(новой записи в список)
MdRecord.el1:=e11; MdRecord.el2:=e12; MdRecord.numrebra:=num_rebra;
MdRecord.x1:=x1; MdRecord.y1:=y1; MdRecord.x2:=x2; MdRecord.y2:=y2;
MdRecord.naklon:=FindNaklon(x1,y1,x2,y2); MyListM.Add(MdRecord); end;
function FindCross(x1,y1,x2,y2,xc,yc,R:real):boolean;
var D,D2:real; //дискриминант
a,b,c:real; x,y:real; begin
a:=(x1-x2)*(x1-x2)+(y1-y2)*(y1-y2);
b:=2*(y1-y2)*(x1*y2-x2*y1)-2*xc*(x1-x2)*(x1-x2)-2*yc*(x1-x2)*(y1-y2);
c:=xc*xc*(x1-x2)*(x1-x2)+(x1*y2-x2*y1)*(x1*y2-x2*y1)-2*yc*(x1-
x2)*(x1*y2-x2*y1)+yc*yc*(x1-x2)*(x1-x2)-R*R*(x1-x2)*(x1-x2);
if (x1=x2)and(y1=y2)then begin FindCross:=false; exit; end; D:=b*b-4*a*c;
if D>=0 then begin x:=(-b+sqrt(D))/(2*a);
b:=2*(x1-x2)*(x2*y1-x1*y2)-2*yc*(y1-y2)*(y1-y2)-2*xc*(x1-x2)*(y1-y2);
c:=(x2*y1-x1*y2)*(x2*y1-x1*y2)-2*xc*(x2*y1-x1*y2)*(y1-
y2)+(xc*xc+yc*yc-R*R)*(y1-y2)*(y1-y2);
D2:=b*b-4*a*c; if D2>0 then y:=(-b+sqrt(D2))/(2*a) else y:=0;
End else begin x:=0; y:=0; end; if (x1=x2)and(x=x1) then
Begin if (y1<y2)and(y>y1)and(y<y2) then begin FindCross:=true;
exit; end else if (y1>y2)and(y<y1)and(y>y2) then begin FindCross:=true;
exit; end; end;
if (D<0)or((D>-0.0000001)and(D<0.0000001)) then FindCross:=false

```

```

else //D>0 begin if (x1<x2)and(x>x1)and(x<x2) then FindCross:=true
else if (x1>x2)and(x>x2)and(x<x1) then FindCross:=true
else FindCross:=false; end; end; function PointtoComma(mystr:string):string;
//замена точек на запятыы
var i:integer; begin for i:=1 to length(mystr) do begin
if copy(mystr,i,1)='.' Then begin delete(mystr,i,1); insert(',',mystr,i);
end; end; PointtoComma:=mystr; end;
procedure TForm1.ScrollBar1Scroll(Sender: TObject; ScrollCode: TScrollCode;
var ScrollPos: Integer);
//прокрутка по оси X
Begin scr_pos1:=ScrollPos;
Image1.Canvas.Rectangle(0,0,Image1.Width,Image1.Height);
DrawAxis(scr_pos1,scr_pos1+45,scr_pos2,scr_pos2+45);
ReDrawEllipse(scr_pos1,scr_pos2); end;
procedure TForm1.ScrollBar2Scroll(Sender: TObject; ScrollCode: TScrollCode;
var ScrollPos: Integer); //прокрутка по оси Y
begin scr_pos2:=ScrollBar2.Max-Scrollpos;
Image1.Canvas.Rectangle(0,0,Image1.Width,Image1.Height);
DrawAxis(scr_pos1,scr_pos1+45,Scr_Pos2,Scr_Pos2+45);
ReDrawEllipse(scr_pos1,scr_pos2); end;
procedure TForm1.Image1MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
Y: Integer);
//Вывод в заголовок формы координат курсора (математических)
//и перемещение окружностей в режиме редактирования
var i:integer; begin if (mx<>0)and(my<>0) then begin
MathKoord(X,Y); math_x:=math_x+ScrollBar1.Position;
math_y:=math_y+ScrollBar2.Max-ScrollBar2.Position;
Form1.Caption:='('+FloatToStrf(math_x,ffFixed,3,1)+';'+FloatToStrf(math_y,ff
Fixed,3,1)+'; end;

```

```
//находится ли курсор внутри окружности (только в режиме
редактирования) if
(editing=true)and(MyListE.Count<>0)and(moving=false)and(finding_rebro<>tr
ue) then begin for i:=0 to MyListE.Count-1 do begin
ElRecord1:=MyListE.Items[i];
if (math_x>ElRecord1.x_c-
ElRecord1.R)and(math_x<ElRecord1.x_c+ElRecord1.R)and
(math_y>ElRecord1.y_c-
ElRecord1.R)and(math_y<ElRecord1.y_c+ElRecord1.R)then begin
Image1.Cursor:=crHandPoint; num:=i; break; end else
Image1.Cursor:=crDefault;
end; CopyElRecord:=ElRecord1; end; if (moving=true) then begin
ElRecord1:=CopyElRecord; ElRecord1.x_c:=math_x; ElRecord1.y_c:=math_y;
CopyElRecord:=ElRecord1; MyListE.Items[num]:=ElRecord1;
Image1.Canvas.Rectangle(0,0,Image1.Width,Image1.Height);
DrawAxis(scr_pos1,scr_pos1+45,scr_pos2,scr_pos2+45);
ReDrawEllipse(scr_pos1,scr_pos2); end;
if (finding_rebro=true)and(MyListE.Count<>0)and(MyListM.Count<>0)then
Begin for i:=0 to MyListM.Count-1 do begin MdRecord:=MyListM.Items[i];
if (MdRecord.x1*math_y+MdRecord.x2*MdRecord.y1+math_x*MdRecord.y2-
MdRecord.x2*math_y-MdRecord.x1*MdRecord.y2-math_x*MdRecord.y1>-
0.1)and
(MdRecord.x1*math_y+MdRecord.x2*MdRecord.y1+math_x*MdRecord.y2-
MdRecord.x2*math_y-MdRecord.x1*MdRecord.y2-
math_x*MdRecord.y1<0.1)then
begin if
((MdRecord.x1<MdRecord.x2)and(math_x>=MdRecord.x1)and(math_x<=MdR
ecord.x2))
```

```

or((MdRecord.x1>MdRecord.x2)and(math_x<=MdRecord.x1)and(math_x>=M
dRecord.x2)) then begin Image1.Cursor:=crHandPoint;
num:=MdRecord.numrebra;
Form1.Caption:=inttostr(num); break; end; end else Image1.Cursor:=crDefault;
end; end; end; procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
//добавление окружности с указанными данными
Var xc,yc,R:real; //характеристики эллипса
d:real; //расстояние между центрами окружностей
i:integer;
cross:boolean; //для проверки на пересечение окружностей
begin try xc:=strtofloat(edit1.Text); except ShowMessage('Помилка в значенні
Хс');
exit; end; try yc:=strtofloat(edit2.Text); except
ShowMessage('Помилка в значенні Yс'); exit; end; try
R:=strtofloat(edit4.Text); except ShowMessage('Помилка в значенні R');
exit; end; if (xc>xmax+21)or(yc>ymax+16)or(xc-R<0)or(yc+R<0) then
begin ShowMessage('Коло виходить за межі поля'); exit; end;
//проверка на пересечение окружностей
cross:=false; if MyListE.Count>0 then begin for i:=0 to MyListE.Count-1 do
begin ElRecord1:=MyListE.Items[i];
if ElRecord1.x_c=xc then d:=abs(ElRecord1.y_c-yc)
else d:=sqrt((yc-ElRecord1.y_c)*(yc-ElRecord1.y_c)+(xc-ElRecord1.x_c)*(xc-
ElRecord1.x_c)); if d<ElRecord1.R+R then begin cross:=true; break;
end; end; end; //окружности не пересекаются
if cross<>true then begin
New(ElRecord1); //добавление новой окружности (новой записи в список)
ElRecord1.x_c:=xc; ElRecord1.y_c:=yc; ElRecord1.R:=R;
if is_source=true then begin ElRecord1.elnumber:='s'; source:=true;
N16.Enabled:=false; end else if is_target=true then begin

```

```

ElRecord1.elnumber:='t'; target:=true; N17.Enabled:=false; end
Else begin num_el:=num_el+1; ElRecord1.elnumber:=inttostr(num_el); end;
MyListE.Add(ElRecord1);DrawMyEllipse(xс-
scr_pos1,yc,R,ElRecord1.elnumber);
panel1.Visible:=false; Form1.Menu:=MainMenu1;
is_source:=false;is_target:=false;
N22.Enabled:=true; if (source=true)and(target=true) then
N30.Enabled:=true;end
else ShowMessage('Коло перетинає інше коло'); end;
procedure TForm1.FormShow(Sender: TObject);
//задание начальных значений для коорд. сетки
Begin finding_rebro:=false; num:=0; xmax:=100;ymax:=100;
Image1.Canvas.Rectangle(0,0,Image1.Width,Image1.Height); num_rebra:=0;
num_el:=0; mx:=30; my:=30; x0:=0; y0:=480; DrawAxis(0,100,0,100);
MyListE := TList.Create; MyListM := TList.Create; ListSm := TList.Create;
ListL := TList.Create; ListM := TList.Create; scr_pos1:=0;scr_pos2:=0;
is_source:=false;is_target:=false; source:=false;target:=false; editing:=false;
end; procedure TForm1.Button8Click(Sender: TObject);
//отмена ввода окружности
Begin panel1.Visible:=false; Form1.Menu:=MainMenu1; end;
procedure TForm1.Button9Click(Sender: TObject);
//задание максимальных значений координатной сетки
var i:integer; tmp_x,tmp_y:integer; begin try tmp_x:=strtoint(edit7.Text);
Except ShowMessage('Помилка в значенні Xmax'); exit; end; try
tmp_y:=strtoint(edit8.Text); except ShowMessage('Помилка в значенні
Ymax');
exit; end; if tmp_x<21 then begin ShowMessage('Xmax не должно быть
менее 21'); exit; end; if tmp_y<16 then begin
ShowMessage('Ymax не должно быть менее 16');

```

```

exit; end; if target=true then begin for i:=0 to MyListE.Count-1 do
begin ElRecord1:=MyListE.Items[i]; if ElRecord1.elnumber='t' then
begin коord(ElRecord1.y_c+ElRecord1.R,ElRecord1.y_c+ElRecord1.R);
if (ksi>tmp_x)or(eta>tmp_y) then begin
ShowMessage('Последняя окружность выходит за границы поля');
exit; end; end; end; end; хmax:=tmp_x-21; уmax:=tmp_y-16;
ScrollBar1.Max:=хmax; ScrollBar2.Max:=ymax;
ScrollBar2.Position:=ScrollBar2.Max; scr_pos1:=0;scr_pos2:=0;
panel2.Visible:=false; Form1.Menu:=MainMenu1; end;
procedure TForm1.Button10Click(Sender: TObject);
//отмена задания размеров поля
Begin panel2.Visible:=false; Form1.Menu:=MainMenu1; end;

procedure TForm1.Image1MouseDown(Sender: TObject; Button:
TMouseButton;
Shift: TShiftState; X, Y: Integer); var i:integer;
TmpRecord:PMyListM; //для поиска одинаковой записи в списке
found:boolean; //для поиска одинаковой записи в списке
begin if (editing=true)and(image1.Cursor=crHandPoint)then
begin ElRecord1:=MyListE.Items[num]; х_start:=ElRecord1.x_c;
у_start:=ElRecord1.y_c; elnum:=ElRecord1.elnumber; moving:=true;
end; //выделение ребра с занесением его в список
if (finding_rebro=true)and(Image1.Cursor=crHandPoint) then begin
New(RebRecord); RebRecord:=MyListM.Items[num-1];
//поиск одинаковой записи (если ребро уже было внесено)
found:=false; if ListReb.Count<>0 then for i:=0 to ListReb.Count-1 do
begin TmpRecord:=ListReb.Items[i];if
TmpRecord.numrebra=RebRecord.numrebra

```

```

then begin found:=true; break; end; end; if found=false then
ListReb.Add(RebRecord); Form1.Image1.Canvas.Pen.Width:=2;
Form1.Image1.Canvas.Pen.Color:=clMaroon;
Koord(RebRecord.x1-scr_pos1,RebRecord.y1-scr_pos2);
Form1.Image1.Canvas.MoveTo(trunc(ksi),trunc(eta));
Koord(RebRecord.x2-scr_pos1,RebRecord.y2-scr_pos2);
Form1.Image1.Canvas.LineTo(trunc(ksi),trunc(eta));
Form1.Image1.Canvas.Pen.Width:=1;
Form1.Image1.Canvas.Pen.Color:=clBlack;
end; end;
procedure TForm1.Image1MouseUp(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
Shift: TShiftState; X, Y: Integer); var i:integer; d:real; cross:boolean;
Begin cross:=false; if (editing=true)and(moving=true) then begin
moving:=false;
for i:=0 to MyListE.Count-1 do begin ElRecord1:=MyListE.Items[i];
if CopyElRecord.elnumber<>ElRecord1.elnumber then begin
if CopyElRecord.x_c=ElRecord1.x_c then d:=abs(CopyElRecord.y_c-
ElRecord1.y_c)
else d:=sqrt((ElRecord1.y_c-CopyElRecord.y_c)*(ElRecord1.y_c-
CopyElRecord.y_c)+(ElRecord1.x_c-CopyElRecord.x_c)*(ElRecord1.x_c-
CopyElRecord.x_c));
if d<CopyElRecord.R+ElRecord1.R then begin cross:=true; break; end; end;
end; if cross=true then begin for i:=0 to MyListE.Count-1 do begin
ElRecord1:=MyListE.Items[i]; if ElRecord1.elnumber=elnum then begin
ElRecord1.x_c:=x_start; ElRecord1.y_c:=y_start;
MyListE.Items[i]:=ElRecord1;
Image1.Canvas.Rectangle(0,0,Image1.Width,Image1.Height);
DrawAxis(scr_pos1,scr_pos1+45,scr_pos2,scr_pos2+45);
ReDrawEllipse(scr_pos1,scr_pos2); break; end; end; end; end; end; end;

```

```

procedure TForm1.N29Click(Sender: TObject);
//очистка экрана (с перерисовкой коорд. сетки и очищением списков)
Var i:integer; begin clear:=false; ScrollBar1.Position:=0;
ScrollBar2.Position:=100;
xmax:=100;ymax:=100; scr_pos1:=0; scr_pos2:=0; mx:=30;my:=30;
label8.Caption:=""; label8.Visible:=false; label5.Visible:=false;
source:=false;target:=false;
Image1.Canvas.Rectangle(0,0,Image1.Width,Image1.Height);
DrawAxis(0,100,0,100); num_rebra:=0; num_el:=0; finding_rebro:=false;
if MyListE.Count<>0 then begin
for i:=0 to MyListE.Count-1 do MyListE.Delete(0); end;
if MyListM.Count<>0 then begin
for i:=0 to MyListM.Count-1 do MyListM.Delete(0); end;
if ListL.Count<>0 then begin for i:=0 to ListL.Count-1 do ListL.Delete(0);
end; if ListM.Count<>0 then begin for i:=0 to ListM.Count-1 do
ListM.Delete(0);
end; if ListSm.Count<>0 then begin for i:=0 to ListSm.Count-1 do
ListSm.Delete(0);
end; N30.Enabled:=false; N31.Enabled:=false; N32.Enabled:=false;
N20.Enabled:=false; N22.Enabled:=false; N23.Enabled:=false;
N24.Enabled:=false; N16.Enabled:=true; N17.Enabled:=true;
N15.Enabled:=true; N13.Enabled:=true; N27.Enabled:=true;
N28.Enabled:=true; N2.Enabled:=false; N3.Enabled:=false;
N4.Enabled:=false; N21.Enabled:=true; end;
procedure TForm1.N27Click(Sender: TObject); //увеличение масштаба
begin mx:=mx*2;my:=my*2;
Image1.Canvas.Rectangle(0,0,Image1.Width,Image1.Height);
DrawAxis(scr_pos1,scr_pos1+45,scr_pos2,scr_pos2+45);
ReDrawEllipse(scr_pos1,scr_pos2); if mx>=240 then begin N27.Enabled:=false;

```



```

exit; end; N28.Enabled:=true; end; procedure TForm1.N28Click(Sender:
TObject);
//уменьшение масштаба
Begin mx:=trunc(mx/2);my:=trunc(my/2);
Image1.Canvas.Rectangle(0,0,Image1.Width,Image1.Height);
DrawAxis(scr_pos1,scr_pos1+45,scr_pos2,scr_pos2+45);
ReDrawEllipse(scr_pos1,scr_pos2); if mx<=15 then begin N28.Enabled:=false;
exit; end; N27.Enabled:=true; end; procedure TForm1.N31Click(Sender:
TObject);
//построение модели
var f:textfile; //файл i,j:integer; found:boolean;
//найдена ли заданая запись в списке
ElRecord2,ElRecord3: PMyListE; cross:boolean; tmp_el:string; tmp_kr:real;
Begin Sort; Image1.Canvas.Rectangle(0,0,Image1.Width,Image1.Height);
DrawAxis(scr_pos1,scr_pos1+45,scr_pos2,scr_pos2+45);
ReDrawEllipse(scr_pos1,scr_pos2);
//контроль ввода источника
found:=false; for i:=0 to MyListE.Count-1 do begin
ElRecord1:=MyListE.Items[i];
if ElRecord1.elnumber='s' then found:=true; end; if found=false then
begin ShowMessage('Не задан источник'); exit; end; //контроль ввода цели
found:=false; for i:=0 to MyListE.Count-1 do begin
ElRecord1:=MyListE.Items[i];
if ElRecord1.elnumber='t' then found:=true; end; if found=false then begin
ShowMessage('Не задана цель'); exit; end; //построение касательных
for i:=0 to MyListE.Count-2 do begin ElRecord1:=MyListE.Items[i];
j:=i+1; while j<>MyListE.Count do begin ElRecord2:=MyListE.Items[j];
j:=j+1; if (ElRecord1.elnumber<>ElRecord2.elnumber) then

```

```

BuildTangent(ElRecord1.elnumber,ElRecord2.elnumber,ElRecord1.x_c,ElRecord1.y_c,ElRecord1.R,ElRecord2.x_c,ElRecord2.y_c,ElRecord2.R); end; end;
//проверка на пересечение рёбрами окружностей
for i:=0 to MyListM.Count-2 do begin for j:=0 to MyListM.Count-1 do
begin MdRecord:=MyListM.Items[j]; if MdRecord.numrebra=i+1 then break;
end; cross:=false; for j:=0 to MyListE.Count-2 do begin
ElRecord1:=MyListE.Items[j]; if ElRecord1.elnumber=MdRecord.el1 then
break;
end; for j:=0 to MyListE.Count-1 do begin ElRecord2:=MyListE.Items[j];
if ElRecord2.elnumber=MdRecord.el2 then break; end;
for j:=1 to MyListE.Count-2 do begin ElRecord3:=MyListE.Items[j];
if (ElRecord1.elnumber<>ElRecord3.elnumber)then begin
cross:=FindCross(MdRecord.x1,MdRecord.y1,MdRecord.x2,MdRecord.y2,
ElRecord3.x_c,ElRecord3.y_c,ElRecord3.R); if cross=true then break; end; end;
//изменение направления ребра
for j:=0 to MyListM.Count-1 do begin MdRecord:=MyListM.Items[j];
if MdRecord.numrebra=i+1 then break; end;
if (MdRecord.x1>MdRecord.x2)and(MdRecord.el2<>'t') then
begin tmp_el:=mdrecord.el1; MdRecord.el1:=MdRecord.el2;
MdRecord.el2:=tmp_el; tmp_kr:=MdRecord.x1; MdRecord.x1:=MdRecord.x2;
MdRecord.x2:=tmp_kr; tmp_kr:=MdRecord.y1; MdRecord.y1:=MdRecord.y2;
MdRecord.y2:=tmp_kr; MyListM.Items[j]:=MdRecord; end;
if cross=true then begin for j:=0 to MyListM.Count-1 do begin
MdRecord:=MyListM.Items[j]; if MdRecord.numrebra=i+1 then break; end;
MyListM.Delete(j); end; end; for i:=0 to MyListM.Count-1 do begin
MdRecord:=MyListM.Items[i]; MdRecord.numrebra:=i+1; end;
assignfile(f,'modell.txt'); rewrite(f); for i:=0 to MyListM.Count-1 do begin
MdRecord:=MyListM.Items[i];
writeln(f,MdRecord.numrebra,' ',MdRecord.el1,' ',MdRecord.el2,'

```

```

',floattostrf(MdRecord.x1,ffFixed,5,4),' ', floattostrf(MdRecord.y1,ffFixed,5,4),'
',floattostrf(MdRecord.x2,ffFixed,5,4),' ',floattostrf(MdRecord.y2,ffFixed,5,4));
    end; closefile(f); //Вывод на экран касательных
for i:=0 to MyListM.Count-1 do begin MdRecord:=MyListM.Items[i];
koord(MdRecord.x1-scr_pos1,MdRecord.y1-scr_pos2);
image1.Canvas.Pen.Color:=clBlue;
image1.Canvas.MoveTo(trunc(ksi),trunc(eta));
koord(MdRecord.x2-scr_pos1,MdRecord.y2-scr_pos2);
image1.Canvas.LineTo(trunc(ksi),trunc(eta));
image1.Canvas.Pen.Color:=clBlack;
//ShowMessage('OK'); end; N32.Enabled:=true; N15.Enabled:=false;
N21.Enabled:=false; N23.Enabled:=false; N31.Enabled:=false;
N2.Enabled:=true;
end; procedure TForm1.N32Click(Sender: TObject); var D: MyD; //описание D
ang:real; //угол между рёбрами i,j,k:integer; //счётчики в циклах
min:real; //минимальный суммарный угол
found:boolean; //найдена ли заданная запись в списке
mywhere:string; //имя списка, где найдена запись
path:string; //путь ind:integer; //индекс записи
x1,y1,x2,y2:real; LRecord: PListL; //запись в списке L
SmRecord: PListSm; //запись в списке смежных рёбер
MdRecordTmp: PMyListM; //временная запись при поиске смежных рёбер
f:textfile; tmp:integer; label label1; begin tmp:=1;
assignfile(f,'F:\UNIVER\Diploma\1\MyProject\debug.doc'); rewrite(f);
N31.Enabled:=false; N32.Enabled:=false;
//определение части окружности, в которую направлены рёбра
for i:=0 to MyListM.Count-1 do begin MdRecord:=MyListM.Items[i];
for j:=0 to MyListE.Count-1 do begin ElRecord1:=MyListE.Items[j];
if ElRecord1.elnumber=MdRecord.el2 then break; end;

```

```

if MdRecord.y2>ElRecord1.y_c then MdRecord.dest_in:='v'
else MdRecord.dest_in:='n' end; //формирование списка смежных рёбер
New(SmRecord); SmRecord.numreb:=0; SmRecord.kolsmreber:=0; j:=0;
for i:=0 to MyListM.Count-1 do begin MdRecord:=MyListM.Items[i];
if MdRecord.el1='s' then begin j:=j+1;
SmRecord.numsmreb[j]:=MdRecord.numrebra;
SmRecord.kolsmreber:=SmRecord.kolsmreber+1; end; end;
ListSm.Add(SmRecord);
for k:=0 to MyListM.Count-1 do begin MdRecord:=MyListM.Items[k];
New(SmRecord); SmRecord.kolsmreber:=0;
SmRecord.numreb:=MdRecord.numrebra; for i:=0 to MyListE.Count-1 do
Begin ElRecord1:=MyListE.Items[i];
if ElRecord1.elnumber=MdRecord.el2 then break; end;
if MdRecord.y2>ElRecord1.y_c then begin j:=1; for i:=0 to MyListM.Count-1
do
begin MdRecordTmp:=MyListM.Items[i]; if MdRecordTmp.el1=MdRecord.el2
then
(MdRecordTmp.naklon<MdRecord.naklon)and(MdRecordTmp.y1>ElRecord1.y
_c)
Then begin SmRecord.numsmreb[j]:=MdRecordTmp.numrebra;
SmRecord.kolsmreber:=SmRecord.kolsmreber+1; j:=j+1; end; end;
ListSm.Add(SmRecord); end; if MdRecord.y2<=ElRecord1.y_c then begin
j:=1; for i:=0 to MyListM.Count-1 do begin MdRecordTmp:=MyListM.Items[i];
if MdRecordTmp.el1=MdRecord.el2 then if
(MdRecordTmp.naklon>MdRecord.naklon)and(MdRecordTmp.y1<ElRecord1.y
_c) then begin SmRecord.numsmreb[j]:=MdRecordTmp.numrebra;
SmRecord.kolsmreber:=SmRecord.kolsmreber+1; j:=j+1; end; end;
ListSm.Add(SmRecord); end; end; //формируем первое описание D
MdRecord:=MyListM.Items[0]; D.NumEl:='s'; D.x1:=0; D.y1:=0; D.x2:=0;

```

---

```

D.y2:=0; D.numrebra:=0; D.sumang:=0; D.vn:='s'; D.path:='';
//помещаем первое описание D в L New(LRecord);
LRecord.NumEl:=D.NumEl; LRecord.x1:=D.x1; LRecord.y1:=D.y1;
LRecord.x2:=D.x2; LRecord.y2:=D.y2; LRecord.numrebra:=D.numrebra;
LRecord.sumang:=D.sumang; LRecord.vn:=D.vn; LRecord.path:='';
ListL.Add(LRecord); N20.Enabled:=true; label1: if ListL.Count=0 then
Begin ShowMessage('Пути не существует'); exit; end;
//выбираем из L запись с min суммарным углом ind:=0;
LRecord:=ListL.Items[0];
min:=LRecord.sumang; for i:=1 to ListL.Count-1 do begin
LRecord:=ListL.Items[i]; if min>LRecord.sumang then begin
min:=LRecord.sumang; ind:=i; end; end; LRecord:=ListL.Items[ind];
//переносим найденную запись в список M New(MRecord);
MRecord.NumEl:=LRecord.NumEl; MRecord.numrebra:=LRecord.numrebra;
MRecord.x1:=LRecord.x1; MRecord.y1:=LRecord.y1;
MRecord.x2:=LRecord.x2;
MRecord.y2:=LRecord.y2; MRecord.sumang:=LRecord.sumang;
MRecord.path:=LRecord.path; MRecord.vn:=LRecord.vn;
ListM.Add(MRecord); ListL.Delete(ind);
if MRecord.NumEl='t' then //последняя окружность begin
MRecord:=ListM.Items[ListM.Count-1];
label5.Visible:=true;label8.Visible:=true;
label8.Caption:=floattostrf(MRecord.sumang,ffFixed,3,5);
//рисование найденного пути Form1.Image1.Canvas.Pen.Width:=2;
Form1.Image1.Canvas.Pen.Color:=clGreen; path:=MRecord.path;
delete(path,length(path),1); while path<>" do begin
x1:=strtofloat(copy(path,1,pos('*',path)-1)); delete(path,1,pos('*',path));
y1:=strtofloat(copy(path,1,pos('*',path)-1)); delete(path,1,pos('*',path));
x2:=strtofloat(copy(path,1,pos('*',path)-1)); delete(path,1,pos('*',path));

```

```

if pos('*',path)=0 then begin y2:=strtofloat(path); delete(path,1,length(path));
end else begin y2:=strtofloat(copy(path,1,pos('*',path)-1));
delete(path,1,pos('*',path)); end; Koord(x1-scr_pos1,y1-scr_pos2);
Form1.Image1.Canvas.MoveTo(trunc(ksi),trunc(eta));
Koord(x2-scr_pos1,y2-scr_pos2);
Form1.Image1.Canvas.LineTo(trunc(ksi),trunc(eta)); end;
Form1.Image1.Canvas.Pen.Width:=1;
Form1.Image1.Canvas.Pen.Color:=clBlack; exit; end;
//поиск записи в SmList, которая соответствует найденному ребру
for i:=0 to ListSm.Count-1 do begin SmRecord:=ListSm.Items[i];
if SmRecord.numreb=MRecord.numrebra then break;
end; i:=1; //перебор всех смежных рёбер while i<=SmRecord.kolsmreber do
begin //поиск в MyListM ребра с номером смежного ребра
for j:=0 to MyListM.Count-1 do begin MdRecord:=MyListM.Items[j];
if MdRecord.numrebra=SmRecord.numsmreb[i] then break; end;
//угол между ребром и смежным ребром
ang:=FindAngle(MRecord.x1,MRecord.y1,MRecord.x2,MRecord.y2,MdRecord
.x1,
MdRecord.y1, MdRecord.x2,MdRecord.y2);
writeln(f,'x1_1=' + floattostrf(mRecord.x1,ffFixed,5,2) + '+'y1_1=' +
floattostrf(mRecord.y1,ffFixed,5,2) + '+'x1_2=' +
floattostrf(mRecord.x2,ffFixed,5,2) + '+'y1_2=' +
floattostrf(mRecord.y2,ffFixed,5,2) + '+'x2_1=' +
floattostrf(mdRecord.x1,ffFixed,5,2) + '+'y2_1=' +
floattostrf(mdRecord.y1,ffFixed,5,2) + '+'x2_2=' +
floattostrf(mdRecord.x2,ffFixed,5,2) + '+'y2_2=' +
floattostrf(mdRecord.y2,ffFixed,5,2));
writeln(f, floattostrf(ang,ffFixed,5,2)); tmp:=tmp+1;
if tmp=23 then ShowMessage('24'); //closefile(f);

```

```
//формирование описания D' D.NumEl:=MdRecord.el2;
D.x1:=MdRecord.x1; D.y1:=MdRecord.y1; D.x2:=MdRecord.x2;
D.y2:=MdRecord.y2; D.numrebra:=MdRecord.numrebra;
D.sumang:=MRecord.sumang+ang; D.vn:=MdRecord.dest_in;
D.path:=MRecord.path+floattostr(MdRecord.x1)+'*'+floattostr(MdRecord.y1)+'
*'
+floattostr(MdRecord.x2)+'*'+floattostr(MdRecord.y2)+'*';
found:=false;mywhere:=""; //поиск в ListL записи, эквивалентной D
for j:=0 to ListL.Count-1 do begin LRecord:=ListL.Items[j]; if
(LRecord.NumEl=D.NumEl)and(LRecord.vn=D.vn)and(LRecord.sumang>D.su
mang
) then begin found:=true;mywhere:=mywhere+'L';ind:=j;break; end end;
//поиск в ListM записи, эквивалентной D for j:=0 to ListM.Count-1 do
Begin MRecord:=ListM.Items[j]; if
(MRecord.NumEl=D.NumEl)and(MRecord.vn=D.vn)and(MRecord.sumang>D.
sumang) then begin found:=true;mywhere:=mywhere+'M';ind:=j;break; end end;
//если ребро нигде не найдено if found=false then begin //помещаем D в L
New(LRecord); LRecord.NumEl:=D.NumEl; LRecord.x1:=D.x1;
LRecord.y1:=D.y1; LRecord.x2:=D.x2; LRecord.y2:=D.y2;
LRecord.numrebra:=D.numrebra; LRecord.sumang:=D.sumang;
LRecord.vn:=D.vn; LRecord.path:=D.path; ListL.Add(LRecord);
i:=i+1; continue; end //если ребро найдено else begin
if mywhere='LM' then begin if MRecord.sumang>D.sumang then
ListM.Delete(ind);
if LRecord.sumang>=D.sumang then begin //помещаем описание D в L
if LRecord.sumang>D.sumang then ListL.Delete(ind); New(LRecord);
LRecord.NumEl:=D.NumEl; LRecord.x1:=D.x1; LRecord.y1:=D.y1;
LRecord.x2:=D.x2; LRecord.y2:=D.y2; LRecord.numrebra:=D.numrebra;
LRecord.sumang:=D.sumang; LRecord.vn:=D.vn; LRecord.path:=D.path;
```

```

ListL.Add(LRecord); i:=i+1; continue; end else begin i:=i+1; continue;end;
end; if mywhere='L' then begin if LRecord.sumang>=D.sumang then
begin //помещаем описание D в L
if LRecord.sumang>D.sumang then ListL.Delete(ind); New(LRecord);
LRecord.NumEl:=D.NumEl; LRecord.x1:=D.x1; LRecord.y1:=D.y1;
LRecord.x2:=D.x2; LRecord.y2:=D.y2; LRecord.numrebra:=D.numrebra;
LRecord.sumang:=D.sumang; LRecord.vn:=D.vn; LRecord.path:=D.path;
ListL.Add(LRecord); i:=i+1; continue; end else begin i:=i+1; continue;end;
end; if mywhere='M' then begin if MRecord.sumang>=D.sumang then
begin //помещаем описание D в M
if MRecord.sumang>D.sumang then ListM.Delete(ind); New(lRecord);
lRecord.NumEl:=D.NumEl; lRecord.x1:=D.x1;lRecord.y1:=D.y1;
lRecord.x2:=D.x2; lRecord.y2:=D.y2; lRecord.numrebra:=D.numrebra;
lRecord.sumang:=D.sumang; lRecord.vn:=D.vn; lRecord.path:=D.path;
Listl.Add(MRecord); i:=i+1; continue; end else begin i:=i+1;continue;end;
end; end; end; goto label1; closefile(f); end;
procedure TForm1.N16Click(Sender: TObject); //задание источника
begin panel1.Visible:=true; Form1.Menu:=MainMenu2; is_source:=true;
edit1.SetFocus; if target=true then N31.Enabled:=true; end;
procedure TForm1.N17Click(Sender: TObject); //задание цели
begin panel1.Visible:=true; Form1.Menu:=MainMenu2; is_target:=true;
edit1.SetFocus; if source=true then N31.Enabled:=true; end;
procedure TForm1.N18Click(Sender: TObject);
//вызов окна для добавления новой окружности
Begin panel1.Visible:=true; Form1.Menu:=MainMenu2; edit1.SetFocus;
end; procedure TForm1.N19Click(Sender: TObject); begin
if MyListE.Count<>0 then begin ElRecord1:=MyListE.Items[MyListE.Count-
1];
if ElRecord1.elnumber='s' then begin source:=false; N16.Enabled:=true;

```



---

```

N31.Enabled:=false; N32.Enabled:=false; end else if ElRecord1.elnumber='t'
then
Begin target:=false; N17.Enabled:=true; N31.Enabled:=false;
N32.Enabled:=false;
end; MyListE.Delete(MyListE.Count-1); num_el:=num_el-1;
Image1.Canvas.Rectangle(0,0,Image1.Width,Image1.Height);
DrawAxis(scr_pos1,scr_pos1+45,scr_pos2,scr_pos2+45);
ReDrawEllipse(scr_pos1,scr_pos2); end; end;
procedure TForm1.N13Click(Sender: TObject);
//считывание окружностей из файла var f:textfile; //файл с окружностями
str:string; xc,yc,R:real; num:string; //номер окружности
i:integer;//вспомогательные переменные для разбивки строки
ch:string; //вспомогательная переменная для разбивки строки
begin if opendialog1.Execute and fileexists(opendialog1.FileName) then
begin assignfile(f,opendialog1.FileName); try reset(f); except
showmessage('Невозможно открыть файл'+ opendialog1.FileName);
exit; end; while not eof(f) do begin readln(f,str); str:=PointtoComma(str);
//разбивка строки num:=""; xc:=0; yc:=0; R:=0; i:=1; repeat ch:=copy(str,i,1);
if (num<>"")and(xc<>0)and(yc<>0)and(R=0) then begin R:=strtofloat(str);
break; end else if ch=' ' then begin if num="" then num:=copy(str,1,i-1) else
if xc=0 then xc:=strtofloat(copy(str,1,i-1)) else
if yc=0 then yc:=strtofloat(copy(str,1,i-1)) else R:=strtofloat(copy(str,1,i-1));
delete(str,1,i); i:=1; end else i:=i+1; until str=""; if num='s' then begin
if source=true then begin ShowMessage('Источник уже задан');
exit; end; DrawMyEllipse(xc-scr_pos1,yc,R,'s'); N16.Enabled:=false;
source:=true; end else if num='t' then begin if target=true then begin
ShowMessage('Цель уже задана'); N31.Enabled:=true; exit; end;
DrawMyEllipse(xc-scr_pos1,yc,R,'t'); N17.Enabled:=false; target:=true; end
else DrawMyEllipse(xc-scr_pos1,yc,R,num);

```

---

```

New(EIRecord1); //добавление новой окружности (новой записи) в список
if (num='s')or(num='t') then EIRecord1.elnumber:=num
else begin num_el:=num_el+1; EIRecord1.elnumber:=inttostr(num_el);
end; EIRecord1.x_c:=xc; EIRecord1.y_c:=yc; EIRecord1.R:=R;
MyListE.Add(EIRecord1); end; closefile(f); end; if MyListE.Count<>0 then
Begin N30.Enabled:=true; N31.Enabled:=true; N13.Enabled:=false;
N22.Enabled:=true; N23.Enabled:=true; end; end;
procedure TForm1.N14Click(Sender: TObject);
//сохранение в файл var f:textfile; i,j:integer; str:string; begin
savedialog1.Execute then begin assignfile(f,savedialog1.FileName);
rewrite(f); if MyListE.Count<>0 then begin for i:=0 to MyListE.Count-1 doif
begin EIRecord1:=MyListE.Items[i];
str:=EIRecord1.elnumber+' '+floattostr(EIRecord1.x_c)+'
'+floattostr(EIRecord1.y_c)+' '+floattostr(EIRecord1.R);
//замена запятых на точки for j:=1 to length(str) do begin
if copy(str,j,1)=',' then begin delete(str,j,1); insert('.',str,j); end; end;
writeln(f,str); end; end; closefile(f); end; end;
procedure TForm1.N21Click(Sender: TObject);
//вызов окна для задание размеров поля begin Panel2.Visible:=true;
edit7.SetFocus; Form1.Menu:=MainMenu2; end;
procedure TForm1.N20Click(Sender: TObject); var i:integer;
xc,yc,R:real;//характеристики окружности x1,x2,y1,y2:real;
path:string; //найденный оптимальный путь begin N2.Enabled:=false;
Image1.Canvas.Rectangle(0,0,Image1.Width,Image1.Height);
DrawAxis(scr_pos1,scr_pos1+45,scr_pos2,scr_pos2+45);
if MyListE.Count<>0 then //перерисовка окружностей
begin for i:=0 to MyListE.Count-1 do begin EIRecord1:=MyListE.Items[i];
xc:=EIRecord1.x_c-scr_pos1; yc:=EIRecord1.y_c-scr_pos2;
R:=EIRecord1.R; DrawMyEllipse(xc,yc,R,EIRecord1.elnumber) end; end;

```

```

if ListM.Count<>0 then //рисование найденного пути begin
MRecord:=ListM.Items[ListM.Count-1]; Form1.Image1.Canvas.Pen.Width:=2;
Form1.Image1.Canvas.Pen.Color:=clGreen; path:=MRecord.path;
delete(path,length(path),1); while path<>" do begin
x1:=strtofloat(copy(path,1,pos('*',path)-1)); delete(path,1,pos('*',path));
y1:=strtofloat(copy(path,1,pos('*',path)-1)); delete(path,1,pos('*',path));
x2:=strtofloat(copy(path,1,pos('*',path)-1)); delete(path,1,pos('*',path));
if pos('*',path)=0 then begin y2:=strtofloat(path); delete(path,1,length(path));
end else begin y2:=strtofloat(copy(path,1,pos('*',path)-1));
delete(path,1,pos('*',path)); end; Koord(x1-scr_pos1,y1-scr_pos2);
Form1.Image1.Canvas.MoveTo(trunc(ksi),trunc(eta));
Koord(x2-scr_pos1,y2-scr_pos2);
Form1.Image1.Canvas.LineTo(trunc(ksi),trunc(eta)); end;
Form1.Image1.Canvas.Pen.Width:=1;
Form1.Image1.Canvas.Pen.Color:=clBlack;
end; clear:=true; end; procedure TForm1.N23Click(Sender: TObject);
//начать редактирование begin editing:=true; label3.Visible:=true;
N31.Visible:=false; N32.Visible:=false; N23.Enabled:=false;
N24.Enabled:=true; N12.Enabled:=false; N15.Enabled:=false;
N30.Enabled:=false; N20.Enabled:=false; N21.Enabled:=false; end;
procedure TForm1.N24Click(Sender: TObject); //закончить редактирование
begin editing:=false; label3.Visible:=false; N31.Visible:=true;
N32.Visible:=true;
N23.Enabled:=true; N24.Enabled:=false; N12.Enabled:=true;
N15.Enabled:=true;
N30.Enabled:=true; N20.Enabled:=true; N21.Enabled:=true; Sort;
Image1.Canvas.Rectangle(0,0,Image1.Width,Image1.Height);
DrawAxis(scr_pos1,scr_pos1+45,scr_pos2,scr_pos2+45);
ReDrawEllipse(scr_pos1,scr_pos2); end;

```

```

procedure TForm1.N2Click(Sender: TObject); //определение номера ребра
begin ListReb:=TList.Create; if MyListM.Count>0 then finding_rebro:=true;
N3.Enabled:=true; end; procedure TForm1.N3Click(Sender: TObject);
//поиск пути по выделенным рёбрам var i,j:integer; sum_angle:real;
TmpRecord: PMyListM;
SmRecord: PListSm; //запись в списке смежных рёбер
found:boolean; ind:integer; begin
if (finding_rebro=true)and (ListReb.Count<>0)then begin sum_angle:=0;
//если последнее ребро не входит в цель
RebRecord:=ListReb.Items[ListReb.Count-1]; if RebRecord.e12<>'t' then
Begin ShowMessage('Последнее ребро не входит в цель'); exit; end;
ind:=0; for i:=0 to ListReb.Count-2 do begin found:=false;
RebRecord:=ListReb.Items[i]; TmpRecord:=ListReb.Items[i+1];
for j:=0 to ListSm.Count-1 do begin SmRecord:=ListSm.Items[j];
if SmRecord.numreb=RebRecord.numrebra then begin found:=true;
ind:=j; break; end; end; if found=true then begin
SmRecord:=ListSm.Items[ind]; for j:=0 to SmRecord.kolsmreber do begin
if TmpRecord.numrebra=SmRecord.numsmreb[j] then break; end; end; end;
for i:=0 to ListReb.Count-2 do begin RebRecord:=ListReb.Items[i];
TmpRecord:=ListReb.Items[i+1];
sum_angle:=sum_angle+FindAngle(RebRecord.x1,RebRecord.y1,RebRecord.x
2,Reb
Record.y2, TmpRecord.x1,TmpRecord.y1,TmpRecord.x2,TmpRecord.y2);
end; Label5.Visible:=true; Label8.Visible:=true;
Label8.Caption:=floattostr(sum_angle); n4.Enabled:=true; end;
if ListReb.Count<>0 then begin for i:=0 to ListReb.Count-1 do
ListReb.Delete(0);
end; end; procedure TForm1.N4Click(Sender: TObject);
//отмена поиска по рёбрам var i:integer; begin

```

```

Image1.Canvas.Rectangle(0,0,Image1.Width,Image1.Height);
DrawAxis(scr_pos1,scr_pos1+45,scr_pos2,scr_pos2+45);
ReDrawEllipse(scr_pos1,scr_pos2); Label5.Visible:=false;
Label8.Visible:=false;
if ListReb.Count<>0 then begin for i:=0 to ListReb.Count-1 do
ListReb.Delete(0);
end; end; procedure TForm1.N5Click(Sender: TObject);
//ВЫХОД с очищением списков var i:integer; begin if MyListE.Count<>0 then
Begin for i:=0 to MyListE.Count-1 do MyListE.Delete(0); MyListE.Free;
end; if MyListM.Count<>0 then begin
for i:=0 to MyListM.Count-1 do MyListM.Delete(0); MyListM.Free;
end; if ListL.Count<>0 then begin for i:=0 to ListL.Count-1 do ListL.Delete(0);
ListL.Free; end; if ListM.Count<>0 then begin
for i:=0 to ListM.Count-1 do ListM.Delete(0); ListM.Free; end;
if ListSm.Count<>0 then begin for i:=0 to ListSm.Count-1 do ListSm.Delete(0);
ListSm.Free; end; Close; end; procedure TForm1.N6Click(Sender: TObject);
//Вывод формы на печать begin
if MessageDlg('Вывести на печать',mtConfirmation, [mbYes, mbNo], 0) =
mrYes then begin Form1.Color:=clWhite; Form1.Print;
Form1.Color:=clBtnFace;
end; end; END.

```

*Наукове видання*

ЩЕРБАНЬ В.Ю.

# **МЕХАНІКА НИТКИ**

Монографія

Підписано до друку 06.06.2018 р.  
Формат 60x84/16. Папір офсетний.  
Ум. друк. арк. 31,38  
Наклад 100 прим.

Виготовлено ТОВ «Видавництво «Укрбланковидав»  
м. Київ, вул. Павлівська 9  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 3521 від 02.07.2009  
Відповідає санітарно-гігієнічним нормам України  
ТУ У 22.2-21682819-004:2011