

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

**КУЗЯЄВ ІВАН МИХАЙЛОВИЧ**

УДК 678.057:(532.5:532.135)

**ТЕПЛОМАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ І РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ**  
**ЕКСТРУЗІЇ ПОЛІМЕРІВ**

Спеціальність 05.17.08 - Процеси та обладнання хімічної технології

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

**Харків - 2009**

**Дисертацією є рукопис.**

Робота виконана на кафедрі хімічного машинобудування та апаратобудування ДВНЗ „Український державний хіміко-технологічний університет“ Міністерства освіти і науки України, м. Дніпропетровськ.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор

**ШВЕНЬ ОЛЕКСАНДР НАУМОВИЧ,**

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, професор кафедри процесів і обладнання переробних виробництв

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

**ШАПОРЕВ ВАЛЕРІЙ ПАВЛОВИЧ,**

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, м. Харків, завідувач кафедрою хімічної техніки і промислової екології

доктор технічних наук, професор

**ПЕТУХОВ АРКАДІЙ ДЕМ'ЯНОВИЧ,**

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, м. Київ, професор кафедри хімічної технології композиційних матеріалів

доктор технічних наук, професор

**МІСЯЦЬ ВОЛОДИМИР ПЕТРОВИЧ,**

Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ, завідувач кафедрою інженерної механіки

Захист відбудеться “25” березня 2010 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.05 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут”, за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий “19” лютого 2010 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 64.050.05

Тимченко В.К.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Переробка полімерів у напівфабрикати й вироби є одним з напрямів хімічної промисловості, що найбільш динамічно розвивається в наш час як у нашій країні, так і в провідних державах світу.

Однак, немаловажним фактором для остаточного оформлення параметрів об'єктів, що містять елементи з полімерних та еластомерних матеріалів, є технологічні та геометричні параметри переробного обладнання і характеристики перероблюваного матеріалу. Таким чином, варто виділити два основних фактори для оптимізації випуску виробів із полімерів різної хімічної структури, а саме: удосконалювання конструктивних особливостей машин з урахуванням їх функціональних можливостей та налагодження процесу перероблення з урахуванням досягнення необхідного результату за якістю отримуваних виробів і оптимальним співвідношенням між продуктивністю обладнання з одного боку та матеріаломісткістю і споживаною потужністю з іншого боку.

Слід зазначити, що сучасні екструдери здебільшого є машинами з середніми швидкостями обертання робочих елементів. Полімерні матеріали в даний час потребуються у великих об'ємах, що в свою чергу вимагає значних обсягів випуску готової продукції й напівфабрикатів, а для цього необхідно значне збільшення загальної продуктивності всіх типів екструзійної техніки. Найбільш оптимальним напрямком розв'язку цієї науково-прикладної проблеми є підвищення продуктивності існуючих аналогів за рахунок збільшення швидкості руху робочих елементів. При цьому до процесів високошвидкісної екструзії можна віднести такі, для яких колова швидкість перевищує 0,4 м/с або швидкість зсуву перевищує  $200\text{ с}^{-1}$ .

Враховуючи великий обсяг випуску виробів з полімерних матеріалів та значні енерговитрати на їх отримання, створення науково-прикладних основ тепломасообмінних процесів екструзії з урахуванням гідродинаміки в робочих каналах, а також проектування та промислове впровадження екструзійного обладнання є актуальною науковою проблемою, рішення якої присвячена дисертаційна робота.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі хімічного машинобудування Державного вищого навчального закладу “Український державний хіміко-технологічний університет”. Здобувач був науковим керівником госпдогвірної теми “Дослідити й упровадити зносостійкі поліуретани з метою підвищення надійності роботи обладнання в умовах Березниківського ВО “Азот” (м. Березники, Росія), і відповідальним виконавцем держбюджетної теми “Розробка технології й створення виробництва електропровідних композиційних матеріалів на основі термостійких полімерів” (№ДР167Х00/1.12)

– за програмою Міністерства промислової політики України. Як виконавець брав участь у держбюджетних НДР МОН України: “Розробка і дослідження способів інтенсифікації та підвищення надійності хіміко-технологічного устаткування” (№ДР01860011892); “Оптимізація конструктивно-технологічних параметрів хімічного обладнання та підвищення його надійності” (№ДР0102U006459); “Розробка теоретичних основ створення нових композиційних матеріалів триботехнічного призначення й конструктивна розробка вузлів тертя й герметизації машин й апаратів” (№ ДР10020190/08); “Розробка теоретичних основ створення багатокомпонентних систем на основі термостійких полімерів” (№ДР10050290/08); “Розробка триботехнічних полімерних композиційних матеріалів на їх основі та оптимізація процесів виготовлення виробів” (№ДР10080390/08). Частина досліджень виконувалася у рамках договору про науково-технічні зв'язки між Пекінським університетом хімічної технології (м. Пекін, КНР) і Українським державним хіміко-технологічним університетом (м. Дніпропетровськ).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розроблення науково-практичних основ високошвидкісної екструзії для оптимізації технологічних і геометричних параметрів з урахуванням властивостей перероблюваного матеріалу, а також створення нових конструктивних елементів і екструзійного обладнання в цілому, що будуть забезпечувати високу ефективність роботи обладнання, зниження енергетичних і матеріальних витрат та трудових ресурсів при виготовленні й експлуатації екструзійної техніки.

Для досягнення мети, поставленої в роботі, вирішуються наступні задачі:

- обґрунтувати можливість використання типових одночерв'ячних машин при здійсненні високошвидкісних процесів екструзії для термопластичних матеріалів;
- розвинути теоретичні положення для описання процесів руху й теплообміну в робочих об'ємах одночерв'ячних екструдерів при високих швидкостях обертання черв'яка з удосконаленням розрахункової схеми робочого каналу при врахуванні можливих змін у граничних умовах для оптимізації параметрів при здійсненні процесів переробки полімерних матеріалів;
- теоретично й експериментально дослідити процеси, що здійснюються в робочих зазорах черв'ячно-дискових екструдерів, і удосконалити основоположні рівняння для аналізу процесів течії та теплообміну в даному типі обладнання з вибором відповідних рівнянь стану;
- створити конструкції високошвидкісних агрегатів з використанням відцентрової рушійної сили – відцентрових екструдерів, з розробкою їх конструктивного оформлення;
- розробити теоретичні основи руху й теплообміну в робочих каналах відцентрових екструдерів;

– удосконалити теоретичні залежності для описання динамічного поведіння газових пухирів у процесі екструзії полімерів й оцінити вплив великих швидкостей деформацій, що з’являються на поверхні пухиря, на ступінь поділу наноконкомплексів;

– обґрунтувати можливість використання екструзійної техніки в поєднанні з низкою допоміжних пристроїв для дрібнодисперсного поділу комплексів наноагрегатів при здійсненні високошвидкісних екструзійних процесів;

– розробити рекомендації щодо впровадження розроблених теорій і конструкцій устаткування в промисловість.

**Об’єкт дослідження** – тепломасообмінні процеси, які відбуваються в робочих каналах екструзійної техніки в умовах здійснення високошвидкісних режимів, а також конструктивне оформлення таких агрегатів.

**Предмет дослідження** – закономірності тепломасообміну та течії в робочих каналах одночерв’ячних, черв’ячно-дискових і відцентрових екструдерів; закономірності динамічної поведінки газових пухирів у полімерному середовищі; закономірності поділу наноконкомплексів у робочих зонах екструзійного обладнання для різного типу силового впливу на перероблюване середовище.

**Методи дослідження.** Усі теоретичні положення дисертації базуються на фундаментальних положеннях теплообміну та гідродинаміки, з урахуванням залежності коефіцієнта в’язкості від швидкості деформації та наявності пружних властивостей для розплавів полімерів. При отриманні визначальних рівнянь для описання плинину та теплообміну в робочих каналах екструзійних машин використовуються методи рішення диференціальних рівнянь у частинних похідних, а саме: метод інтегрального перетворення Лапласа (при цьому розглядається перероблюваний матеріал або як суцільне середовище, або як його дискретизація на окремі шари відповідно до складності функціональних залежностей для складових швидкостей руху та функції дисипації); метод кінцевих різниць за неявною схемою. При рішенні задач у циліндричній системі координат для деяких задач розв’язувалися рівняння Бесселя в циліндричних функціях, а в сферичній – рівняння Лежандра в гіпергеометричних функціях. Теплофізичні характеристики полімерного матеріалу оброблялися з використанням регресійного аналізу. Експериментальні дослідження на фізичних моделях та промислового обладнанні виконувалися за допомогою сучасних високоточних вимірвальних приладів.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у вирішенні науково-прикладної проблеми підвищення ефективності роботи екструзійних агрегатів при високошвидкісних режимах за рахунок удосконалення існуючих теорій черв’ячної та черв’ячно-дискової екструзії на

основі розробки удосконалених розрахункових схем і виборі відповідних реологічних рівнянь стану, а також створення нових теоретичних основ відцентрової екструзії.

На базі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень одержано такі наукові результати:

- удосконалено теоретичні основи процесів руху й теплообміну при використанні тришарової розрахункової схеми в основних функціональних зонах одночерв'ячних екструдерів: дозування, пластикації та живлення, на основі побудови математичних моделей, що дозволяють оптимізувати параметри й режими роботи екструдера;

- набула подальшого розвитку теорія процесів перероблення полімерних матеріалів у міждискових зазорах черв'ячно-дискових екструдерів при неізотермічних умовах для опису течії розплавів полімерів на основі модифікованого рівняння стану для рідини другого порядку;

- розроблено методику рішення задач процесів екструзії для неізотермічних умов з використанням інтегрального перетворення Лапласа, як за умови суцільності розглянутого середовища, так і при дискретизації його;

- вперше розроблено теоретичні основи руху й теплообміну в робочих каналах відцентрових екструдерів різної геометричної конфігурації (дискової, конусної та прямокутної) з побудовою математичних моделей;

- вперше одержано й досліджено рішення задач динамічного поведіння газових пухирів у розплаві при екструзії полімерів і виконано оцінювання їх впливу на ступінь поділу нанокомплексів;

- вперше сформульовано й досліджено теоретичні рішення для оптимізації поділу нанокомплексів при здійсненні високошвидкісної екструзії у разі отримання полімерних нанокомпозитів.

**Практичне значення одержаних результатів** для хімічної промисловості полягає в можливості оптимізації технологічних параметрів відповідно до геометричних характеристик або навпаки оптимізації геометричних характеристик відповідно до технологічних параметрів, з урахуванням властивостей перероблюваного матеріалу. При цьому мінімізуються витрати потужності й матеріаломісткість устаткування, розраховуючи на максимально можливу продуктивність обладнання.

Побудовані математичні моделі динамічного стану газових пухирів у полімерному середовищі дозволяють підібрати необхідні умови для створення пористого матеріалу із заданою структурою пор.

Отримані математичні моделі процесів поділу наноагрегатів з обліком відповідного конструктивного оформлення робочої зони дають можливість для створення полімерних

нанокомпозитів з мінімальними розмірами наноконструкцій, що дозволяє значно поліпшити властивості одержуваних напівфабрикатів і виробів.

Розроблено нові конструкції відцентрових екструзійних машин, що дозволяють значно зменшити енергоємність і матеріаломісткість устаткування для перероблення полімерних матеріалів при одночасному підвищенні продуктивності (5 патентів України на винахід).

Розроблені реальні конструкції екструзійних агрегатів впроваджено в промисловість (ВАТ “Дніпрополімермаш”; “РОТКЕПС”; ТОВ ПК “Лідер”, м. Дніпропетровськ).

**Особистий внесок здобувача.** Основні ідеї та положення дисертації розроблено здобувачем особисто, зокрема: аналіз стану проблеми; об’єкт і предмет дослідження; теоретичні гіпотези та їх експериментальна перевірка; створення математичних моделей течії та теплообміну в робочих каналах екструзійного обладнання; теоретичні положення динамічного поведіння газових пухирів у процесі екструзії та їх вплив на розділ наноконструкцій; інтерпретація результатів і розробка конструктивного оформлення нового типу агрегатів – відцентрових екструдерів; упровадження результатів досліджень і конструктивних розробок у промисловість.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати наукових досліджень доповідалися на наступних науково-технічних конференціях і симпозиумах: «Technomer 97,15. Fachtagung uber Verarbeitung and Anwendung von Polymeren» (Хемніц, Німеччина, 1997 р.); «Korea-Russia Joint Seminar on Composite Technology» (Ганвон, Корея, 1997 р.); Всеукраїнські наукові конференції «Математичні проблеми технічної механіки» (Дніпродзержинськ, 2001, 2002 рр.); щорічні міжнародні науково-технічні конференції «Композиційні матеріали в промисловості (Славполицом)» (Ялта, 2001, 2002 і 2006 рр.); «Plastics Processing Technology Summit» (Ксиань, Китай, 2004 р.); VI Міжнародний симпозиум «Механіка еластомерів-2005» (Дніпропетровськ, 2005 р.); Міжнародна науково-практична конференція “Актуальні питання й організаційно-правові основи співробітництва України й КНР у сфері високих технологій” (Київ, 2007 р.); Міжнародна наукова конференція «Математичні проблеми технічної механіки» (Дніпропетровськ, 2008 р.)

**Публікації.** Основні положення дисертації викладено в 73 наукових працях, з них: 45 – у фахових виданнях ВАК України, 5 авторських свідоцтв СРСР, 12 патентів України.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, 8 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел, 8 додатків. Повний обсяг дисертації складає 385 сторінок, з них: 99 рисунків на 73 окремих сторінках; 28 рисунків за текстом; 2 таблиці на 1 окремій сторінці; 13 таблиць за текстом; 321 літературних джерел на 33 сторінках. Додатки на 166 сторінках окремим томом.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** розкрито сенс і стан наукової проблеми, її значимість, обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету й завдання досліджень, наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів.

**У першому розділі** наведено аналітичний огляд науково-технічної інформації вітчизняних і закордонних науковців з методів аналізу й моделювання масотеплообмінних процесів у робочих каналах основних екструзійних агрегатів, а саме: функціональних зонах одночерв'ячних машин (зони дозування, пластикації та живлення) і міждискових зонах черв'ячно-дискових агрегатів. Крім того, розглянуто проблеми отримання газонаповнених матеріалів і нанокompозитів. На основі здобутої інформації та її аналізу сформульовано цілі й напрямки досліджень.

**У другому розділі** викладено теоретичні основи неізотермічних процесів, що відбуваються в основних функціональних зонах одночерв'ячних машин: дозування, пластикації та живлення.

Для більшості черв'ячних машин геометрія гвинтової нарізки виконується таким чином, що відношення глибини гвинтового каналу до діаметра гребенів є величиною вищого порядку малості. Тоді для описання процесів у робочих каналах черв'ячних машин розрахункову схему можна привести до плоскої моделі, як показано на рис. 1. При цьому також припускається, що рухається верхня пластина, тобто розгортка корпусу зі швидкістю  $V_c$ , перпендикулярно осі черв'яка  $l$  ( $V_c = \pi D N_0$ , де  $D$  – внутрішній діаметр матеріального циліндра,  $N_0$  – частота обертання диска). Складові швидкості руху перероблюваного матеріалу  $V_z$  і  $V_x$ , відповідно вздовж осей  $z$  (уздовж довжини гвинтового каналу  $Z_d$ ) і  $x$  (уздовж ширини гвинтового каналу  $W_n$ ), виникають за рахунок компонентів для  $V_c$ , відповідно  $V_{cz}$  і  $V_{cx}$  ( $V_{cz} = V_c \cos(\varphi_0)$ ,  $V_{cx} = V_c \sin(\varphi_0)$ , де  $\varphi_0$  – кут підйому гвинтової нарізки).

Слід зазначити, що вибір розташування системи координат, а саме: або на поверхні осердя (система  $x-O-y$ ), або всередині каналу (система  $x-O_I-y$ ), зв'язаний, у першу чергу, зі спрощенням отримуваних рівнянь відповідно до граничних умов.

Розрахункова схема, що зображена на рис. 1, містить такі позначення:  $K, P, C$  – відповідно корпус, робочий канал й осердя черв'яка;  $T_k, T_m, T_c$  – розподіл температури відповідно в корпусі, перероблюваному матеріалі й осерді;  $T_{nk}, T_{vk}$  – температура відповідно на зовнішній і внутрішній поверхнях корпусу;  $T_{nc}, T_{vc}$  – температура відповідно на зовнішній і внутрішній поверхнях осердя;  $V_{ok}, T_{ok}$  – відповідно швидкість і температура середовища, що охолоджує зовнішню поверхню корпусу;  $V_{oc}, T_{oc}$  – відповідно швидкість і температура середовища, що охолоджує внутрішню поверхню осердя;  $S_0$  – осьова товщина гребеня черв'яка;  $\delta_r$  – висота радіального зазора;  $h$  – глибина гвинтового каналу;  $h_k, h_c$  – товщини відповідно корпусу й осердя черв'яка.



Дотримуючись прийнятих припущень, а саме: матеріал нестисливий; інерційні сили зневажливо малі; режим плинуща стаціонарний; масові сили зневажливо малі; плин у напрямку осі  $z$  існує тільки біля бічних стінок каналу, в іншій частині перетину каналу плин у напрямку  $z$  відсутній, тобто можна припустити, що  $y$ -складова швидкості дорівнює нулю,  $V_y = 0$ ; розміри каналу вздовж усієї довжини для циліндричного осердя постійні (тоді  $x$ -складова швидкості  $V_x$  і  $z$ -складова  $V_z$  не залежать від осі  $z$ , тобто  $\partial V_x / \partial z = \partial V_z / \partial z = 0$ ), рівняння руху спрощуються до системи:

(1)

де  $P$  – тиск, створюваний у робочому каналі,  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_{zx}$ ,  $\sigma_{zy}$  – компоненти тензора напружень.

Рис. 1. Розрахункова плоска схема для аналізу масотеплообмінних процесів у зоні дозування

У більшості випадків справедливо геометричне співвідношення  $h/W_n \leq 0,1$ , що робить зневажливо малим градієнт напруження вздовж осі  $x$ .

Для рішення рівнянь (1) вибрано реологічне рівняння стану для неньютонівської рідини, а саме: для ступеневої рідини, що можна подати так:  $\sigma_{ij} = 2 \eta_{ef}(I_2) d_{ij}$ , де  $d_{ij}$  – компоненти тензора швидкостей деформацій;  $\eta_{ef}(I_2)$  – коефіцієнт ефективної в'язкості, який залежить від другого інваріанта тензора швидкостей деформацій  $I_2$  ( $\eta_{ef}(I_2) = \mu_0 I_2^{(n-1)/2}$ ), де  $n$  – показник ступені в моделі ступеневої рідини;  $\mu$  – коефіцієнт консистенції ( $\mu = \mu_0 \exp[\beta_T (T - T_0)]$ ), де  $\mu_0$  – коефіцієнт консистенції при базовій температурі  $T_0$ ,  $\beta_T$  – температурний коефіцієнт).

Розв'язок системи (1) наводить до наступного рішення:

(2)

де  $PC_1 = \partial P / \partial z y + C_{1c}$ ;  $PC_0 = \partial P / \partial x y + C_{0c}$ .

Якщо початок системи координат розташувати на нижній границі за схемою на рис. 1 (система  $x$ - $0$ - $y$ ), то  $C_{2c} = 0$  і  $C_{3c} = 0$ . Для визначення сталих інтегрування  $C_{0c}$  і  $C_{1c}$  варто скористатися відповідними граничними умовами.

Щоб знайти градієнт тиску вздовж осі  $x$  ( $\partial P / \partial x$ ), маємо таке співвідношення

Сумарна продуктивність за рахунок трьох потоків (змушеного, протиструменя й циркуляційного) без урахування кількості заходів визначається через залежність

(3)

Витрати за рахунок витоків визначається за формулою

(4)

де  $\partial P / \partial l$  – градієнт тиску вздовж осі черв'яка  $l$ ;  $t_0$  – крок черв'яка;  $\mu_\delta$  – коефіцієнт консистенції розплаву в радіальному зазорі.

Для визначення продуктивності у випадку багатозахідного черв'яка необхідно у відповідних місцях поставити множник  $i$ , що характеризує кількість заходів.

Потужність, що витрачається в гвинтовому каналі для багатозахідного черв'яка можна знайти через залежність

(5)

Витрати потужності в радіальному зазорі для ступеневої рідини визначаються за формулою

(6)

де  $L_d$  – довжина гвинтового каналу в зоні дозування вздовж осі черв'яка  $l$ .

Загальна потужність  $N$  знайдеться як сума  $N_1$  і  $N_2$ .

Для опису теплових процесів у системі, зображеної на рис. 1, визначальна система рівнянь із урахуванням можливих припущень, що відповідають співвідношенню геометричних параметрів робочого каналу й режимів роботи, може бути надана таким чином:

(7)

(8)

(9)

де  $\rho_k, \rho_m, \rho_c$  – густина відповідно матеріалу корпусу, розплаву полімеру й черв'яка;  $C_{pk}, C_{pm}, C_{pc}$  – коефіцієнти теплоємності в такому ж порядку;  $\lambda_k, \lambda_m, \lambda_c$  – коефіцієнти теплопровідності;  $q_{dis}$  – функція дисипації, яка в загальному випадку може бути подана так

де  $A_{ij}^{(1)}$  – компоненти тензора Рівліна-Еріксена першого роду.

Кожне із трьох рівнянь (7) – (9) буде мати по дві граничні умови за координатою  $y$  і по одній початковій умові за часом. Крім того, рівняння (8) буде мати ще одну початкову умову за координатою  $z$ . При цьому слід зазначити, що при записі граничних умов можуть бути різні варіанти на поверхнях розділу між стінками каналу й полімерним матеріалом.

Надамо граничні й початкові умови так: для рівняння (7) –  $T_k = T_{vk}$  при  $y = h/2$ ,  $\pm \lambda_k \partial T_k / \partial y = \alpha_{ok} (T_{ok} - T_{nk})$  при  $y = h/2 + h_k$ ,  $T_k = T_{kn}$  при  $t = 0$ ; для рівняння (8) –  $\pm \lambda_m \partial T_m / \partial y = q_k$  при  $y = h/2$ ,  $\pm \lambda_m \partial T_m / \partial y = q_c$  при  $y = -h/2$ ,  $T_m = T_{mn}$  при  $t = 0$  ( $z = 0$ ); для рівняння (9) –  $T_c = T_{nc}$  при  $y = -h/2$ ,  $\pm \lambda_c \partial T_c / \partial y = \alpha_{oc} (T_{oc} - T_{vc})$  при  $y = -(h/2 + h_c)$ ,  $T_c = T_{cn}$  при  $t = 0$  ( $q_k, q_c$  – теплові потоки, які передаються відповідно через корпус й осердя черв'яка полімерному матеріалу).

Для граничних і початкових умов уведено позначення:  $T_{kn}, T_{mn}, T_{cn}$  – початкові температури відповідно корпусу, перероблюваного матеріалу й осердя черв'яка, які мають певну функціональну залежність (у першому наближенні можуть бути усереднені);  $\alpha_{ok}, \alpha_{oc}$  – коефіцієнти тепловіддачі між охолодним середовищем і відповідно зовнішньою поверхнею корпусу й внутрішньою поверхнею осердя черв'яка;  $q_{mk}, q_{mc}$  – теплові потоки, які переходять через границі розділу між

полімерним матеріалом і відповідно внутрішньою поверхнею корпусу й зовнішньою поверхнею осердя черв'яка.

Більшість задач з частинними похідними в даній роботі розв'язувалося за допомогою інтегрального перетворення Лапласа, що дозволяло спростити базові рівняння до рівнянь в звичайних похідних. Так для рівняння (7) та його граничних умов, одержані такі операторні аналоги:

$$dT_k^L/dy = q_{mk}/(\lambda_k s) \text{ при } y=h/2; \quad dT_k^L/dy = \alpha_{ok}/(\lambda_k s) (T_{ok}-T_{nk}) \text{ при } y=h/2+h_k,$$

де  $\alpha_k = \lambda_k / (\rho_k C_{pk})$ ;  $T_k^L$  – зображення температури  $T_k$ .

Рішення останньої системи приводить до рівняння в зображеннях

(10)

Для переходу від зображення до оригіналу в рівнянні (10) використані наступні перетворення

де .

Крім того, для різних типів виразів у зображенні також було використано із операційного обчислення кілька теорем, а саме: другу теорему розкладання, теорему множення (теорему Бореля), теорему про інтегрування оригіналу, теорему про диференціювання оригіналу тощо.

Таким чином, для оригіналу виразу (10) знайдено рівняння у вигляді

де .

Варто помітити, що нестационарні процеси в екструзійних машинах характерні тільки для перехідних режимів, наприклад, при запуску, зупинці або переході з одного швидкісного режиму на інший. Робочі режими в більшості випадків можна вважати стаціонарними. Тоді останнє рівняння спроститься до вигляду

(11)

Аналогічним чином можна отримати вирази для розподілу температури й для двох інших шарів, а саме:

(12)

(13)

де .

Слід зазначити, що система (10)–(12) містить у загальному випадку чотири невідомих величини:  $T_{nk}, T_{vk}, T_{nc}, T_{vc}$ . Для визначення невідомих граничних значень температур із цих рівнянь

запишемо наступну систему рівнянь в матричній формі (при таких позначеннях:  $T_k (h/2+h_k)= T_{nk}$ ;  $T_c (-h/2-h_c)= T_{vc}$ ;  $T_m (h/2,z)= T_{vk}$ ;  $T_m (-h/2,z)= T_{nc}$ );

(14)

де.

Для отримання числових результатів за одержаними залежностями розроблено комп'ютерні програми на базі пакета Mathcad, на які одержано Свідоцтва на авторські права на твір.

Результати розрахунків для охолоджуваного черв'яка наведені в табл. 1, а для неохолоджуваного – у табл. 2 (слід зазначити, що для неохолоджуваного черв'яка прийнята така гранична умова:  $\partial T_m / \partial y = 0$  при  $y = -h/2$ ).

Таблиця 1

Таблиця 2

Результати розрахунків для охолоджуваного черв'яка

Результати розрахунків для неохолоджуваного черв'яка

№, п/п	$N_0$ , с <sup>-1</sup>	$G_0$ , кг/год	$V_c$ , м/с	$\gamma'_{yz}$ , с <sup>-1</sup>	$T_{ox}$ , К	$T_{max}$ , К	$N$ , кВт
1	1,5	33,52	0,212	129,0	421	464	1,497
2	2,5	60,01	0,353	198,8	394	477	3,449
3	3,5	87,40	0,495	266,7	365	488	6,096
4	4,5	115,05	0,636	334,2	336	497	9,402
5	5,5	143,15	0,778	401,0	306	505	13,39
6	6,5	171,15	0,919	467,9	277	511	17,97
7	7,5	199,05	1,060	534,3	247	516	23,28

№, п/п	$N_0$ , с <sup>-1</sup>	$G_0$ , кг/год	$V_c$ , м/с	$\gamma'_{yz}$ , с <sup>-1</sup>	$T_{ox}$ , К	$T_{max}$ , К	$N$ , кВт
1	1,5	34,75	0,212	124,4	360	482	1,713
2	2,5	61,60	0,353	193,4	296	492	4,038
3	3,5	89,12	0,495	261,4	231	498	7,229
4	4,5	116,75	0,636	328,9	166	504	11,52
5	5,5	144,75	0,778	396,0	101	509	16,17
6	6,5	172,60	0,919	463,0	37	514	21,82

Об'ємні графіки розподілу температурного поля в робочому об'ємі наведено на рис. 2. Як приклад взяті такі параметри екструзійного агрегату:  $D=45$  мм;  $h=4$  мм;  $I_d=12$  (кількість витків у зоні дозування);  $\varphi_0=17,657^\circ$ ;  $t_0=D$ ;  $S_0=4$  мм;  $\delta_r=0,18$  мм;  $h_k=18$  мм;  $h_c=12,5$  мм. Матеріал черв'яка й корпусу прийнято однаковим:  $\lambda_k=\lambda_c=46,5$  Вт/(м·К). Система охолодження корпусу й черв'яка має однакові характеристики:  $\alpha_{ok}=\alpha_{oc}=4,1$  кВт/(м<sup>2</sup>·К). Прийнято такі величини для перепаду тиску вздовж осі  $z$ :  $\Delta P=15$  МПа  $\partial P / \partial z= 8,425$  МПа/м. Як перероблюваний матеріал обрано поліетилен низького тиску.

Рис. 2. Об'ємні графіки розподілу температурного поля в об'ємі перероблюваного матеріалу для третіх варіантів: а – для охолоджуваного черв'яка; б – для неохолоджуваного черв'яка. При цьому високошвидкісні режими роботи можна вважати з колової швидкості  $V_c = 0,4$  м/с (при частоті обертання для даного діаметра  $N_0 = 3$  с<sup>-1</sup>) або з узагальненої швидкості зсуву понад 200 с<sup>-1</sup>. Узагальнену швидкість зсуву можна визначити з виразу  $\gamma'_{yz} = [(\partial V_z / \partial y)^2 + (\partial V_x / \partial y)^2]^{0,5}$ . При

колових швидкостях понад 1 м/с і, відповідно, узагальнених швидкостях зсуву понад 500 с<sup>-1</sup> екструзійні процеси можна віднести до надшвидкісних.

Як видно з наведених результатів, наприклад, для охолоджуваного черв'яка при  $N_0=6,5$  с<sup>-1</sup> температура охолодного середовища складає  $T_{ox}=277$  К. Що ж стосується варіанта з неохолоджуваним черв'яком, то вже при такій частоті обертання черв'яка, відповідно до його геометричних розмірів, температуру охолодного середовища необхідно підтримувати на рівні  $T_{ox}=37$  К, що з технічної точки зору є досить складною задачею.

Слід зазначити, що для досягнення продуктивності в 171,15 кг/год (варіант №6 із табл. 1) для звичайної частоти обертання робочого органу, необхідно вже використати екструдер з діаметром черв'яка 90 мм. При цьому інші параметри будуть мати такі значення:  $N_0 = 1,17$  с<sup>-1</sup>;  $V_c = 0,331$  м/с;  $\gamma'_{yz} = 124$  с<sup>-1</sup>;  $T_{ox} = 391$  К;  $T_{max} = 479,3$  К;  $N = 13,561$  кВт;  $h = 6$  мм. Як видно з наведених результатів, для досягнення однакової продуктивності на одночерв'ячному екструдері з діаметром черв'яка 45 мм необхідно витратити дещо більшу потужність, ніж з діаметром черв'яка 90 мм (відношення складає –  $N_{45}/N_{90} = 1,325$ ), що викликано значним підвищенням зсувних деформацій, але це стосується тільки зони дозування. З урахуванням того, що допоміжні, споживаючі електроенергію прилади, а саме: нагрівачі, двигун завантаження, тощо, для екструдера з діаметром черв'яка 45 мм потребують значно менше енергії, ніж з діаметром – 90 мм, можна вважати, що загальна потужність практично не змінюється.

При цьому значно зменшується матеріаломісткість обладнання та площа виробничих приміщень. Так, для черв'ячної машини ЧП 45×20 (45×20 позначає співвідношення діаметра черв'яка до його робочої довжини у відношенні довжини до діаметра) маса буде становити  $m_{45} = 1,5$  т, а для ЧП 90×20 будемо мати  $m_{90} = 3,8$  т, тобто отримаємо –  $m_{90}/m_{45} = 2,533$ . Крім того, площі, які будуть займати ці два агрегати після їх монтажу відповідно дорівнюють  $S_{45} = 2,56$  м<sup>2</sup> і  $S_{90} = 7,2$  м<sup>2</sup>, тобто маємо таке відношення  $S_{90}/S_{45} = 2,813$ . Таким чином, в одному виробничому приміщенні можна розмістити більшу кількість агрегатів, що приведе до зменшення витрат електроенергії на допоміжні цілі (освітлення, вентиляція, подачу сировини, тощо). Слід відмітити, що кошти на виготовлення та обслуговування машин з більшими розмірами робочих органів, також будуть у рази більшими, а в деяких випадках – і на порядок.

У випадку, коли глибина гвинтового каналу має значні розміри щодо діаметра гребенів, то процеси перенесення матеріалу слід розглядати в циліндричній системі координат. Даний випадок також розглянуто у другому розділі. Одержано вирази для компонентів швидкостей, а також знайдено залежності для продуктивності, потужності й розподілу температурного поля в циліндричній системі координат.

При розв'язку задач пластикації розглянуто практично всі можливі схеми процесу плавлення полімерних матеріалів. Причому процеси плавлення розглядалися як за умови суцільності твердої полімерної пробки, так і при наявності пор усередині її. Одержано математичні залежності для розрахунку параметрів у зоні пластикації одночерв'ячних екструдерів.

При описанні процесів, які відбуваються в зоні живлення одночерв'ячних машин, значний вплив на характер руху в зоні живлення, а значить і на продуктивність, вносить тиск, який розвивається на ділянках зони живлення і залежить від сил, що діють на тверду полімерну пробку. Одержано наступний вираз для розподілу тиску в перероблюваному матеріалі в зоні живлення

(15)

де  $P_0$  – початковий тиск, що може бути створений в завантажувальному бункері;  $f_b$ ,  $f_s$  – коефіцієнти тертя перероблюваного матеріалу відповідно по стінці корпусу й по поверхні осердя черв'яка;  $\theta$  – кут транспортування;  $K_f$  – коефіцієнт, що враховує форму, кількість і розташування пазів на поверхні корпусу;  $R_p$  – наведений радіус, що характеризує співвідношення геометричних розмірів черв'яка й пазів;  $K_c$  – конусність осердя черв'яка.

При переміщенні пробки вздовж каналу виникають сили тертя, за рахунок яких відбувається дисипативне розігрівання полімерного матеріалу. При цьому виділене тепло буде пропорційно витратам потужності.

Розрахункову схему в даному випадку можна прийняти також згідно з рис. 1.

Для кожного із шарів тришарової системи, наданої на рис. 1, буде знову ж таки справедлива система рівнянь (7)–(9), але без урахування функції дисипації у формулі (8). Одержано рівняння для розподілу температурного поля за аналогією з виразами (11)–(13).

**У третьому розділі** наведено теоретичні співвідношення для оптимізації здійснення процесів у робочих зазорах черв'ячно-дискових екструдерів. Досліджено механізм дисипативного розігріву при русі перероблюваного матеріалу з урахуванням різних граничних умов.

Схему робочого вузла дискового екструзійного агрегату надано на рис. 3.

Як показали теоретичні й експериментальні дослідження, отримані для міждискового зазора, основне значення мають дві складові швидкості: радіальна  $V_r$  і тангенціальна  $V_\phi$ , що ж стосується осьової складової  $V_z$ , то нею вздовж усього об'єму, за винятком ділянок входу й виходу з міждискового зазора, можна знехтувати.

З урахуванням типових припущень, а також зауважень щодо компонентів швидкості, рівняння руху можна записати для циліндричної системи координат у такому вигляді:

(16)

(17)

Рис. 3. Схема дискового простору для черв'ячно-дискового екструдера: 1 – обертовий диск; 2 – нерухомі диски; 3 – корпус; 4 – перший міждисковий зазор; 5 – другий міждисковий зазор; 6 – радіальний зазор; 7 – черв'як; 8 – вихідний отвір

Рівняння нерозривності запишеться так

(18)

З огляду на останню залежність, для радіальної складової буде справедлива залежність

(19)

де  $f(z)$  – функція радіальної швидкості, що залежить тільки від координати  $z$ .

Для тангенціальної складової швидкості прийнято співвідношення

(20)

Функція тангенціальної швидкості  $g(z)$  у загальному випадку дає нелінійний розподіл уздовж міждискового зазору. Однак для спрощення математичної моделі, замість нелінійної залежності функції  $g$  можна скористатися лінійним наближенням у вигляді

(21)

Як реологічне рівняння стану в даному випадку взято модифіковане рівняння стану другого порядку, яке може описати не тільки аномалію в'язкості (залежність коефіцієнта в'язкості від швидкості деформації), але й пружні властивості полімерної рідини, що особливо важливо для даного випадку. Слід зазначити, що при використанні моделі для неньютонівської непружної рідини, наприклад, моделі для степеневі рідини, у даному випадку буде основним насосний ефект, тобто виникають відцентрові сили. Що ж стосується реальних процесів у просторі між двома дисками, один з яких обертається, то для розплавів полімерів з'являються доцентрові сили, тобто виникає так званий ефект Вайссенберга. Визначено, що за цей ефект відповідають пружні властивості матеріалу, а більш точно – різниці нормальних напружень

Модифіковане рівняння стану другого порядку в загальному випадку має вигляд

(22)

де  $\eta(I_2)$ ,  $\beta(I_2)$ ,  $\nu(I_2)$  – матеріальні функції;  $A_{ij}^{(1)}$ ,  $A_{ij}^{(2)}$  – компоненти тензорів Рівліна-Еріксена відповідно першого й другого роду.

Матеріальні функції можна з достатньою точністю записати через степеневі вирази:  $\eta(I_2)=K_1 |4I_2|^{(n-1)/2}$ ;  $\beta(I_2)=K_2 |4I_2|^{(n-2)/2}$ ;  $\nu(I_2)=K_3 |4I_2|^{(n-2)/2}$ , де  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $n$  – константи матеріалу, які залежать від типу матеріалу.

Розв'язуючи задачу про течію в'язкопружної рідини в міждисковому зазорі на основі модифікованого рівняння стану другого порядку, одержано рівняння

(23)

де  $g_1=2\pi N_0/H$ .

Для визначення градієнта тиску  $\partial P/\partial r$  можна скористатися рівнянням нерозривності в інтегральній формі.

Показано, що плин за рахунок обертання диска для в'язкопружної рідини має тільки доцентровий характер. Плин, що відбувається внаслідок нагнітальної дії черв'яка, може мати як додатний, так і від'ємний напрямки. Таким чином, в одному дисковому зазорі два потоки можуть мати однаковий напрямки, а в іншому зазорі – протилежний.

Тобто, якщо вважати, що перший міждисківий зазор розміщено з боку зони пластикації, а другий – з боку формувальної головки, то значення для продуктивності, внаслідок нагнітальної дії черв'яка, необхідно підставляти у рівняння нерозривності в інтегральній формі відповідно зі знаком плюс і мінус. Виходячи з вище сказаного, у першому міждисківому зазорі при певних геометричних і технологічних параметрах у загальному випадку сумарний потік може бути доцентровим, тобто подачу до формувальної головки буде зупинено й процес екструзії порушиться.

При розв'язку теплової задачі в міждисківому зазорі рівняння балансу теплової енергії, з урахуванням звичайних для цього випадку припущень, може бути надано в такому вигляді

$$(24)$$

де

$$(25)$$

Для системи координат, що показано на рис. 3, граничні й початкові умови можна надати так:

$$T = T_p \text{ при } z = H/2; \quad T = T_k \text{ при } z = -H/2; \quad T = T_n \text{ при } r = R_v(R_n), \quad (26)$$

де  $T_p$  – температура поверхні обертового диска;  $T_k$  – температура поверхні корпусу дискової зони;  $T_n$  – початкова температура рідини на вході в міждисківий зазор.

Остаточні рішення для розподілу температурного поля в міждисківому зазорі одержано в такому вигляді

$$(27)$$

де ; ; ;  $AV_{i,j} = \rho_m C_{pm} (V_r)_{i,j}/\lambda_m$ ;  $FD_{i,j} = (q_{dis})_{i,j}/\lambda_m$ ;  $i,j$  – кількість елементів розбивок уздовж координат  $r$  і  $z$ , що є необхідною умовою для прийняття незалежності функцій радіальної швидкості й функції дисипації від радіальної координати.

На рис. 4 наведено графіки розподілу температур у вигляді контурних ліній по об'єму міждисківого зазора, одержані за формулою (27).

Рис. 4. Графіки розподілу температур у міждисківому зазорі при  $H = 4$  мм

При цьому загальні параметри прийнято такими:  $R_n = 100$  мм;  $N_0 = 2 \text{ c}^{-1}$ ;  $R_v = 25$  мм. Як матеріал обрано розплав поліетилену високої густини, що має такі теплофізичні й реологічні



характеристики:  $\lambda_m = 0,203 \text{ Вт/(м·К)}$ ;  $\rho_m = 810 \text{ кг/м}^3$ ;  $C_{pm} = 2,82 \text{ кДж/(кг·К)}$ ;  $K_{10} = 1,18 \text{ кПа·с}^n$ ;  $K_{20} = 2,02 \text{ кПа·с}^n$ ;  $\beta = 0,049$ ;  $n = 0,38$ .

Для врахування впливу характеристик матеріалу  $K_1$  і  $K_2$  при розрахунку за рівнянням (27) використано наступну температурну залежність (на прикладі для  $K_1$ ):  $K_1 = K_{10} \exp[-\beta(T-T_0)]$ . Для постійних температур узяті такі значення:  $T_0 = 463 \text{ К}$ ,  $T_{II} = 433 \text{ К}$ ,  $T_H = 423 \text{ К}$ ,  $T_n = 463 \text{ К}$ .

Також у роботі одержано рівняння для розподілу температурного поля в міждискових зазорах при використанні граничних умов другого роду, які можна записати так:  $-\lambda \partial T / \partial z = q_p$  при  $z = H/2$ ;  $\lambda \partial T / \partial z = q_k$  при  $z = -H/2$ , де  $q_p$ ,  $q_k$  – теплові потоки, які підводять (відводять) через поверхні дисків, відповідно обертового й нерухомого.

**У четвертому розділі** надано нову концепцію для теоретичного аналізу основних параметрів при переробці полімерних середовищ на відцентрових екструзійних агрегатах. При цьому виконано аналіз для дискових і конусних робочих каналів.

Схема для дискового каналу надано на рис. 5, де висота каналу  $H$  постійна, а максимальний радіус становить  $R_{max}$ .

Рівняння руху для даної схеми може бути наведено до вигляду

(28)

де  $F_c$  – відцентрова сила, віднесена до одиниці об'єму, яку можна визначити з виразу  $F_c = \rho \cdot \omega^2 \cdot r$  ( $\omega = 2 \pi N_0$ ).

Рис. 5. Схема робочої секції з дисковим каналом

Далі процеси аналізуються для ньютонівської рідини.

Для радіальної складової швидкості одержано таке співвідношення

(29)

Гradient тиску  $\partial P / \partial r$  визначається за рівнянням

(30)

де  $P_K$  – надлишковий тиск при  $r = R_{max}$ ;  $K_{j0} = j K_0$  ( $K_0$  – коефіцієнт форми одного вихідного отвору,  $j$  – кількість отворів).

Вирішуючи останнє рівняння з урахуванням граничної умови  $P = P_1$  ( $P_1 = \rho \cdot \omega^2 \cdot R_1^2$ ) при  $r = R_1$ , одержано

(31)

Формулою (31) можна скористатися для визначення  $P_K$  через параметри дискового каналу, підставляючи  $r = R_{max}$

(32)

Щоб досягти необхідного значення  $P_K$  слід підібрати три параметри, а саме:  $\omega$ ,  $R_{max}$  і  $H$ . При цьому можна оптимізувати умови роботи, виходячи з мінімізації енерговитрат і металомісткості, з

урахуванням можливості здійснення технологічного процесу при наявних комплектуючих елементах. Якщо, наприклад, задані геометричні розміри, то для визначення частоти обертання маємо

$$(33)$$

Схему для аналізу плин у рідких середовищах під дією відцентрових сил у конусних каналах показано на рис. 6.

Для даного варіанта використано сферичну систему координат, рівняння руху для якої з урахуванням відповідних умов (деякі з них:  $V_\theta = 0$ ;  $V_\varphi = \omega \cdot r_1$ ;  $\partial/\partial\varphi = 0$ ;  $r_1 = r - (R_1 + R_{max})$ ) мають вигляд:

$$(34)$$

$$(35)$$

Рис. 6. Схема робочої секції з конусним каналом

Рівняння нерозривності в цьому випадку запишеться так  $\partial(r_1^2 V_r)/\partial r_1$ , звідки виходить справедливості співвідношення  $V_r = g(\theta)/r_1^2$ , де  $g(\theta)$  – функція, що залежить тільки від координати  $\theta$ .

Для радіальної складової швидкості у випадку конусного каналу одержано рівняння

$$(36)$$

де .

Якщо конусний канал має симетричну форму щодо кута  $\theta = 90^\circ$ , то вираз для радіальної складової можна подати так

$$(37)$$

Для градієнта тиску буде справедливим співвідношення

$$(38)$$

де .

Розв'язуючи останнє рівняння щодо тиску й переходячи до змінного  $r$ , одержано

$$(39)$$

де .

Аналоги рівнянь (32) і (33) для конусного каналу будуть мати вигляд:

$$(40)$$

$$(41)$$

Основні характеристики дискового каналу, розраховані за формулами (31)–(33), наведено в табл. 3 для різних геометричних варіантів. Основні характеристики конусного каналу при різних геометричних варіантах, розраховані за формулами (37), (39) і (41), наведено в табл. 4.

Плоскі графіки, що показують розподіл тиску за формулою (31), зображено на рис. 7. Об'ємний графік розподілу швидкості  $V_r$  у дисковому каналі для варіанта  $D2$  надано на рис. 8.

Таблиця 3

Характеристики дискового каналу при різних геометричних параметрах

№ вар.	$D1$	$D2$	$D3$	$D4$	$D5$	$D6$
$H$ , мм	12	24	36	24		
$R_{max}$ , мм	300			200	350	500
$\omega$ , $c^{-1}$	66,3	48,8	46,7	72,5	42,0	29,6
$P_1$ , кПа	1,69	0,91	0,84	2,02	0,68	0,34

Таблиця 4

Характеристики конусного каналу для різних геометричних параметрах при  $\partial P/\partial \theta = 0$

№ вар.	$K1$	$K2$	$K3$	$K4$	$K5$	$K6$	$K7$
$2 \cdot h_{min}$ , мм	12			24		36	
$\alpha$ , град	5	10	15	5	15	5	10
$2 \cdot h_{max}$ , мм	61	111	162	73	174	85	135
$R_{max}$ , мм	349	314	302	417	325	486	382
$R_{min}$ , мм	69	34	22	137	45	206	102
$\omega$ , $c^{-1}$	52,6	46,8	46,1	51,4	46,0	50,6	46,6
$P_1$ , МПа	1,06	0,84	0,81	1,02	0,81	0,98	0,83

З наведених результатів зроблено низку висновків. По-перше, збільшення геометричних розмірів приводить до зменшення частоти обертання. Однак вплив росту висоти  $H$  на зміну  $\omega$  менш значний, ніж вплив максимального радіуса дискового каналу  $R_{max}$ . По-друге, на графіках для розподілу тиску при деяких сполученнях параметрів спостерігаються ділянки з від'ємними тисками, що пов'язано з можливістю порушення суцільності потоку, і, як наслідок, приводить до нестабільної роботи робочого вузла.

Рис. 7. Графіки розподілу тиску в дисковому каналі:

а:  $R_{max} = 0,3$  м: —○—  $H=12$  мм; —•—  $H=24$  мм; —□—  $H=36$  мм; б:  $H = 24$  мм: —×—  $R_{max}=0,2$  м; —○—  $R_{max}=0,35$  м; —□—  $R_{max}=0,5$  м

Рис. 8. Графік розподілу швидкості  $V_r$  у дисковому каналі вздовж осей  $r$  і  $z$

Плоскі графіки, що показують розподіл тиску за формулами (39), показано на рис. 9. Об'ємний графік розподілу швидкості  $V_r$  у конусному каналі для варіанта  $K7$  зображено на рис. 10. Параметри матеріалу й характеристики отворів аналогічні дисковому каналу.

Від'ємне значення швидкості підкреслює той факт, що рух потоку спрямовано у протилежний координаті  $r$  бік. Крім того, при збільшенні конусності каналу, навіть на відносно невелику величину (з  $\alpha = 5^\circ$  до  $\alpha = 10^\circ$ ) зникає зона з від'ємними значеннями тиску.

Рис. 9. Графіки розподілу тиску в конусному каналі (згідно з варіантами з табл. 4):

—○— – варіант –  $K1$ ; —•— – варіант –  $K2$ ; —□— – варіант –  $K3$

Рис. 10. Об'ємний графік розподілу швидкості  $V_r$  у конусному каналі

Результати, наведені в табл. 4 і на рис. 9 і 10, одержано при умові незалежності тиску й швидкості від координати  $\theta$ . У четвертому розділі наведено також теоретичні розробки й для випадку залежності від двох координат  $r$  і  $\theta$ .

Крім плинну рідинних середовищ одержано математичні моделі для руху сипких матеріалів, наприклад, у вигляді порошку або гранул. Також одержано рівняння для аналізу процесів руху в прямокутних каналах під дією відцентрових сил. Значну увагу у четвертому розділі приділялося також і теплообмінним процесам.

**П'ятий розділ** присвячено розробці теоретичних основ описання пороутворення в процесі екструзії з побудовою математичних моделей. При цьому розглянуто різні умови на динамічне поведіння газових пухирів у полімерній матриці.

Одержано вираз на базі реологічного рівняння стану для моделі Максвелла, яке описує динамічне поведіння газового пухиря в полімерній матриці, у такому вигляді

(42)

де  $R$  – радіус пухиря;  $D$  – коефіцієнт дифузії;  $P_g$  – тиск усередині пухиря;  $\sigma$  – поверхневий натяг;  $K_p$  – дифузійна константа Генрі;  $\rho_g$  – густина газу всередині пухиря;  $\rho$  – густина розплаву полімеру;  $P_\infty$  – граничний тиск у пухирі, що в більшості випадків може бути прийнятий рівним атмосферному ( $P_\infty = 0,1013$  МПа);  $\lambda$  – час релаксації;  $\eta$  – коефіцієнт в'язкості розплаву;  $K_m$  – параметр, який визначається із виразу  $K_m = M/(R_g T)$  ( $M$  – молекулярна маса газу в пухирі;  $T$  – температура;  $R_g$  – універсальна газова постійна).

У рівнянні (42) крім шуканої величини  $R$  є ще одна невідома, а саме: тиск усередині пухиря  $P_g$ , який змінюється в процесі зростання газового пухиря. Таким чином, слід мати ще одне рівняння, яке може бути надано у вигляді

(43)

У даному розділі розглянуто вплив різних параметрів на поведінку газового пухиря. На рис. 11 зображено графіки зміни радіусу та його похідних, а також тиску усередині пухиря. З поведіння графіків, зображених на рис. 11, можна зробити кілька висновків. По-перше, зростання радіуса пухиря спостерігається з деякою тимчасовою затримкою. Причому, чим менше початковий тиск, тим більш тривалий час залишаються відносно постійними розміри газових пухирів. На швидкість зміни радіуса  $R'$  також великий вплив здійснює початковий тиск  $P_{g0}$ , а саме: чим більше значення тиску, тим не тільки з більшою швидкістю ростуть розміри пухирів, але й стає більш вираженим екстремум для функціональної залежності  $R' \sim t$ , що в свою чергу приводить до різкої зміни прискорення  $R''$  (рис. 11,в).

а б в г

Рис. 11. Результати розрахунків для сполучення параметрів:

$$\lambda = 0,9 \text{ с}; D = 5,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}; R_0 = 10^{-6} \text{ м}; \eta = 2 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\text{—————} - P_{g0} = 0,6072 \text{ МПа}; \text{·····} - P_{g0} = 0,8104 \text{ МПа}; \text{----} - P_{g0} = 1,2156 \text{ МПа}$$

Розглянуто як ізотермічні умови здійснення процесів пороутворення, так і неізотермічні режими. При цьому показано, як варіюючи режимами охолодження можна регулювати розмірами пор в полімерному середовищі.

У шостому розділі наведено обґрунтування й побудова теоретичних моделей для поділу наноагрегатів при одержанні полімерних нанокомпозитів з використанням екструзійної техніки.

Поряд з явними перевагами використання різного типу наноматеріалів, виникають і значні утруднення, пов'язані з технологією одержання таких матеріалів. До одного з таких моментів варто віднести підвищення енергоємності на одиницю маси одержуваного полімерного композита, що пов'язано з різким ростом сил взаємодії між частками при зменшенні їх розмірів.

Знання зусиль, з якими частки притягаються один до одного, дозволяє оцінити можливості конкретного переробного обладнання з метою їх поділу й рівномірного розподілення за всією робочою зоною в полімерній матриці.

Для аналізу поведінки нанокомплексів у полімерній матриці запропоновано механічну модель; загальний вигляд для найпростішого випадку, а саме: для двох часток, може бути зображено згідно з рис. 12, де введено такі позначення:  $m_1, m_2$  – маси часток;  $C_1, C_2$  – зовнішні жорсткості для кожної із часток, створювані навколишнім середовищем;  $C_{12}$  – внутрішня жорсткість між частками;  $R_1, R_2$  – радіуси часток;  $L_{12}$  – відстань між поверхнями часток.

Для визначення внутрішньої жорсткості запропоновано залежність

(44)

де  $C_{12}^E$  – складова жорсткості, викликана енергією взаємодії між частками;  $C_{12}^U$  – складова жорсткості, викликана еластичністю часток.

Припустимо, що дві частки є абсолютно жорсткими тілами, тобто  $C_{12}^U \rightarrow \infty$ , то для внутрішньої жорсткості можна записати наступний вираз:  $C_{12}^E = -E_{12}/L_{12}^2$ , де  $E_{12}$  – енергія взаємодії між двома частками, яку можна визначити, використовуючи одну з відомих теорій.

Рис. 12. Механічна модель для парного комплексу часток у перероблюваному середовищі

Значення зовнішньої жорсткості можна визначити зі співвідношення  $C_i = (1/C_i^s + 1/C_i^{ui})^{-1}$ , де  $C_i^s$  – складова зовнішньої жорсткості, що залежить безпосередньо від властивостей навколишнього середовища й розмірів часток;  $C_i^{ui}$  – складова зовнішньої жорсткості, викликана еластичністю часток,  $i = 1, 2$ . Приймаючи  $C_i^{ui} \rightarrow \infty$ , можна записати  $C_i = 2 \pi \eta R_i/\lambda$ , де  $\eta$  – коефіцієнт в'язкості;  $\lambda$  – час релаксації.

Для механічної моделі, зображеної на рис. 12, буде справедливою наступна система рівнянь руху (без урахування загасаючого впливу навколишнього середовища й зовнішнього впливу):

(45)

де ; ; ; .

Аналіз системи (45) для різних параметрів наноконкомплекса виявив деякі закономірності, а саме: зі зменшенням в'язкості навколишнього часток середовища спостерігається й відповідне падіння значень власних частот, що сприяє зниженню енерговитрат на поділ часток. Час релаксації здійснює зворотний вплив. Слід також зазначити, що при зменшенні в'язкості відбувається істотне зростання різниці між другою й першою частотою. При цьому значна зміна першої частоти, наводить до несуттєвих змін для другої частоти. Так, при  $R_2 = 60$  нм і  $L_{12} = 10$  нм маємо:  $P_2 = 22,13$  МГц ( $\eta = 10^3$  Па·с),  $P_2 = 7,75$  МГц ( $\eta = 10$  Па·с);  $P_3 = 7,46$  МГц ( $\eta = 10^3$  Па·с).

Аналогічним чином можна визначити власні частоти для агрегатів, що складаються з більшої кількості часток. При цьому моделювати можна не тільки агрегати з лінійно з'єднаних часток, але й розгалужені системи. Слід зазначити, що при збільшенні кількості елементів у системі наноконкомплексу значення основної частоти зменшується. При цьому спостерігається більш помітна залежність від радіуса частки, особливо при значній зовнішній жорсткості.

Розроблено теоретичні положення для оптимізації параметрів пористих полімерних наноконкомпозитів з урахуванням дії зсувних деформацій і динамічного поведіння газових пухирів.

Для оцінки силового впливу з боку навколишнього середовища на систему двох взаємодіючих між собою часток за рахунок енергії Ван-дер-Ваальса введено питому енергію  $E_{vo}$  у вигляді  $E_{vo} = E_{i,j}/V_{eo}$ , де  $E_{i,j}$  – енергія взаємодії між двома частками;  $V_{eo}$  – питомий об'єм наносистеми, наведений до сферичної форми  $V_{eo} = \pi d_{eo}^3/6$ , ( $d_{eo}$  – узагальнений еквівалентний діаметр наведеної сфери).

Як правило, наноконкомплекс містить досить велику кількість наночасток, які, крім того, можуть відрізнятися за формою. Тоді для узагальненого еквівалентного діаметра  $d_{eo}$  одержано наступну залежність

(46)

де  $K_{fi}$ ,  $K_{ff}$  – коефіцієнти форми часток;  $i_{ri}$  – кількість замкнених контурів, що містять однакову кількість зв'язків;  $K_{hk}$  – кількість зв'язків для одного контуру.

Для системи часток значення питомої енергії визначиться за виразом

(47)

Аналіз динамічної поведінки газового пухиря на ступінь розділу наноконкомплексів можна виконати за допомогою формул (42) і (43).

При вивченні процесів у рідких полімерних середовищах основне значення має швидкість деформації, яку можна одержати з наступного виразу:  $\varepsilon' = dV_r/dr$ . Щоб знайти залежність швидкості  $V_r$  від координати  $r$ , можна скористатися рівнянням нерозривності у вигляді  $\partial(r^2 V_r)/\partial r = 0$ . Неважко перевірити, що для задоволення рівняння нерозривності буде справедливою така залежність:  $V_r = R^2 r^{-2} dR/dt$ . Тоді можна записати:  $\varepsilon' = -2 R^2 r^{-3} dR/dt$ , або безпосередньо на поверхні пухиря буде  $\varepsilon'_{r=R} = \varepsilon'_s = -2/R dR/dt$ .

Щоб перейти від радіальної швидкості деформації до швидкості зрушення, можна скористатися співвідношенням між периметром кільця і його радіусом, звідки виходить:  $\gamma' = \pm 2 \pi \varepsilon'$ ,  $\gamma'_s = \pm 2 \pi \varepsilon'_s$ . Визначивши значення для швидкості зрушення, можна знайти напруження зрушення, графіки для яких надано на рис. 13.

Рис. 13. Графіки зміни швидкості й напруження зрушення: а –  $\dot{\gamma} \sim t$ ; б –  $\tau \sim t$ :

—  $R_0 = 0,6$  мкм; .....  $R_0 = 1$  мкм; ----  $R_0 = 1,4$  мкм

Як можна бачити із графіків, наведених на рис. 13, швидкості зрушення на поверхні газового пухиря можуть перевищувати на два порядки швидкості зрушення в радіальному зазорі, а напруження зрушення – на порядок. Дані результати свідчать про те, що ступінь поділу на поверхні газового пухиря буде значно більшим, ніж у радіальному зазорі, не говорячи вже про гвинтовий канал.

**У цьому розділі** надано різноманітні конструкції розроблених черв'ячних і відцентрових екструдерів. Причому частина цих агрегатів розроблено з урахуванням енергозберігаючих технологій.

На рис. 14 показано кінцевий фрагмент черв'ячної машини з поздовжніми пазами на черв'яку й корпусі (Пат. 14948 Україна), призначений для інтенсифікації процесів змішування та пластикації.

Рис. 14. Кінцевий фрагмент черв'ячної машини з поздовжніми пазами на черв'яку й корпусі: 1 – корпус; 2 – вихідний отвір; 3 – черв'як; 4 – хвостовик; 5 – ротор; 6 – пази ротора; 7 – наконечник; 8 – статор; 9 – пази статора

При роботі даного пристрою перероблюваний матеріал подається черв'яком 3 у пази 6 ротора 5. За мірою просування матеріалу до вихідного отвору 2 поперечний переріз пазів 6 зменшується, а поперечний переріз пазів 9 збільшується. Таким чином, частина матеріалу з пазів 6 переходить у пази 9, при цьому сумарний поперечний переріз пазів практично не змінюється.

За рахунок обертання ротора щодо статора відбувається зміна конфігурації каналу, який утворюється пазами 6 і 9, що здійснює перерозподіл зсувних деформацій.

На рис. 15 зображено схему відцентрового екструдера із зоною дозування з кінцевою черв'ячною частиною в зоні дозування (Пат. 74990 Україна).

Екструдер, що зображений на рис. 15, працює наступним чином. На першому етапі вмикають обидва електродвигуни, які через шків 9 і 11 надають обертового руху всім обертовим елементам екструдера, а саме: корпусу 1 з конусом 4 через втулку 8 (конус 4 з'єднаний з корпусом 1 через установчі гвинти 6), також конусному шнеку 5 через вал 10. При цьому на першому етапі кутова швидкість  $\omega$  усіх елементів однакова.

На другому етапі полімерний матеріал подається живильниками 15 у завантажувальний бункер 14, звідки він потрапляє до конічного каналу 7. Унаслідок значних відцентрових сил, які викликані великою кутовою швидкістю (більш, ніж  $15 \text{ c}^{-1}$ ), матеріал рухається від центра до периферії, заповнюючи весь канал 7. При цьому виникає певний тиск, який притискує полімерний матеріал до поверхонь каналу, унаслідок чого відбувається інтенсивне прогрівання полімерного матеріалу та його плавлення від нагрівачів 16, 17 і 18. При цьому питома потужність, що витрачається на здійснення роботи для протискування полімеру й плавлення його, буде набагато менша, ніж у черв'ячних і черв'ячно-дискових екструдерах, де рух матеріалу створюється за рахунок сил тертя, які виникають унаслідок відносного руху границь робочого каналу.

Рис. 15. Відцентровий екструдер для полімерів з конічною черв'ячною частиною в зоні дозування: 1 – корпус; 2, 3 – відповідно верхня і нижня частини корпусу; 4 – конус; 5 – конусний черв'як; 6 – установчі гвинти; 7 – конічний канал; 8 – обертова втулка; 9 – шків; 10 – вал; 11 – шків; 12 – станина; 13 – формувальний отвір; 14 –завантажувальний бункер; 15 – живильники; 16, 17, 18 – нагрівачі; 19 – охолоджуючі вентилятори

На третьому етапі, коли перероблюваний матеріал достатньо прогрівся, а на виході з конічного каналу 7 утворилася суцільна маса розплаву полімеру, кутова швидкість конусного шнека 5 зменшується, у результаті чого з'являється відносна швидкість руху між внутрішньою поверхнею нижньої частини 3 корпусу 1 і зовнішньою поверхнею конусного шнека 5. Дана відносна швидкість буде прямувати розплав полімеру вздовж гвинтової нарізки до формувального отвору 13. Підбираючи відповідні геометричні параметри конусного шнека 5 (глибину й крок гвинтової нарізки, радіальний зазор між зовнішнім діаметром гвинтової нарізки й внутрішньої поверхні нижньої частини 3, кут конусності) згідно з необхідною продуктивністю, можна досягти необхідної якості змішування.

**У восьмому розділі** надано результати експериментального підтвердження одержаних теоретичних положень.

Для здійснення експериментальних досліджень розроблено цілу низку різного типу експериментальних установок, а саме: черв'ячних, черв'ячно-дискових і відцентрових, на яких перевірялися розроблені математичні моделі. Використано стандартні методики й обладнання для оцінювання параметрів протікання процесів екструзії.



На рис. 16 зображено теоретичні й експериментальні результати визначення потужності в міждисковому зазорі залежно від частоти обертання. Для рис. 16 середнє відхилення експериментальних даних від теоретичних складає 4,26%. Отримані дані підтверджують адекватність математичних моделей, реальним умовам здійснення процесів у міждискових зазорах.

На рис. 17 надано графіки залежності потужності від частоти обертання черв'яка в зоні дозування, отримані експериментально за допомогою експериментальної приставки, а також дані, знайдені теоретично й відповідають значенням, наведеним у табл. 1. При цьому розбіжність між експериментальними й теоретичними даними складає 4,9%, що підтверджує адекватність знайдених рішень.

На рис. 18 зображено графіки зміни експериментально й теоретично одержаних тисків  $P$  від частоти обертання ротора  $N_0$  під дією відцентрових сил. При цьому кут розчину конуса становив  $30^\circ$ .

Як видно із наведених на останньому рисунку графіках, експериментально отримані дані за тиском, що розвивається в робочій конічній порожнині за рахунок відцентрових сил, перебувають у прийнятних співвідношеннях за відношеннями зі знайденими за теоретичними виразами. Середня похибка складає 5,7%.

Рис. 16. Графіки залежності потужності  $N$  від частоти обертання  $N_0$ , які виникають у міждисковому зазорі: ••••• – теоретичні криві; — — — експериментальні криві

Рис. 17. Графіки залежності потужності  $N$ , які виникають у зоні дозування відповідно до даних із табл. 1: ••••• – теоретичні криві; — — — експериментальні криві

Рис. 18. Графіки зміни тиску в робочій порожнині залежно від частоти обертання під дією відцентрових сил: ••••• – теоретичні криві; — — — експериментальні криві

На приладі Mastersizer2000 компанії Malvern Instruments Ltd із приставкою Hydro2000MU і установкою IP200S здійснено дослідження ступеня поділу нанокмплексів на прикладі матеріалу  $Mg(OH)_2$  залежно від трьох складових, а саме: частоти коливань силового поля  $f$  та його амплітуди  $A_K$ , а також часу впливу  $t$ . Величина  $r_m$  характеризує радіус агрегата, який складається із окремих наночасток. У табл. 5 наведено результати досліджень.

Результати поділу часток  $Mg(OH)_2$  на установці IP200S

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f$ , кгц	14,4			4,8	9,6	24	14,4		
$A_K$ , мкм	156			156			52	156	260
$t_v$ , хв	0	15	20	10			10		
$r_m$ , мкм	1,076	0,475	0,396	0,758	0,650	0,212	0,628	0,529	0,370

**ВИСНОВКИ**

У дисертації одержано науково обґрунтовані результати, які в сукупності розв'язують важливу науково-прикладну проблему, що полягає в розробці теоретичних основ переробки полімерних матеріалів на високошвидкісних екструзійних агрегатах та їх конструктивного оформлення. Здійснено систематичне теоретичне дослідження руху полімерного матеріалу в робочих каналах переробного обладнання з урахуванням теплообмінних процесів.

1. Обґрунтовано можливість використання типових одночерв'ячних машин при здійсненні високошвидкісних процесів екструзії для термопластичних матеріалів на інтервалі колових швидкостей від 0,4 м/с до 1 м/с, або на інтервалі узагальнених швидкостей зсуву від  $200 \text{ с}^{-1}$  до  $500 \text{ с}^{-1}$ .

2. Розвинуто теоретичні положення для описання процесів руху й теплообміну в робочих об'ємах одночерв'ячних екструдерів при високих швидкостях обертання черв'яка з використанням тришарової розрахункової схеми при врахуванні можливих змін у граничних умовах для оптимізації геометричних і технологічних параметрів.

3. Розроблено методику рішення задач процесів екструзії для неізотермічних умов з використанням інтегрального перетворення Лапласа, як за умови суцільності розглянутого середовища, так і при дискретизації його.

4. Для полімерних матеріалів у зонах дозування, плавлення та живлення одночерв'ячного екструдера при різних схемах і граничних температурних умовах створено математичні моделі теплообмінних процесів, які дозволяють оптимізувати технологічні й геометричні параметри відповідно до властивостей перероблюваного матеріалу.

5. Теоретично й експериментально досліджено процеси, що протікають у робочих зазорах черв'ячно-дискових екструдерів, і удосконалено основоположні рівняння для аналізу процесів течії та теплообміну в даному типі обладнання на основі модифікованого рівняння стану для рідини другого порядку.

Побудовано математичні моделі неізотермічних процесів у міждискових зазорах дискових і черв'ячно-дискових екструдерів, що приводить до нової якості проектування обладнання.

Одержано рівняння для розрахунку температурного поля, що виникає в міждискових зазорах черв'ячно-дискових екструдерів для в'язкопружних рідин.

6. Створено конструкції високошвидкісних агрегатів з використанням відцентрової рушійної сили – відцентрових екструдерів. Розроблено нові конструкції черв'ячних екструдерів з різноманітними типами змішувально-пластикувальних вузлів.

7. Розроблено теоретичні основи руху й теплообміну в робочих каналах відцентрових екструдерів. Побудовано математичні моделі теплообмінних процесів з урахуванням гідродинамічних процесів для полімерних матеріалів під дією відцентрової сили в каналах різної геометричної форми: дискової, конусної та прямокутної.

8. Удосконалено теоретичні залежності для описання динамічного поведіння газових пухирів у процесі екструзії полімерів і виконано оцінювання впливу великих швидкостей деформацій, що з'являються на поверхні пухиря, на ступінь поділу наноконструкцій.

Визначено систему рівнянь для аналізу динамічного поведіння газового пухиря в полімерній матриці, як для ізотермічних умов здійснення процесів екструзії, так і при неізотермічних режимах.

9. Обґрунтовано використання екструзійної техніки в сполученні з низкою допоміжних пристроїв для дрібнодисперсного поділу комплексів наноагрегатів при здійсненні високошвидкісних екструзійних процесів.

Для аналізу поведіння агрегатів з нанодисперсних часток у полімерному середовищі розроблено математичну модель процесу поділу наноконструкцій під дією зовнішнього силового поля.

Побудовано математичну модель процесу поділу агрегатів з наночасток з урахуванням динамічного поведіння газових пухирів при одержанні пористих полімерних наноконструкцій.

Одержано рівняння для визначення питомої енергії наноконструкцій різної структури й швидкості деформацій, створюваних поверхнею газового пухиря на об'єм наноконструкцій.

10. Для реалізації розроблених розрахункових моделей на базі математичного пакета Mathcad створено програмні комплекси, на які одержано Свідоцтва на реєстрацію авторського права на твір.

11. Здійснено експериментальні дослідження екструзійних процесів:

– енергосилових параметрів черв'ячно-дискової екструзії. Результати підтверджують доцільність використання розроблених теоретичних положень;

– у робочому об'ємі одночерв'ячного екструдера. Експериментальні дані підтверджують адекватність результатів, одержаних за розробленими математичними моделями;

– руху полімерного матеріалу в робочих каналах відцентрових екструдерів з замірюванням створюваного тиску. Результати експериментальних і теоретичних досліджень дають високу збіжність результатів;

– поділу наноагрегатів під дією силового поля, що періодично змінюється. Показано, що суттєве значення у процесі поділу наноагрегатів грає частота впливу силового поля. Визначено, що при наближенні частоти до резонансної, одержаної на базі теоретичних моделей, можна досягти дрібнодисперсної структури одержуваного полімерного нанокompозита.

12. Результати розробок використано в промисловості на підприємствах: ВАТ “Дніпрополімермаш” (м. Дніпропетровськ); “РОТКЕПС” (м. Дніпропетровськ); ТОВ ПК “Лідер” (м. Дніпропетровськ). Розроблені наукові положення використовуються в курсах лекцій на кафедрі хімічного машинобудування та апаратобудування ДВНЗ „Український державний хіміко-технологічний університет“ при викладанні дисциплін: „Механіка та реологія полімерів“; „Основи математичного моделювання процесів по переробці полімерних матеріалів“; „Моделювання обладнання для переробки пластмас“; „САПР хімічних машин“.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кузяев І.М. Переробка полімерних композитів за допомогою черв'ячно-дискової екструзії / І.М. Кузяев, О.І. Буря, О.І. Пилипенко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів. – 1999. – № 9. – С. 79–85.

*Здобувач обґрунтував можливість використання черв'ячно-дискових екструдерів для переробки полімерних композитів і виконав обробку експериментальних даних.*

2. Кузяев И.М. Расчет технологических параметров экструзионных агрегатов при наличии дисковых смесительных элементов / И.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2000. – №1. – С. 313–316.

3. Моделювання процесів в зоні пластикації черв'ячних машин з урахуванням залежності в'язкості від температури / І.М. Кузяев, В.І. Ситар, М.В. Бурмістр, О.К. Волкова // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2001. – №3. – С. 74–79.

*Здобувач одержав залежності для коефіцієнтів, що враховують вплив коефіцієнта в'язкості від температури на швидкість плавлення.*

4. Кузяев І.М. Моделювання процесів, що відбуваються при течії в'язко-пружних рідин в просторі між двома дисками / І.М. Кузяев, В.І. Ситар // Системні технології. Спец. випуск. – Дніпропетровськ. – 2001. – №2. – С. 76–80.

*Здобувачем одержано залежності для компонентів швидкості в просторі між двома дисками.*

5. Кузяев І.М. Розрахунок деформаційно-напруженого стану розплавів полімерів при течії між двома дисками, один з яких обертається / І.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2001. – № 6. – С. 146–151.

6. Кузяев І.М. Розробка систем для пневмоекструзійного гранулювання полімерів / І.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2002. – №1. – С. 112–116.

7. Кузяев І.М. Моделювання неізотермічних процесів в робочому об'ємі черв'ячних насосів для аномально в'язких рідин / І.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2002. – № 2. – С. 107–112.

8. Кузяев І.М. Оптимізація температурного силового поля в зоні живлення черв'ячного екструдера / І.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2002. – № 4. – С. 129–133.

9. Кузяев І.М. Математичні аспекти оптимізації пластикуючих черв'ячних машин / І.М. Кузяев, В.І. Ситар // Системні технології (спец. випуск). – Дніпропетровськ. – 2002. – №4. – С. 60–64.

*Здобувачем виконано постановку задачі для оптимізації параметрів у зоні пластикації й розробку математичної моделі для зони плавлення.*

10. Кузяев І.М. Моделювання процесів, які відбуваються у дисковому зазорі черв'ячно-дискових екструдерів / І.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2002. – №6. – С. 145–149.

11. Кузяев И.М. Анализ взаимосвязи между коэффициентами трения и давлением с учетом температурного поля при транспортировке материалов в винтовом канале червячных машин / И.М. Кузяев // Трение и износ. – Гомель. – 2002. – Vol.23, № 2. – С. 154–159.

12. Кузяев И.М. Анализ диссипативных процессов, развивающихся в пространстве между вращающимся и неподвижным дисками, с учетом внутреннего и внешнего трения / И.М. Кузяев // Трение и износ. – Гомель. – 2002. – Vol.23, №6. – С. 635–639.

13. Кузяев И.М. Исследование влияния двухслойного гидроксида типа LDHs на показатели задымленности композиций на основе ПВХ при их горении / С. Чжен, И.М. Кузяев, Д. Ву // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2003. – №2. – С. 107–110.

*Здобувач розробив стенд і виконав дослід з інтенсивності густини задимленості від властивостей композицій на базі ПВХ.*

14. Кузяев И.М. Комплексное исследование механо-экологических свойств поливинилхлоридных композитов / С. Чжен, И.М. Кузяев, Д. Ву // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2003. – №3. – С. 125–127.

*Здобувач виконав термомеханічні дослідження полівінілхлоридних нанокompозитів з математичною обробкою одержаних даних.*

15. Кузяев И.М. Моделирование процессов плавления термопластов в экструзионных агрегатах / И.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2003. – № 4. – С. 145–149.

16. Кузяев И.М. Моделирование процессов теплообмена в зоне плавления червячных машин с учетом пористости твердой пробки / И.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2003. – № 6 – С. 173–177.

17. Кузяев И.М. Моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в агрегатах с рабочими пространствами между двумя дисками при переработке жидких сред / И.М. Кузяев // Промышл. теплотехника. – Киев. – 2003. – Т.25, № 5. – С. 17–24.

18. Математичне моделювання процесів у міждискових зазорах черв'ячно-дискових екструдерів. Частина 1: Розрахунок енергосилових характеристик / І.М. Кузяєв, І.І. Начовний, Є.О. Богуцька, М.С. Хорольський // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць. Ін-т геотехнічної механіки НАН України. – Дніпропетровськ. – 2003. – Вип. 46. – С. 47–59.

*Здобувачем виконано розробку математичної моделі для оптимізації енергосилових характеристик у міждискових зазорах.*

19. Кузяев И.М. Моделирование охлаждения гранул при пневмоэкструзионном гранулировании полимеров / И.М. Кузяев, В.И. Сытар, В.К. Кулинич // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2004. – №1. – С. 191–197.

*Здобувач виконав аналіз конструкцій систем пневмоекструзійного гранулювання полімерів і одержав залежності для розподілу температурного поля в гранулах при їх охолодженні.*

20. Кузяев И.М. Моделирование температурного поля в системе корпус – полимерный материал – сердечник червяка для зоны питания одночервячного экструдера / И.М. Кузяев, В.И. Сытар, И.В. Сафронова // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2004. – №2. – С. 198–204.

*Здобувачем виконано розробку математичної моделі для моделювання процесів у зоні живлення на базі тришарової схеми.*

21. Оптимизация состава композиции по комплексу триботехнических характеристик / В.И. Сытар, И.М. Кузяев, А.И. Буря, Д.С. Данилин, О.В. Холодилов, О.С. Кабат // Трение и износ. – Гомель. – 2004. – Т.25, №2. – С.219–222.

*Здобувачем виконана математична обробка одержаних експериментальних даних по триботехнічним характеристикам композицій на основі фенілоу.*

22. Кузяев І.М. Моделирование процесів, які відбуваються в зоні плавлення одночерв'ячних екструдерів при наявності конусного осердя / І.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2004. – №5. – С. 217 – 222.

23. Кузяев И.М. Интенсификация процессов тепломассопереноса в рабочем канале червячных машин при переработке неньютоновских полимерных жидкостей / И.М. Кузяев // Промышл. теплотехника. – Киев. – 2004. – Т.26, №1. – С. 25–31.

24. Кузяев И.М. Анализ распределения давлений в полимерном материале, находящемся в конусном зазоре под действием центробежных сил / И.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2005. – №1. – С. 196–199.

25. Кузяев И.М. Анализ явлений порообразований в полимерных материалах при проведении процессов экструзии / И.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2005. – № 2. – С. 125–135.

26. Кузяев И.М. Моделирование процессов образования пор в расплавах полимеров / И.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2005. – №3. – С. 128–134.

27. Кузяев И.М. Анализ энергии взаимодействия между мелко-дисперсными частицами наполнителей, используемых при получении полимерных композитов / И.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2005. – № 4. – С. 96–109.

28. Кузяев И.М. Моделирование поведения агрегатов из нанодисперсных частиц в полимерной среде под действием периодически изменяющегося силового поля / И.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2005. – № 5. – С. 139–145.

29. Кузяев И.М. Оптимизация структуры пористых материалов / И.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2005. – № 6. – С. 143–146.

30. Анализ температурно-скоростного поля в зоне дозирования червячных машин, возникающего при переработке аномально-вязких материалов / И.М. Кузяев, И.И. Начовный, Е.А. Богуцкая, М.С. Хорольский // Труды НИОХИМ. – Харьков. – 2005. – Том. LXXIV. – С.183–199.

*Здобувачем виконано розробку математичної моделі для зони дозування черв'ячних машин у випадку неохолоджуваного черв'яка.*

31. Кузяев И.М. Моделирование работы высокоскоростных экструзионных агрегатов / И.М. Кузяев, В.И. Миргородский, С.И. Кузяева // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2006. – № 1. – С. 142–150.

*Здобувачем виконано розробку математичної моделі для зони дозування черв'ячних машин з урахуванням тришарової схеми й обґрунтовано використання черв'ячних машин для здійснення високошвидкісної екструзії.*

32. Кузяев И.М. Исследование напряженного состояния в полимерных жидких средах, находящихся в дисковых зазорах дисковых и червячно-дисковых экструдеров / И.М. Кузяев, А.А. Митрохин, Ю.В. Поволоцкая // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2006. – № 2. – С. 150–154.

*Здобувачем виконано експериментальні дослідження й обробку інтерференційних смуг.*

33. Кузяев И.М. Влияние динамического поведения газовых пузырей на степень разделения наноагрегатов при получении пористых полимерных нанокомпозитов / И.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2006. – № 3. – С. 83–89.

34. Кузяев И.М. Основные направления развития науки и техники в области полимерных нанокомпозитов и нанотехнологий на современном этапе / И.М. Кузяев, В.И. Сытар, О.С. Кабат // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2006. – № 4. – С. 126–139.

*Здобувачем виконано аналіз одержаних результатів з впливу різних типів наноматеріалів на властивості полімерних нанокомпозитів.*

35. Кузяев И.М. Моделирование процессов движения полимерных сред в дисковых и конусных каналах под действием центробежных сил / И.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2006. – № 5. – С. 212–227.

36. Кузяев И.М. Анализ процессов плавления полимерных материалов в дисковых и конусных каналах с учетом воздействия центробежных сил / И.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2006. – № 6. – С.181–186.

37. Кузяев И.М. Конструктивные особенности и основные функциональные зависимости зоны питания одночервячных машин / И.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2007. – № 1. – С. 162–177.

38. Кузяев И.М. Разработка смесительных и пластицирующих элементов для одночервячных экструдеров / И.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2007. – № 2. – С. 212–222.

39. Кузяев И.М. Математическое моделирование процессов в зоне дозирования одночервячных машин / И.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2007. – № 3. – С.151–172.

40. Кузяев И.М. Исследование процессов переработки полимерных материалов методом двойного лучепреломления / И.М. Кузяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2007. – № 4. – С. 154–168.



41. Кузьяев И.М. Разработка математической модели для моделирования движения полимерных сред в прямоугольных каналах под действием центробежных сил / И.М. Кузьяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2007. – № 5. – С. 202–208.

42. Оптимизация конструктивного исполнения корпусов одночервячных экструдеров / И.М. Кузьяев, С.И. Немчинов, Д.О. Андросюк, С.И. Кузьяева // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2007. – № 6. – С. 220–223.

*Здобувачем розроблено розрахункову схему й виконано обробку одержаних експериментальних даних з розподілу напружень у корпусі одночерв'ячних екструдерів.*

43. Кузьяев И.М. Центробежные экструдеры – новое направление в развитии экструзионной техники / И.М. Кузьяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2008. – № 1. – С.163–172.

44. Кузьяев И.М. Моделирование процессов плавления в одночервячных машинах при нежестком каркасе твердой пробки / И.М. Кузьяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2008. – № 3. – С. 103–111.

45. Кузьяев И.М. Обоснование и построение базовой теории для разделения наноагрегатов при получении полимерных нанокомпозитов / И.М. Кузьяев // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск. – 2008. – №5. – С.157–165.

46. А.с. 903172 СССР, МКИ2 В 29 F 3/01. Червячный экструдер для полимерных материалов / И.М. Кузьяев, Н.И. Шишков, В.А. Успенский, Н.В. Довгопол (СССР).– № 2943317/23-05; заявл. 23.06.80; опубл. 07.02.82, Бюл. № 5.

47. А.с. 939270 СССР, МКИ2 В 29 F 3/02. Червячный экструдер для полимерных материалов / С.В. Портненко, И.М. Кузьяев, Ю.А. Кузнецов, В.И. Ткач (СССР). – №3224680/23-05; заявл. 26.12.80; опубл. 30.06.82, Бюл. № 24.

48. А.с. 960038 СССР, МКИ2 В 29 F 3/02 Шнековый экструдер / С.В. Портненко, И.М. Кузьяев, В.А. Успенский, И.И. Начовный, Ю.В. Тюрин (СССР). – №3225178/23-05; заявл. 26.12.80; опубл. 23.09.82, Бюл. № 35.

49. А.с. 1528551, МКИЗ В 01 J 2/20. Гранулятор / В.В. Немков, В.Ф. Гулин, В.Е. Максютя, И.М. Кузьяев (СССР). – № 4334681/23-26; заявл. 30.11.87; опубл. 15.12.89, Бюл. № 46.

50. А.с. 1632482, МКИЗ В 01 J 2/20. Гранулятор / В.В. Немков, В.Ф. Гулин, В.Е. Максютя, И.М. Кузьяев (СССР). – № 4684780/26; заявл. 15.03.89; опубл. 07.03.91, Бюл. № 9.

51. Пат. 14948 Україна, МПК4 В 29 В 7/40. Пристрій для змішування та пластикації полімерних матеріалів / Кузьяев І.М., Руденко Д.В., Плошенко І.Г., Лимар В.В., заявник і патентовласник Український державний хіміко-технологічний університет. – № 96072872; заявл. 17.07.96; опубл. 30.06.97. Бюл. № 3.

52. Пат. 17111 Україна, МПК4 В 22 D 23/01. Екструзійна головка виробництва рукавних термопластичних виробів з ребрами / Кузяєв І.М., Чепіга І.Г., Плошенко І.Г., Лимар В.В., заявник і патентовласник Український державний хіміко-технологічний університет. – № 96072873; заявл. 17.07.96; опубл. 31.10.97. Бюл. № 5.

53. Пат. 17138А Україна, МПК4 В 29 В 9/06. Гранулятор / Кузяєв І.М., Семенюк А.М., Плошенко І.Г., Лимар В.В., заявник і патентовласник Український державний хіміко-технологічний університет. – № 96072870; заявл. 17.07.96; опубл. 31.10.97, Бюл. № 5.

54. Пат. 17777 Україна, МПК4 В 29 С 47/24. Екструзійний пристрій для одержання трубної заготовки з полімерних матеріалів / Кузяєв І.М., Лисак А.Л., Плошенко І.Г., Лимар В.В., заявник і патентовласник Український державний хіміко-технологічний університет. – № 96072869; заявл. 17.07.96; опубл. 20.05.97, Бюл. № 5.

55. Пат. 50309А Україна, МПК7 В 29 В 9/06. Пристрій для пневмо-екструзійного гранулювання полімерів / Кузяєв І.М., заявник і патентовласник Український державний хіміко-технологічний університет. – № 2001128773; заявл. 18.12.01; опубл. 15.10.02, Бюл. № 10.

56. Пат. 74990 Україна, МПК7 В 29 С 47/36. Екструдер для переробки полімерів / Кузяєв І.М., заявник і патентовласник Український державний хіміко-технологічний університет. – № 20041008788; заявл. 27.10.04; опубл. 15.02.06. Бюл. № 2.

57. Пат. 76553 Україна, МПК7 В 29 С 47/36. Відцентровий екструдер для переробки полімерів / Кузяєв І.М., заявник і патентовласник Український державний хіміко-технологічний університет. – № 20040705277; заявл. 01.07.04; опубл. 15.08.06, Бюл. № 8.

58. Пат. 77325 Україна, МПК7 В 29 С 47/36. Відцентровий екструдер для переробки полімерів / Кузяєв І.М., Кузяєва С.І., заявник і патентовласник Український державний хіміко-технологічний університет. – № а200500844; заявл. 31.01.05; опубл. 15.11.06, Бюл. № 11.

59. Пат. 77333 Україна, МПК7 В 29 С 47/36. Відцентровий екструдер для переробки полімерів / Кузяєв І.М., Кузяєва С.І., заявник і патентовласник Український державний хіміко-технологічний університет. – № а200501964; заявл. 03.03.05; опубл. 15.11.06, Бюл. № 11.

60. Пат. 77850 Україна, МПК7 В 29 В 9/02. Пристрій для пневмоекструзійного гранулювання полімерів / Кузяєв І.М., Кузяєва С.І., заявник і патентовласник Український державний хіміко-технологічний університет. – № а200502455; заявл. 18.03.05; опубл. 15.01.07, Бюл. № 1.

61. Пат. 78843 Україна, МПК7 В 29 В 9/06. Пристрій для пневмоекструзійного гранулювання полімерів / Кузяєв І.М., Кузяєва С.І., заявник і патентовласник Український державний хіміко-технологічний університет. – № а200502014; заявл. 04.03.05; опубл. 18.04.07, Бюл. № 4.

62. Пат. 81277 Україна, МПК7 В 29 С 47/36. Відцентровий екструдер для переробки полімерів / Кузяєв І.М., Кузяєва С.І., заявник і патентовласник Український державний хіміко-технологічний університет. – № а200506588; заявл. 04.07.05; опубл. 25.12.2007, Бюл. № 21.

В опублікованих авторських свідоцтвах та патентах зі співавторами здобувачу належать: розробка технічної ідеї, написання формул і опис заявок.

## АНОТАЦІЯ

Кузяєв І.М. Тепломасообмінні процеси і розробка обладнання високошвидкісної екструзії полімерів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. – Державний вищий навчальний заклад “Український державний хіміко-технологічний університет”, Дніпропетровськ, 2009.

Дисертацію присвячено рішення важливої науково-прикладної проблеми – розробці наукових основ і створенню науково обґрунтованих методів розрахунку високошвидкісних процесів екструзії, на основі чого можна проектувати високоефективне екструзійне обладнання.

Сформульовано й вирішено проблему руху полімерного матеріалу у функціональних зонах одночерв'ячного екструдера: дозування, плавлення й живлення, а також досліджено вплив геометричних і технологічних параметрів міждискових зон на функціонування дискових і черв'ячно-дискових екструдерів.

Уперше теоретично обґрунтовано й вирішено задачу гідродинаміки полімерного матеріалу в робочих каналах відцентрових екструзійних агрегатів.

Розроблено й підтверджено експериментально наукові основи поведження газових пухирів у полімерному середовищі при одержанні пористих матеріалів.

Науково обґрунтовано модель, що описує поведження наноконкомплексів у полімерному середовищі при різному характері силового впливу на них.

Для підтвердження справедливості одержаних теоретичних положень розроблено низку установок, на яких виконано експериментальні дослідження з використанням різних методик.

**Ключові слова:** тепломасообмін, високошвидкісні процеси екструзії, гідромеханічні процеси, теоретичні та експериментальні дослідження, робочі зони, одночерв'ячний і черв'ячно-дисковий екструдери, відцентровий екструдер, енергозбереження.

## АННОТАЦІЯ

Кузьяев И.М. Тепломассообменные процессы и разработка оборудования высокоскоростной экструзии полимеров. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии. – Государственное высшее учебное заведение “Украинский государственный химико-технологический университет”, Днепропетровск, 2009.

Диссертация посвящена решению важной научно-прикладной проблемы – разработке научных основ и созданию научно обоснованных методов расчета высокоскоростных процессов экструзии для проектирования высокоэффективного экструзионного оборудования.

Сформулирована и решена проблема движения полимерного материала в зоне дозирования одночервячного экструдера для плоских однослойных и трехслойных схем, а также для объемной модели в цилиндрической системе координат. Установлено, что для высокоскоростных процессов экструзии наиболее оптимальной схемой для анализа процессов течения расплавов полимеров с учетом теплообменных явлений является трехслойные схемы.

Решены задачи процессов плавления термопластов в случае сплошности твердой полимерной пробки при различных граничных условиях на ее границах. Впервые разработаны математические модели процессов плавления пластмасс при наличии пор в неоднородной твердой массе, при этом такой характер плавления подтвержден экспериментально. Получены определяющие уравнения пластикации в рабочем объеме одночервячного экструдера в случае, как жесткого каркаса полимерного материала, так и с учетом возможного перемещения отдельных частей твердой пробки.

Решены задачи неизотермических процессов движения термопластов в зоне питания экструдера для однослойной и трехслойной схем. Получены научно обоснованные методы расчета создаваемого давления в твердой пробке и распределения температурного поля по объему в перерабатываемом материале. Найдены условия, позволяющие избежать нестабильных режимов работы.

Исследовано влияние геометрических и технологических параметров междисковых зон с учетом характеристик перерабатываемого материала на функционирование дисковых и червячно-дисковых экструдеров. Впервые получены уравнения для определения производительности и затрачиваемой мощности в дисковых зонах червячно-дисковых экструдерах для вязкоупругих жидкостей на основе модифицированного уравнения для жидкости второго порядка. Также впервые получено выражение для анализа температурного поля, которое возникает в дисковых зазорах, как с учетом граничных условий первого рода, так и второго рода.

Впервые теоретически обоснована и решена задача гидродинамики перерабатываемого материала в рабочих каналах центробежных экструзионных агрегатов. Получены теоретические зависимости для описания скоростей и давлений в каналах дисковой, конусной и прямоугольной геометрии. Адекватность теоретических результатов реальным условиям подтверждена экспериментально.

Разработаны и подтверждены экспериментально научные основы поведения газовых пузырей в полимерной среде при получении пористых материалов. Построены математические модели для изотермических и неізотермических условий. Впервые разработана математическая модель для динамического поведения газового пузыря для двухслойной схемы.

Научно обоснована модель, описывающая поведение наноконплексов в полимерной среде при различном характере силового воздействия на них. Разработана математическая модель для разделения наноагрегатов с учетом затухания колебательного процесса в перерабатываемой среде. Впервые получена математическая модель при производстве пористых полимерных материалов с учетом динамического поведения газовых пузырей на степень разделения наноагрегатов. Получено уравнение для определения удельной энергии наноагрегатов различной структуры.

Разработаны новые конструкции червячных экструдеров с различными типами смесительно-пластицирующих узлов. Созданы энергосберегающие центробежные экструдеры с разнообразным конструктивным исполнением зоны дозирования.

Для подтверждения справедливости полученных теоретических положений разработан ряд установок, на которых выполнены экспериментальные исследования с использованием различных методик. Так для анализа напряженно-деформированного состояния в междисковых зазорах был задействован метод двойного лучепреломления. На приборе Mastersizer2000 компании Malvern Instruments Ltd із приставкой Hydro2000MU проведены исследования степени разделения наноконплексов на примере материала  $Mg(OH)_2$  в зависимости от трех составляющих, а именно, частоты поля силового воздействия и его амплитуды, а также времени воздействия.

**Ключевые слова:** тепломассообмен, высокоскоростные процессы экструзии, гидромеханические процессы, теоретические и экспериментальные исследования, рабочие зоны, одночервячный и червячно-дисковый экструдеры, центробежный экструдер, энергосбережение.

## SUMMARY

Kuzyayev I.M. Thermal-mass-exchanges processes and development of equipment highly speed extrusion of polymers. – Manuscript.

Thesis for doctor's degree of engineering sciences on specialty 05.17.08 – processes and equipment of chemical technology. – State higher educational establishment “Ukrainian state chemical-technological university” Dnipropetrovs’k, 2009.

Dissertation is devoted to the decision of the important scientifically-applied problem to development of scientific bases and creation of the scientifically grounded methods of calculation of highly speeds processes of extrude, on the basis of what it is possible to design the high-efficiency extrusion equipment.

Formulated and decided problem of motion of polymeric material taking into account heat-exchange processes in the functional areas of single screw machines: dosages, melting and loads, and also influence of geometrical and technological parameters of interdisks areas is investigational on functioning of disks and worming-disks extruders.

In first theory grounded and decided task of hydrodynamics of polymeric material in the working ducting of centrifugal extrusion aggregates.

Developed and confirmed experimentally scientific bases of conduct of bubbles in a polymeric environment at the receipt of porous materials.

A model describing the conduct of nanosystems in a polymeric environment at different character of power influence on them and allowing to regulate the degree of division of nonmaterial's is scientifically grounded.

For confirmation of justice of the got theoretical positions the row of options on which experimental researches are executed with the use of different methods is developed.

**Keywords:** thermal-mass-exchanger, highly speed extrusion processes, hydromechanics processes, theoretical and experimental researches, working ducting, single screw and screw-disk extruders, centrifugal extruder, energy-savings.