

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

УЛЬЄВ ЛЕОНІД МИХАЙЛОВИЧ

УДК 66.021:(532.515.2+536.24)

**ЛАМІНАРНІ ТЕЧІЇ ТА ТЕПЛООБМІН У СПІВВІСНИХ КОНІЧНИХ КАНАЛАХ ХІМІКО-
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ**

Спеціальність 05.17.08 – Процеси та обладнання хімічної технології

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

ХАРКІВ 2008

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі інтегрованих технологій, процесів та апаратів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Міністерство освіти та науки України, г. Харків.

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор **ТОВАЖНЯНСЬКИЙ ЛЕОНІД ЛЕОНІДОВИЧ**, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Офіційні опоненти:

академік НАН України, доктор технічних наук, професор **МАЦЕВИТИЙ ЮРІЙ МИХАЙЛОВИЧ**, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, директор;

доктор технічних наук, професор **СКЛАБІНСЬКИЙ ВСЕВОЛОД ІВАНОВИЧ**, Сумський державний університет, завідувач кафедри процесів та обладнання хімічних та нафтопереробних виробництв;

доктор технічних наук, професор **КАМБУРГ ВОЛОДИМИР ГРИГОРОВИЧ**, Хмельницький національний університет, завідувач кафедри прикладної математики.

Захист відбудеться: «24» «квітня» 2008 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 ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «21» «березня» 2008 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 64.050.05

Тимченко В.К.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дослідження ламінарних течій та теплообміну рідини в каналах різної форми відноситься до фундаментальних наукових проблем гідромеханіки й теорії процесів теплопередачі, оскільки на їхній основі проводиться рішення інших наукових та технічних проблем, що виникають при створенні проточних деталей в апаратах хімічної технології. Наприклад, при проектуванні встаткування для синтезу й переробки полімерних матеріалів з'являється необхідність розрахунку плинину і теплообміну розплавів полімерів у коаксіальних конічних каналах формуючих пристроїв. Аналіз параметрів плинину та теплообміну в таких каналах, точна оцінка перепаду тиску дозволяють створювати ресурсо- й енергозберігаюче встаткування, що стало працює в оптимальних технологічних режимах, але в цей час немає простих аналітичних виразів для виконання інженерних розрахунків течії та теплообміну в співвісних конічних каналах.

Важливість розвитку аналітичних методів і одержання аналітичних рішень крайових задач, що виникають при моделюванні сучасних хіміко-технологічних процесів обумовлена ще й тим, що існуючі програмні пакети не завжди забезпечують необхідну точність й надійність результатів. Крім того, аналітичні рішення служать тестовими завданнями при створенні й налагодженні чисельних моделей. У зв'язку з цим тема дисертації має важливе наукове та практичне значення, оскільки вона спрямована на вирішення **актуальної науково-прикладної проблеми**, сутність якої полягає в створенні теоретичної основи опису гідромеханічних і теплових процесів при ламінарному русі в'язких течив у співвісних конічних каналах хіміко-технологічного обладнання і науково обґрунтованих методів розрахунку основних технологічних параметрів, що визначають ці процеси.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана на кафедрі інтегрованих технологій, процесів і апаратів НТУ «ХПІ». Робота виконувалася в рамках госпдоговірних і держбюджетних тем.

Здобувач був науковим керівником у г/д темі «Створення методу розрахунку потужності, яка необхідна для підтримки течії в'язкої рідини в спеціальних каналах змінного перерізу», № ДР 0107U004892 на замовлення АТ «Співдружність – Т». У г/д темах «Дослідження течії розплавів ТПУ-12К и розробка методу розрахунку фільтери», № ДР 01840019624; «Визначення оптимальних конструкторських і технологічних параметрів фільтери для виробництва гранул ТПУ-12К», № ДР 01850021856; «Дослідження процесів течії й гранулювання розплаву термопластичних поліуретанів ТПУ-14МЭ й розробка методу розрахунку фільтери», № ДР 01860013289; «Дослідження плинину й гранулювання ТПУ «ВИТУР- 0433-85» і розробка методу розрахунку фільтер гранулятора для термопластичних поліуретанів», № ДР 01870015984 які виконувались відповідно до постанов РМ СРСР №654 від 15.16.83 р., №888 від 19.09.85 р., №1129-332 від 20.11.85 р., №65 від 14.01.87 р. здобувач був відповідальним виконавцем, а при виконанні робіт з держбюджетних тем МОН

України «Розробка фундаментальних основ створення нових екологічно чистих енерго- та ресурсозберігаючих технологій, впровадження їх в енергоємні галузі промисловості України», № ДР 0399U003348, «Розвиток системних енергозберігаючих методів із застосуванням інтенсивного теплообмінного встаткування для промислово-енергетичного комплексу України», № ДР 0197U001930; «Визначення енергозберігаючого потенціалу промислово-енергетичного комплексу України, розробка й створення ефективних енергозберігаючих методів і встаткування промислового, сільськогосподарського й побутового призначення на основі системного підходу із прогнозуванням скорочення шкідливих викидів», № ДР 0100U1689; «Теоретичні основи енергозберігаючої інтеграції процесів і технології зменшення шкідливих викидів для промислових підприємств» № ДР 0103U001521; «Розвиток теорії синтезу інтегрованих теплоенергетичних процесів підприємств промислових регіонів України для суттєвого зменшення енергоспоживання», № ДР 0106U001497 здобувач був та є автором ідей і відповідальним виконавцем.

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є розроблення теоретичних основ гідродинаміки та ламінарно-конвективного теплообміну в'язкої рідини в співвісних конічних каналах хіміко-технологічного обладнання, визначення впливу особливостей геометрії цих каналів на процеси ламінарної течії та теплообміну в них і створення науково обґрунтованих інженерних та аналітичних методів розрахунку ламінарної течії та конвективного теплообміну в'язких рідин у співвісних конічних каналах.

Для досягнення цілей, поставлених у роботі, вирішуються наступні задачі:

- 1 проведення геометричної класифікації співвісних конічних каналів;
- 2 розвинути теоретичні основи гідродинаміки ламінарних течій в'язких та високов'язких рідин у класифікованих каналах;
- 3 обґрунтувати і розробити математичні моделі ламінарної течії в'язких та високов'язких рідин у класифікованих каналах;
- 4 виконати рішення задач ламінарного плинину в класифікованих співвісних конічних каналах;
- 5 обґрунтувати і розробити математичні моделі ламінарно-конвективного теплообміну течії в'язких рідин у співвісних конічних каналах;
- 6 вирішити задачі ламінарно-конвективного теплообміну в співвісних конічних каналах;
- 7 створити науково обґрунтовані інженерні методи розрахунку швидкостей, тисків, температур і величин похідних від них при ламінарному плинину в'язких рідин у співвісних конічних каналах.

Об'єктом дослідження є процеси ламінарного плинину ньютонівських рідин та їх ламінарно-конвективного теплообміну в співвісних конічних каналах різної геометричної конфігурації.

Предметом дослідження є математичні моделі ламінарної течії та ламінарно-конвективного теплообміну в співвісних конічних каналах хіміко-технологічного обладнання. Дослідження за-

значеного напрямку включає постановку й рішення сукупності задач ламінарного плинину та теплообміну, як у співвісних конічних дифузорах, так і конфузорах, аналіз цих плиннів за допомогою рішень та одержання важливих параметрів цих течій.

Методи дослідження. В основі всіх положень і висновків дисертації лежать закони механіки й теплообміну рідких середовищ. Для вирішення задач ламінарного плинину в'язких і псевдов'язких течив було використовувано методи рішення диференціальних рівнянь у частинних похідних. Для розв'язку диференціальних рівнянь, які пов'язані з розвитком ламінарного плинину течива, використовувались методи перетворень Лапласа-Карсона та розкладання по власних функціях задачі. Для розв'язку проблем ламінарного теплообміну рідини використовувались методи розкладання по власних функціях задачі. При отриманні виразів довжини початкової термічної ділянки використовувались статистичні методи обробки даних численних експериментів.

Наукова новизна отриманих результатів. Вперше:

- виконано класифікацію співвісних конічних каналів та отримано систему гідродинамічних рівнянь у напругах, які описують ламінарний плин у біконічній системі координат, яка потім спрощена для практично важливих випадків;
- отримано й досліджено аналітичні рішення задач ламінарного дифузорового і конфузорового плинину у співвісних конічних каналах із загальною вершиною границь та урахуванням характерної інерційної сили;
- отримано й досліджено аналітичні рішення задач повзучого плинину та ламінарного плинину із урахуванням характерної інерційної сили в співвісних конічних дифузорах і конфузорах із постійною та змінною шириною уздовж плинину;
- отримано й досліджено аналітичні рішення задач ламінарного плинину ньютонівської із урахуванням характерної інерційної сили та повзучого плинину псевдо пластичної рідини в секториальних дифузорах і конфузорах сталої та змінної ширини;
- вирішено й досліджено задачу розвитку ламінарного плинину в співвісному конічному дифузори постійної ширини із однорідним та неоднорідним початковими розподілами швидкості;
- отримано й досліджено рішення задач ламінарного плинину із урахуванням характерної інерційної сили в співвісних конічних конфузорах і дифузорах постійної й змінної ширини й із урахуванням розходження в кривизні їхніх поверхонь та визначені умови, при яких можна нехтувати розходженням у кривизні границь каналів;
- вирішено й досліджено задачі ламінарного конвективного теплообміну при дифузоровому й конфузоровому плинні в співвісних конічних каналах постійної ширини із граничними умовами, заданими кусково-диференційованими функціями;
- вирішено й досліджено задачі ламінарного конвективного теплообміну при дифузоровому плинні в співвісних конічних каналах постійної та змінної ширини із температурними умовами третього

роду на стінках;

- вирішено й досліджено задачу ламінарного конвективного теплообміну в співвісному конічному конфузори постійної ширини із урахуванням теплоти дисипації механічної енергії;
- отримано вирази для визначення довжини початкових термічних ділянок при ламінарному теплообміні в співвісних конічних дифузорах та конфузорах постійної ширини.

Практична значимість результатів. На основі вирішених у дисертації наукових проблем розроблено методи інженерних розрахунків сталої течії та теплообміну у коаксіальних конічних каналах, які можуть бути використані і використовуються для аналізу та розрахунку при створенні нових процесів та при розробці конструкцій апаратів хімічної технології, що підтверджено актом впровадження результатів на ЗАТ «УкрНДХіммаш». Розроблені наукові положення використовуються у курсах лекцій на кафедрі інтегрованих технологій, процесів та апаратів НТУ «ХП» при викладанні дисциплін «Гідрогазодинаміка», «Теплофізика», «Процеси та апарати хімічних виробництв», «Типові технологічні об'єкти та процеси виробництва», «Процеси та апарати хімічних технологій» та «Процеси та апарати харчових виробництв», що також підтверджено довідкою про використання.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі стану проблеми, обґрунтуванні і розробленні основної ідеї і теми дисертації, створенні математичних моделей повзучого та ламінарного плинну в'язкої та в'язкопластичної рідини у співвісних конічних каналах та ідей їх вирішення, створенні математичних моделей ламінарного конвективного теплообміну у співвісних конічних каналах та їх розв'язку, а також в порівнянні винайдених даних з експериментальними.

Здобувач висловлює глибоку подяку науковому консультанту д.т.н., професору ТОВАЖНЯНСЬКОМУ Л.Л. за надану допомогу в розв'язанні наукової проблеми.

Апробація. Результати, викладені в дисертації, були представлені здобувачем на 13 міжнародних конференціях: 5-й, 6-й, 7-й, 8-й, 9-й Міжнародних науково-практичних конференціях «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье» (м. Харків, Україна, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001); 10-й Міжнародній конференції по інформаційним технологіям (м. Харків, Україна, 2002); 4-ому конгресі двигунобудівників України із іноземною участю «Наука й Практика» (Харків-Рибаче, Україна, 1999); 4-ому Мінському Міжнародному форумі по тепло- і масообміну MIF-2000 (м. Мінськ, Білорусь, 2000); Міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані технології й енергозбереження» - «ІТЭ-2003» (с. М. Маяк, Крим, Україна, 2003); Міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані технології й енергозбереження» - «ІТЭ-2005» (м. Алушта, Крим, Україна, 2005); 14-ому, 15-ому й 16-ому Міжнародному конгресам по хімічній технології й технології виробництва - CHISA'2000 (м. Прага, Чехія, 2000); CHISA'2002 (м. Прага, Чехія, 2002); CHISA'2004 (м. Прага, Чехія, 2004).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 48 наукових праць, в тому числі 1 монографія (у 2-х томах загальним обсягом 1420 с.). 40 робіт опубліковано у провідних фахових виданнях

ВАК України. Всі зазначені роботи виконані особисто здобувачем.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, 9 розділів, висновків, списку літературних джерел й додатків. Матеріал основної частини роботи викладено на 523 с. (з них ілюстрації 158 с., список використаних джерел 20 с.), ілюстрацій 276, додатків 32, зібраних в окремому томі, список використаних джерел – 225 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету й завдання досліджень, наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів.

У першому розділі дисертації виконана класифікація співвісних конічних каналів по геометричним ознакам. Такі канали можна розділити на два види. До першого віднесено канали, у яких конічні поверхні, що утворюють границі каналу, мають загальну вершину. До другого виду співвісних конічних каналів віднесено канали, у яких вершини круглих конусів, що утворюють границі каналу, рознесені. Серед таких каналів можуть бути канали із постійною та змінною шириною уздовж плинину. У класі каналів змінної ширини можна виділити канали, границі яких розкриті в одну сторону і у різні, тобто назустріч один одному або в протилежні сторони, а також канали, у яких внутрішня поверхня є циліндричною. У всіх геометричних класах каналів існує два види плиннів: дифузорні - плинні спрямовані від вершини зовнішньої поверхні каналу й конфузорні - плинні, спрямовані у бік вершини зовнішньої поверхні каналу. Аналіз плинину ньютонівської рідини в практично цікавих випадках показав незначну величину чисел Рейнольдса та Наме-Грифіта: $Re \leq o(1)$, $Gn \ll 1$, що дозволяє вважати плинні ізотермічними.

Осесиметричний плин ньютонівської рідини в кільцевих конічних каналах із загальною вершиною границь розглядається в сферичних координатах, що дозволяє за допомогою рівняння нерозривності одержати співвідношення порядку між кутовою та радіальною складовими швидкості $V_{\theta} - \Delta\theta V_R = o(V_R)$, де $\Delta\theta$ – різниця між напівкутами розкриття конічних границь є досить мала в практично цікавих випадках. Незважаючи на малі значення чисел Рейнольдса, будемо враховувати інерційний член у рівняннях руху через те, що в розглянутих каналах, у більшості випадків, середня по поверхні поперечного перерізу каналу швидкість, змінюється уздовж плинину. Тому рівняння плинину для стаціонарного осесиметричного ламінарного дифузорного плинину у формі Озеена із урахуванням зроблених оцінок запишуться у вигляді:

(1)
(2)
(3)

З умовами прилипання на границях каналу

(4)
(5)

та заданим на вході в канал середньому по площі поперечного його перетину тиском

(6)

де θ_1, θ_2 – напівкути розкриття границь, град; R_0 – радіальна координата входу в канал, м; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с.

Виконуючи в рівняннях (1)-(6) заміну змінних

(7)

одержуємо систему, що описує ламінарний стаціонарний осесиметричний плин у співвісних конічних конфузорах із загальною вершиною границь.

Ламінарний плин у співвісних конічних каналах постійної та змінної ширини, але без загальної вершини границь розглядається в системі біконічних координат (рис. 1), пов'язаної із декартовими координатами перетворенням

Рис. 1. Геометрія співвісного конічного каналу і її зв'язок з декартовими й біконічними координатами: h – ширина каналу; L – довжина утворюючих границь каналу.

$$Y' = R \cos \alpha - X \sin \alpha; \quad (8)$$

$$Z' = (R \sin \alpha - X \cos \alpha) \sin \varphi = \Omega \sin \varphi; \quad (9)$$

$$X' = (R \sin \alpha - X \cos \alpha) \cos \varphi = \Omega \cos \varphi; \quad (10)$$

де $\Omega = R \sin \alpha - X \cos \alpha$.

Перетворення (8)-(10) дозволили одержати систему диференціальних рівнянь у частинних похідних, що описують стаціонарний ламінарний плин рідини в біконічних координатах в напругах:

(11)

(12)

(13)

де ρ – густина рідини, кг/м^3 . Рівняння нерозривності запишеться як:

(14)

Компоненти тензора напруги записуються так:

Оцінка величини членів у рівняннях гідродинаміки для практично цікавих випадків дозволила редуциувати систему рівнянь гідродинаміки (11)-(14) до двох рівнянь

(15)

(16)

для яких граничними умовами є умови прилипання:

(17)

(18)

а початковою умовою – заданий тиск на вході в канал

(19)

Рівняння, що описують практично цікаві конфузори плин в співвісних конічних каналах, виходять із (15)-(19) за допомогою заміни, аналогічної (7).

У другому розділі вирішені задачі дифузорового й конфузорового ламінарного плин в співві-

сних конічних каналах із загальною вершиною границь.

При рішенні задачі дифузорового плинун (1)-(6) використані безрозмірні координати та параметри:

(20)

де $V_0 = Q / [2\pi R_0^2 (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)]$; Q – об'ємна витрата, м³/с; а також умова сталості витрати через будь-який поперечний переріз каналу, записана в сферичній системі координат

(21)

а в інерційному члені рівняння руху враховувалася тільки інерційна сила, що виникає внаслідок зміни середньої швидкості рідини уздовж.

Рішення задачі записується у вигляді:

(22)

(23)

де

– функції Лежандра першого і другого роду та другого порядку.

Якщо в знайденому рішенні спрямувати $Re \rightarrow 0$, то одержимо рішення задачі повзучого дифузорового плинун в співвісному конічному каналі із загальною вершиною границь, а при $\theta_1 = 0$ запишеться рішення для задачі дифузорового плинун між площиною та конусом із вершиною лежачою на площині і віссю перпендикулярною останній. Якщо ж покласти $\theta_2 > 90^\circ$, а $\theta_1 < 90^\circ$, то можна одержати рішення задачі ламінарного та повзучого плинун між співвісними конічними конусами із загальною вершиною, але розкритими в різні сторони.

Розподіл швидкості (22) буде однаковим як для рішення задачі повзучого плинун, так і для рішення задачі із обліком характерної інерційної сили. Цей розподіл є несиметричним щодо серединної поверхні каналу, а локалізація максимуму швидкості в поперечному перерізі визначається зі співвідношення $du/d\tau=0$.

Розподіл безрозмірного тиску (23) та його градієнту складаються із двох складових: дисипативної, що є рішенням задачі повзучого плинун і інерційної або динамічної, що визначається числом Рейнольдса. Характерною рисою розподілу середнього по поперечному перерізі безрозмірного тиску при ламінарному плинун в співвісному конічному дифузорі із загальною вершиною границь є його кінцева величина при $\xi \rightarrow \infty$:

(24)

звідки виходить, що при $Re = 8\xi_0 \bar{P}_\infty = 0$, а безрозмірний тиск при наближенні $\xi \rightarrow \infty$ у випадку повзучого плинун буде прагнути до величини $\bar{P}_\infty = -4\xi_0$. Дані результати дозволяють оцінити значення координат, аж до яких відбувається 99 % всієї можливої зміни тиску в даній геометрії каналу. Для повзучого плинун одержали

$$\xi = 4.64\xi_0, \quad (25)$$

а для плинину, коли характерною інерційною силою нехтувати не можна

$$\xi = 3.16\xi_0, \quad (26)$$

тобто 99 % падіння тиску відбуваються на безрозмірній довжині $\Delta\xi = 4.64\xi_0 - \xi_0 = 3.64\xi_0$ в першому випадку і на довжині $\Delta\xi = 2.16\xi_0$ – в другому.

У випадку повзучого плинину розподіл середнього по поперечному перекрою безрозмірного тиску є негативозначною монотонно спадною функцією (рис. 2).

Рис. 2. Розподіл середнього тиску при $\theta_1 = 3^\circ$, $\theta_2 = 15^\circ$.

У плинні із істотними числами Рейнольдса значна частина кінетичної енергії при зменшенні середньої по перетині швидкості уздовж плинину буде переходити в потенційну енергію напруженого стану рідини. Спочатку зі збільшенням Re модуль $\bar{P} \xi$ зменшується, залишаючись негативною величиною, але, починаючи з деякого значення числа Рейнольдса величина $\bar{P} \xi$ стає позитивною поблизу входу в канал, а потім це поширюється на все більшу частину каналу (рис. 2). Це означає, що рідина починає текти у бік збільшення тиску. Значення числа Рейнольдса починаючи із якого це відбувається, визначимо з умови, т.е.

(27)

У випадку плинину з перевагою характерної інерційної сили на початку каналу функція розподілу $\bar{P} \xi$ є немонотонною.

Отримане рішення дозволило визначити величину числа Рейнольдса аж до якого можна нехтувати інерційною складовою тиску при його обчисленні для ламінарного плинину в співвісному конічному дифузори із загальною вершиною границь з точністю до n %

(28)

а також значення числа Рейнольдса, починаючи з якого можна при розрахунку тиску нехтувати дисипативною компонентою з точністю до n %

(29)

У даному розділі також отримані й досліджені рішення задач повзучих та ламінарного плиннів у співвісних конічних конфузорах із загальною вершиною границь. Досліджена витратно-напірна характеристика для дифузорового плинину:

(30)

де h_0 – ширина каналу на вході, м; тобто для дифузора при $R = R_0$. Також отримана й досліджена витратно-напірна характеристика конфузорового плинину.

Залежність (30) має явні екстремальні властивості (рис. 3), а залежність у конфузори монотонно спадає у всій області визначення. По відомих залежностях $\Delta\bar{P} Q$ визначається потужність, необхідна для підтримки заданої витрати рідини в співвісному конічному каналі, де для дифузорового плинину є тільки дисипативною складовою зміни тиску в каналі, а для конфузорового плинину є повною зміною середнього по перекрою тиску в каналі.

Рис. 3. у залежності θ_2 при $\theta_2 - \theta_1 = 21^\circ$, $R_1/R_0 = 3$ і $h_0 = 0.01$ м – 1; 2 – лінія, на якій 0; 3 – лінія із мінімальними.

У третьому розділі вирішені задачі дифузорового та конфузорового ламінарного плинину в співвісних конічних каналах постійної ширини. У практично цікавих випадках плинину виконується умова $h \ll R \tan \alpha$, яка обговорюється розділі 7 й дозволяє рівняння, котрі описують рух рідини в безрозмірних змінних та параметрах:

(31)

записати в вигляді

(32)

(33)

(34)

(35)

(36)

де $V_0 = Q / [\pi h (2R_0 \sin \alpha - h \cos \alpha)]$, $\sigma = \xi \sin \alpha - \chi \cos \alpha$, а замість рівняння нерозривності (16) тут використано його інтегральний аналог – умова сталості витрати рідини через будь-який поперечний переріз каналу (33). Припускаючи плин розвиненим, одержуємо рішення задачі (32)-(36):

(37)

(38)

Якщо у виразах (37), (38) покласти $\alpha = 90^\circ$, то одержимо рішення задачі радіального розбіжного ламінарного плинину рідини між паралельними площинами, а якщо спрямувати $Re \rightarrow 0$, то одержимо рішення задачі повзучого дифузорового плинину.

При дифузоровому плинні в каналах, що розглядаються зараз, $\lim_{\xi \rightarrow \infty} \Pi(\xi) \rightarrow \infty$ на відміну від плинину в каналах із загальною вершиною границь. У випадку повзучого плинину, безрозмірний тиск є монотонно спадною функцією для будь-яких параметрів каналу і рідина тече у бік зменшення тиску. Зі збільшенням Re , починаючи з деякого значення Re , рідина починає поблизу входу в канал текти у бік збільшення тиску. Це значення визначається виразом

(39)

При подальшому збільшенні Re даний режим плинину поширюється на все більшу частину каналу, але уздовж плинину динамічна складова тиску падає швидше, ніж модуль дисипативної складової. Тому при деякому значенні ξ тиск, досягнувши максимуму, починає далі знижуватися, тобто функція $\Pi(\xi)$ немонотонна із випуклістю нагору. Координата максимального значення тиску визначається значенням

(40)

Для дослідження перепаду тиску в каналі в залежності від напівкута розкриття використано масштаб швидкості, який не залежить від α

(41)

й тоді число Рейнольдса в даному масштабі запишеться у вигляді

(42)

При $Re^* \rightarrow 0$ ми одержуємо залежність для повзучого плинину (рис. 4). Залежність $\Pi(Re^*)$ – лінійна. Найбільш сильна залежність від Re^* спостерігається при малих α , що пов'язане з більшими середніми швидкостями плинину при малих α та однакових Re^* . Функцію $\Pi(Re^*)$ можна розглядати, як безрозмірну витратно-напірну характеристику. В розмірному виді залежність від витрати на рис. 4 – залежність від Re^* буде квадратичною й в області визначення немонотонною. Дійсно, переходячи до розмірних величин, одержуємо залежність

(43)

яка дозволяє визначити величину витрати, котра забезпечує максимальне падіння тиску в каналі

(44)

Знайдено рішення задачі ламінарної конфузornoї течії в співвісному конічному каналі постійної ширини й побудовано витратно-напірну характеристику.

Рис. 4 Залежність $\Pi(\alpha, Re^*)$ у каналі із параметрами $\xi_0 = 10$ і $\xi_1 = 40$.

Отримане рішення також дозволило визначити величину числа Рейнольдса аж, до якого можна нехтувати інерційною складовою тиску при його обчисленні, як для дифузornoго, так і для конфузornoго ламінарного плинину в співвісному конічному каналі постійної ширини з точністю до $n\%$

(45)

а також значення числа Рейнольдса, починаючи з якого можна при розрахунку тиску нехтувати його дисипативною компонентою із точністю до $n\%$

(46)

У розділі також наведено додаткову верифікацію отриманого рішення. Спочатку рівняється строге рішення, отримане у розділі 2, зі східчастою апроксимацією співвісного конічного каналу із загальною вершиною границь співвісними конічними каналами постійної ширини. При 60 східцях максимальна відмінність у тисках $\sim 2\%$ для всього діапазону напівкутів розкриття. Східчаста апроксимація співвісного конічного каналу коаксіальними циліндричними каналами, як прийнято в цей час, дає відхилення $\sim 20\%$ для малих α й більш 100% для великих. Це відбувається тому що при апроксимації плинину в співвісних конічних каналах плинном у наборі коаксіальних циліндричних каналів плин, що розходитьса або сходиться, заміняється прямолінійним, й зрозуміло, чим більше α , тим менше точність цього наближення.

У четвертому розділі вирішено проблеми дифузornoго та конфузornoго ламінарного плинину в співвісних конічних каналах змінної ширини. Рішення отримане в тім же наближенні. На зовнішній границі, тобто при $\chi = 0$, залишається умова (34), а на внутрішній границі умова прилипання запишетьса у вигляді

$$v = 0, \chi = 1 + b(\xi - \xi_0). \quad (47)$$

Початковою умовою для безрозмірного тиску залишається умова (36), і далі із огляду на умову сталості витрати в поперечному перекрою одержуємо рішення задачі ламінарного дифузрного плин у вигляді:

(48)

(49)

(50)

(51)

Тут залежність $\tilde{h}(\xi) = 1 + b(\xi - \xi_0)$ визначає зміну безрозмірної ширини уздовж каналу. Якщо в (48)–(51) спрямувати $Re \rightarrow 0$, то буде одержано рішення задачі повзучого дифузрного плин у співвісному кінчному каналі із лінійно змінною уздовж течії шириною. Якщо ж покласти $b = 0$, можна прийти до раніше розглянутої задачі ламінарного дифузрного плин у співвісному кінчному каналі постійної ширини. Треба помітити, що при $\alpha = 90^\circ$ запишуться рішення задач повзучого та ламінарного розбіжного плин ньютонівської рідини між площиною й конусом із вершиною, що не лежить на площині, і віссю, перпендикулярною до неї.

Якщо при $b > 0$ спрямувати $\xi \rightarrow \infty$, то можна одержати, що перепад тиску в нескінченно довгому каналі має кінцеву величину та дорівнює

(52)

У розділі також представлені безрозмірні значення ξ , на яких відбувається 99 % всієї можливої зміни тиску, як для повзучого плин, так і для обчислень тиску із обліком характерної інерційної сили. Показано, що всі параметри плин визначаються полем швидкості в каналі. При позитивних значеннях b швидкість плин рідини уздовж каналу зменшується інтенсивніше, ніж у каналах постійної ширини (рис. 5), тому й модуль дисипативної складової тут менше, ніж у каналах постійної ширини (рис. 6). При негативних значеннях b швидкість уздовж каналу зменшується на меншу величину, а розподіл середньої швидкості по перетину в межах каналу може бути немонотонним. Тому і дисипативна складова тиску тут змінюється на більшу величину, чим у каналах постійної ширини (рис. 6).

Рис. 5. Розподіл v у співвісному кінчному каналі з розмірами: $\xi_0 = 10, \xi_1 = 40, \alpha = 15^\circ$; a – для $b = 0$: 1 – $\xi = 10$; 2 – $\xi = 25$; 3 – $\xi = 40$ і при $b = 0.087$: 1 – при $\xi = 10$, 4 – $\xi = 25$, 5 – $\xi = 40$; b – для $b = -0.017$: 1 – $\xi = 10$, 2 – $\xi = 25$, 3 – $\xi = 40$.

Рис. 6. Розподіли Π при $\xi_0 = 10, \xi_1 = 40, \alpha = 15^\circ$: a – без обліку інерційних сил – суцільна лінія, із обліком при $Re = 150$ – штрихова лінія. b – їхні відносні відхилення.

Для плинів при більших Re у каналах з $b > 0$ вплив характерної інерційної сили буде значніше, ніж у каналах постійної ширини, внаслідок більш інтенсивного зменшення середньої по перетину швидкості (рис. 6).

Плин на початку каналів із зменшуваною шириною також може відбуватися убік збільшення тиску, але внаслідок меншого зниження середньої швидкості уздовж плин, стає переважною дисипативна компонента тиску й плин відбувається вже убік його зменшення (рис. 6). А із деякої довжини каналу динамічна складова тиску також стає негативною, що приводить до більш інтенсив-

ного падіння тиску із урахуванням інерційної складової, ніж без неї.

Знайдено значення Re , починаючи з якого рідина поблизу входу в канал тече у бік збільшення тиску

(53)

Визначено діапазони зміни чисел Рейнольда, в яких можна нехтувати інерційною складовою тиску для дифузрного ламінарного плин у співвісному конічному каналі змінної ширини із точністю до 5 %

(54)

та дисипативною складовою

(55)

Досліджені також «безінерційні» плин, тобто течії, перепад тиску в яких визначається тільки дисипативною складовою.

Отримане рішення існує для всього можливого діапазону зміни параметра b , за винятком одного значення, при якому вираз (50) перетворюється в нескінченність. Це значення $b = 1/\xi_0$ відповідає дифузрному плин у співвісному конічному каналі із загальною вершиною границь. У розділі також отримано рішення цієї задачі в біконічних координатах

(56)

(57)

Розподіли безрозмірних швидкостей (22) та (56) які обчислені на координатних сферичних поверхнях перетину, відкладені в єдиному масштабі швидкості, показують дуже добрий збіг.

Порівняння розподілів безрозмірних тисків (23) і (57) також показує добру згоду між ними у всьому можливому діапазоні зміни параметрів задачі, що дає метод простого обчислення постійної відокремлення змінних λ у рішенні (22), (23), яке отримано в сферичних координатах

(58)

У розділі також отримано рішення задачі ламінарного плин у співвісному конічному конфузрорі змінної ширини. Визначені умови, котрі дозволяють нехтувати однією із складових тиску.

Проведено детальний аналіз отриманого рішення, розглянуто рішення задачі ламінарного конфузрорного плин у співвісному конічному каналі із загальною вершиною границь у біконічних координатах. Показано гарну згоду із рішенням, отриманим у сферичних координатах, і наведено простий спосіб обчислення змінної відокремлення для рішення в сферичних координатах.

Вивчені також витратно-напірні залежності як для дифузрорного:

(59)

так і для конфузрорного плин

(60)

Витратно-напірні залежності (59) і (60) при позитивних значеннях параметру b можуть мати немонотонну залежність від витрати Q (рис. 7, рис. 8). Тому при обчисленні потужності, необхідної для

підтримки ламінарного плин у каналі, інерційна складова враховується, якщо вона негативна й не враховується, якщо вона позитивна. Параметрами каналу являються $R_0 = 0.1$ м, $R_1 = 0.4$ м, $\alpha = 30^\circ$ у дифузорі та $\alpha = 60^\circ$ у конфузорі.

Рис. 7. $\Delta P(Q)$ у співвісному конічному дифузорі змінної уздовж плин у ширини залежно від параметра b . $\mu = 10$ Па·с, $\rho = 1200$ кг/м³.

Рис. 8. $\Delta P(Q)$ у співвісному конічному конфузорі змінної ширини залежно від b : $\mu = 10$ Па·с, $\rho = 1200$ кг/м³ 1 – із урахуванням інерційних властивостей плин у; 2 – дисипативна компонента; 3 – Re (31) – на вході в канал.

У п'ятому розділі вирішено задачі дифузорного та конфузорного ламінарного плин у секториальних каналах постійної й змінної ширини. Під шириною тут розуміється відстань між границями каналу. Дослідження плин у таких каналах дає як додаткові можливості аналізу плин у проточних каналах промислових апаратів, так і можливість застосування аналітичних методів для вивчення режимів плин у, котрі недоступні для цього в каналах більш складної геометрії.

Плин у зазначених каналах розглядається як апроксимація течії в співвісних конічних каналах, й інтерпретувати їх можна як розрізані уздовж твірної і розгорнуті на площину співвісні конічні канали, а розглядати його зручно в циліндричній системі координат (рис. 9). За допомогою рівняння нерозривності для практично цікавих випадків плин у показано, що $V_z = o(V_r)$, а використовуючи безрозмірні змінні та параметри:

Рис. 9. Геометрія секториального каналу.

(61)

де $V_{j0} = Q / (\pi r_0 h_0 \sin \alpha)$, можна записати математичне формулювання задачі, користуючись рівнянням руху у формі Озеена:

(62)

(63)

(64)

(65)

(66)

При рішенні задачі (62)–(66) в інерційному члені враховувалася тільки характерна інерційна сила після чого рішення можна записати у вигляді:

(67)

(68)

де

(69)

(70)

Якщо в (67)–(70) спрямувати $Re \rightarrow 0$, то можна одержити рішення задачі повзучого дифузорного плин у секториальному каналі змінної ширини. Якщо покласти $b = 0$, то одержимо рішення задачі ламінарного дифузорного плин у секториальному каналі постійної ширини.

Аналогічним способом вирішена задача ламінарного конфузорного плин у секториальному каналі змінної ширини.

Знайдено значення числа Рейнольдса, аж до якого можна нехтувати інерційними силами при

дифузорному плинні з точністю до 5 %. Цей критерій визначається виразами:

$$(71)$$

$$(72)$$

а силами тертя - нерівністю

$$(73)$$

Подібні результати отримані й для конфузорного плинну.

Для дифузорного плинну визначено витратно-напірна залежність, яка має вигляд:

$$(74)$$

де

Отримана витратно-напірна характеристика й для конфузорного плинну.

При порівнянні результатів, отриманих для плинну в співвісних конічних каналах і в секториальних апроксимуючих каналах виявлено, що добрий збіг рішень спостерігається не у всьому діапазоні зміни параметрів задачі, що видно по розподілу витратно-напірних характеристик (рис. 10). Це пов'язане з розходженням у швидкостях плинну рідини в секториальному та конічному каналах. Швидкість плинну в секториальному каналі менша внаслідок більшої площі поверхні поперечного перерізу каналу, що добре видно на прикладі конфузорного плинну (рис. 11).

Рис. 10. $\Delta P(Q)$ для дифузорного плинну рідини із параметрами: $\mu = 10 \text{ Па}\cdot\text{з}$; $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$: 1 – у співвісному конічному каналі; 2 – у секториальному каналі; 3 – значення Re^* (42); 4 – число Re (61).

Рис. 11. Розподіл v : 1 – у секториальному конфузорі при $b = 0.23$; 2 – у співвісному конічному конфузорі з $\alpha = 30^\circ$ і $b = 0.23$, $\chi' = \chi / (1 + bt)$.

Тому в цьому розділі був визначений критерій, при виконанні якого відносне відхилення між тисками, обчисленими в співвісному конічному каналі та у секториальному каналі, буде свідомо менше n %. Для дифузора і конфузора він виглядає однаково

$$(75)$$

На закінчення розділу наведено рішення завдання повзучого плинну рідини Оствальда - де Виля в співвісному конічному дифузорі:

$$(76)$$

$$(77)$$

де n - індекс плинну (показник нелінійності кривій плинну) і конфузозі:

$$(78)$$

$$(79)$$

Помітимо, що у виразах (76), (78) безрозмірна поперечна координата χ змінюється в межах $[0, 0.5]$.

У шостому розділі наведено дослідження розвитку ламінарного плинну в співвісному конічному дифузорі постійної ширини. Спочатку розглядається плин на початковій гідродинамічній ділянці в секториальному каналі сталої ширини. Рішення задачі проводиться в циліндричній системі координат, але при цьому вона розташована так, щоб радіальна вісь перебувала на серединній по-

верхні каналу. Використовуючи оцінки, виконані у розділі 5, записано наближену систему рівнянь, котра описує плин рідини на початковій гідродинамічній ділянці. Із допомогою методу лінеаризації Тарга було одержано рівняння, яке описує еволюцію однорідного профілю швидкості до розподілу швидкості в розвиненому плинні, котре у безрозмірних змінних та параметрах:

(80)

записується у вигляді

(81)

із граничними умовами:

(82)

(83)

(84)

За допомогою методу Лапласа-Карсона одержано рішення системи (81)-(84)

(85)

де v_k – корінь рівняння $\operatorname{tg} v = v$, а безрозмірний тиск $\Pi = [(P - P_0)h_2] / (4\mu V_0 r_0)$ визначається із виразу

(86)

Помітимо, що перший член у розподілі (85) збігається з (67) при $b = 0$ і записаному в масштабі швидкості (80)

(87)

Розподіл швидкості (87) є граничним розподілом, до якого буде наближатися до розподілу швидкості при збільшенні координати ξ для плинів із будь-якими можливими значеннями числа R . Вищесказане означає, що автотельний дифузійний плин рідини із розподілом швидкості (87) є аналогом сталого плину в прямолінійному каналі із постійним поперечним перерізом. Отже, незважаючи на те, що при ламінарному дифузійному плинні швидкість буде змінюватися уздовж каналу, можна вважати такий плин стабілізованим, оскільки до нього будуть прагнути всі ламінарні плини при будь-якому значенні числа R (рис. 12).

Рис. 12. Розподіл безрозмірної швидкості в співвісному кінціному дифузії: 1 – у випадку плину, що розвивається; 2 – у випадку стабілізованого плину. $a - R = 5$; $b - R = 50$.

У цьому розділі сформульована вище задача також найшла вирішення методом розкладання по власних функціях відповідної задачі Штурма-Ліувілля. Результати двох рішень добре погоджуються між собою (рис. 13).

Рис. 13. a – зміна безрозмірної швидкості на серединній поверхні каналу при $R = 5$: 1 – (87); 2 – залежність (85); 3 – залежність, отримана в методом власних функцій; b – відносне відхилення: 1 – швидкості (85) від швидкості (87) на серединній поверхні; 2 – швидкості на серединній поверхні (85) від розподілу, отриманому методом власних функцій.

Методом власних функцій вирішені також задачі розвитку ламінарного плину в співвісному кінціному дифузії постійної ширини та у секториальному дифузії із неоднорідним початковим розподілом швидкості, тобто для тих випадків, коли операційний метод рішення важко застосувати.

На основі виразів (85) та (87) відповідно до визначення Прандтля, одержано рівняння для визначення довжини початкової гідродинамічної ділянки:

(88)

Формули для наближеного обчислення безрозмірних значень координат стабілізації плин у довжини початкової гідродинамічної ділянки знаходяться вирішенням рівняння (88):

$$\xi_{н.г}=1+0.179R, \Delta\xi_{н.г}=0.179R, 0<R\leq 0.95, \quad (89)$$

$$\xi_{н.г}=1.354R^{0.5}, \Delta\xi_{н.г}=1.354R^{0.5}-1, 0.95<R\leq 170. \quad (90)$$

У випадку коли відома довжина початкової гідродинамічної ділянки, можна знайти входову поправку тиску при плині, що розвивається, інтегруванням першого члена під знаком інтеграла в (86):

(91)

де перший і другий члени є динамічною та дисипативною складовими тиску при стабілізованому плині (68) при $b=0$, котрі представлені у безрозмірних змінних (80). Третій член (91), по суті, також є дисипативним, але він визначає добавку до безрозмірного тиску в стабілізованому плині, котра виникає внаслідок непараболічності профілю швидкості в межах початкової гідродинамічної ділянки. Спростуючи перший підінтегральний вираз в (91), утримуючи тільки головні члени ряду та виконуючи інтегрування в зовнішньому інтегралі в межах від 1 до $\xi_{н.г}$, знаходимо вираз для обчислення безрозмірного тиску з обліком входової поправки

(92)

де безрозмірна входова поправка визначається співвідношеннями:

(93)

(94)

(95)

Вирази (92)-(95) дають добре наближення до (91) (рис. 14) й представляють простий аналітичний метод розрахунку перепаду тиску в співвісних конічних та секториальних дифузорах із обліком входових поправок тиску.

Рис. 14. Безрозмірний тиск при ламінарному плині в секториальному дифузорі постійної ширини: 1 – стабілізований плин 2 – наближення із використанням (92); 3 - розподіл (91) 4 – відносне відхилення 2 і 3. $a - R = 5$; $b - R = 50$.

У багатьох випадках промислового застосування співвісних конічних каналів рідина в них надходить із коаксіальних циліндричних каналів із неоднорідним профілем швидкості несиметричним щодо серединної поверхні каналу. Тому в даному розділі вирішено задачу розвитку ламінарного плин у секториальному дифузорі постійної ширини із неоднорідним початковим профілем швидкості.

Для цього було розглянуто плин у безрозмірних змінних, що використовувалися при рішенні задачі стабілізованого ламінарного плин у секториальному каналі. Математична постановка задачі аналогічна постановці (62)–(66) при $b=0$ та із неоднорідним початковим профілем $v=-8(\chi^7-\chi)/3$, $\xi=\xi_0$.

Рішення задачі виконано методом власних функцій. Помітимо, що при розкладанні в ряд по власних функціях істочникового члену рівняння було зроблене припущення про сталість градієнту тиску, котре не сильніше припущення про заздалегідь відомий перепад тиску в методі встановлення. Потім після знаходження розподілу швидкості, градієнт тиску визначався виходячи із балансу імпульсу для елементарної ділянки каналу. У підсумку одержуємо

(96)

(97)

де

Розподіл (96) дозволяє одержати простий вираз для оцінки координати стабілізації плин, для якого визначення Прандтля не є основою. Для цього зроблено припущення, що стабілізація плину наступає на відстані, де зникає вплив розподілу швидкості на вході в канал. Очевидно, це відбудеться там, де суми, які входять у вираз (96), стануть близькими до нуля. Виразом для наближеного обчислення безрозмірної координати стабілізації плин є рівняння:

(98)

яке дає цілком прийнятний результат при $Re_f \leq 250$ як при плинні із однорідним, так і із неоднорідним початковим розподілом швидкості. При визначенні тиску в співвісних конічних дифузорах, перед плинном, у якому рідина проходить через інші коаксіальні канали, можна в межах зміни числа Рейнольдса $0 \leq Re_f \leq 150$ використовувати вираз, отриманий для стабілізованого плин, тобто без обліку входних поправок.

Отримане рішення передбачає можливість відриву прилеглого шару на зовнішній границі дифузора при $Re_f \geq 600$ (рис. 15), тобто швидкість поблизу границі має негативне значення. Відрив прилеглого шару відбувається на координаті, де швидкість зсуву на границі дорівнює 0. Це дає можливість визначити величину ділянки каналу зі зворотним плинном (рис. 16).

Рис. 15. Розподіл безрозмірної швидкості рідини при $Re_f = 1000$: 1 – розподіл (96); 2 – сталий плин.

Рис. 16. Безрозмірна швидкість зрушення на границі $\chi = 0$ – суцільні лінії, і її модуля на границі $\chi = 1$ – штрихові лінії: 1 – стабілізований плин; 2 – плин, що розвивається, і $Re_f = 600$; 3 - $Re_f = 800$; 4 - $Re_f = 1000$; 5 - $Re_f = 2000$.

Прогнозування появи зворотних плинів дозволяє при конструюванні проточних частин апаратів хімічної технології та виборі режимів їхньої роботи уникнути застійних зон, тобто в цілому підвищити ефективність обладнання.

У сьомому розділі розглянуто ламінарний плин у співвісних конічних каналах із урахуванням різниці в кривизні твірних поверхонь. Спочатку вирішується задача повзучого плин у співвісному конічному дифузори сталої ширини. За допомогою оцінок, зроблених у розділі 1, рівняння руху в безрозмірних змінних, прийнятих у розділі 3, записується у вигляді

(99)

Умовами однозначності залишаються вирази (33)-(36). Помітимо, що у розділі 3 умова (33) частково враховує розходження в кривизні границь каналу.

Рішення даної задачі має вигляд:

(100)

(101)

(102)

де.

В отриманому рішенні при $\text{ctg}\alpha/\xi \ll 1$ виконується граничний перехід до рішення, знайденому для повзучого плинну в секториальному дифузори сталої ширини. Тому профіль швидкості при більших значеннях ξ , а також при $\alpha \rightarrow 90^\circ$, тобто коли різниця в кривизні границь каналу зникає буде прагнути до параболічного (37). У тих випадках, коли різниця в кривизні границь значна, профіль швидкості несиметричний (рис. 17).

Рис. 17. Безрозмірна швидкість в співвісному конічному дифузори постійної ширини поверхонь: 1 – для (100); 2 – для (37). $\alpha=15^\circ$.

Саме несиметричність профілю швидкості служить для вибору значимої величини критерію впливу кривизни границь каналу на профіль швидкості. Дійсно, в якості величини, котра характеризує несиметричність розподілу швидкості, можна вибрати відхилення поперечної координати максимальної швидкості від координати серединної поверхні, тобто від 0.5, оскільки для розподілу (37) максимум швидкості завжди буде перебувати на поверхні $\chi = 0.5$. Локалізація максимального значення швидкості (100) у поперечному розподілі визначиться виразом

(103)

Припустимо, що можна нехтувати несиметричністю (100) починаючи із координати ξ' , де розходження в поперечних координатах локалізації максимальних значень швидкості в розподілах (100) та (37) не перевищує 5 %, звідки одержуємо

$$\xi' = 2.22\text{ctg}\alpha. \quad (104)$$

У даному розділі також розглянуто задачі повзучого плинну в співвісних конічних каналах змінної ширини. У дифузорах зі зменшуваною уздовж плинну шириною, координата локалізації максимальної швидкості досягає серединної поверхні на меншій від входу відстані (рис. 18.). У каналах із шириною, що збільшується, розходження в радіусах кривизни уздовж плинну може зростати. У зв'язку з цим різниця між координатами локалізації максимальної швидкості та серединної поверхні може бути немонотонною, спочатку убувати, а потім зростати. Але їхнє відносне відхилення буде зменшуватися уздовж плинну.

Рис. 18. Локалізація максимальної в поперечному перерізі швидкості в дифузори з $\alpha=3^\circ$: 1 – $b=0.03492$; 2 – $b=0$; 3 – $b=-0.03492$.

У розділі також вирішена задача ламінарного плинну в співвісних конічних дифузорах постійної і змінної ширини та із врахуванням характерної інерційної сили. Вирішено задачу повзучого плинну в співвісних конічних конфузорах постійної та змінної ширини і задачу конфузороного плинну із врахуванням характерної інерційної сили в каналі постійної ширини. Розподіли тиску, отримані у всіх цих рішеннях, рівняються із розподілами тиску, знайденими для задач із частковим обліком кривизни границь й для завдань плинну в апроксимуючих секториальних каналах. Це порівняння показало, що отримані рішення дуже добре погоджуються із рішеннями, які знайдено для

задач із частковим обліком кривизни границь. Добрий збіг із рішеннями, які отримано для задач течій в секториальних каналах, спостерігається тільки при виконанні умови (75).

У восьмому розділі задачі ламінарного конвективного теплообміну в співвісних конічних каналах, на ділянках зі сталим плином, вирішено методом власних функцій. Отримано рівняння теплообміну в біконічній системі координат та зроблена оцінка його членів із урахуванням теплофізичних даних, наведених у першому розділі. Це дозволило нехтувати зміною кондуктивного теплового потоку уздовж плинину в порівнянні зі зміною конвективного теплового потоку, оскільки число $Re \gg 100$. Тоді формулювання задачі конвективного ламінарного осесиметричного теплообміну в співвісному конічному дифузори із функціонально заданими температурами границь каналу в безрозмірних змінних та параметрах

$$(105)$$

запишеться у вигляді:

$$(106)$$

$$\Theta = 0, 0 \leq \chi \leq 1, \xi = \xi_0; \quad (107)$$

$$\Theta = 1 + f_1(\xi), \chi = 0, \xi_0 < \xi \leq \xi_1; \quad (108)$$

$$\Theta = \Theta_2 + f_2(\xi), \chi = 1, \xi_0 < \xi \leq \xi_1, \quad (109)$$

де $a = \lambda / c\rho$ – коефіцієнт температуропровідності рідини, $f_1(\xi)$ і $f_2(\xi)$ – довільні кусково-диференційовані функції, які задовольняють умовам $f_1(\xi_0) = f_2(\xi_0) = 0$ і $|df_i/d\xi| < 1$ ($i = 1, 2$), T_1, T_2 – температури границь каналу на його вході, а V_0 – визначена в третьому розділі.

Рішення поставленої задачі визначається наступними виразами:

$$(110)$$

$$(111)$$

$$(112)$$

$$(113)$$

де

$(\partial f_2 / \partial \xi - \partial f_1 / \partial \xi) t / 2$, а ${}_1F_1(\alpha, \varepsilon; x)$ – вироджена гіпергеометрична функція. Число $Pe = Q / \pi a h$, і тоді $Pe_0 = Pe / (2 \xi_0 \sin \alpha - \cos \alpha)$.

Вираз (112) і (113) є двома наборами власних функцій відповідної задачі Штурма-Ліувілля. Власні значення μ_{1n} є корені рівняння

$$(114)$$

μ_{2n} – корені рівняння

$$(115)$$

Величина – квадрат норми власних функцій.

Необхідно відмітити, що рішення задачі конвективного теплообміну в співвісному конічному каналі при несиметричних граничних умовах завжди буде виражено у вигляді рядів по двох наборах власних функцій зі своїми власними значеннями, а при симетричних будь-то парні або непарні

граничні умови, рішення буде виражено через один набір власних функцій. Це зауваження повною мірою відноситься і до плоских каналів.

Отримане рішення дозволяє обчислити безрозмірну середньомасову температуру потоку

$$(116)$$

та місцеві числа Нусельта

$$(117)$$

Із (117) витікає, що при парних граничних умовах, тобто при $\Theta_1 = \Theta_2$, $Nu_2 = Nu_1$, а при непарних граничних умовах $\Theta_1 = -\Theta_2$, $Nu_2 = -Nu_1$.

У розділі проаналізовано рішення при парних граничних умовах із постійними температурами стінок ($\Theta_1 = \Theta_2 = 1$). Розглянуто розподіли безрозмірної температури, її середньомасового значення та розподіли чисел Нусельта для різних параметрів задачі. Показано, що значення граничного числа Нусельта в цьому випадку дорівнює $Nu_\infty = 3.77035$, що збігається зі значенням для плоского каналу. Визначено величину безрозмірної довжини початкової теплової ділянки, тобто ділянки, починаючи з якої числа Нусельта, у розглянутому випадку, змінюються менше, ніж на 1 %

$$(118)$$

Аналогічним способом отримано вираз для оцінки довжини термічної початкової ділянки при конфузормому плинні та теплообміні в конічній щілині постійної ширини:

$$(119).$$

При непарних граничних умовах ($\Theta_1 = -\Theta_2 = 1$) числа Nu_1 та Nu_2 асимптотично прагнуть до граничних значень $Nu_{1\infty} = -2$ і $Nu_{2\infty} = 2$. Проведені розрахунки показали, що $l_{н.т}$ в 2 – 3 рази більше для непарних граничних умов, чим для парних.

У розділі також розглянуто теплообмін у дифузормих та конфузормих плинах при граничних умовах першого роду із довільними постійними температурами і температурами, які задані різними лінійними залежностями. У цих випадках числа Nu_i перетерплюють розрив, коли середньомасова температура рівняється із температурою границі. Тому для аналізу теплопередачі в таких умовах нами запропоновано ввести модифіковані числа Нусельта

$$(120)$$

При граничних умовах заданих функціями $f_1(\xi) = b_1(\xi - \xi_0)$ і $f_2(\xi) = b_2(\xi - \xi_0)$ числа Nu_i^* прагнуть до своїх граничних залежностей

$$(121)$$

а середньомасова температура до залежності

$$(122)$$

Далі показано, що отримане рішення дозволяє аналізувати розподіл температур й параметрів, що залежать від її, для граничних умов, заданих досить складними кусково-диференційованими

функціями. Розглянуто теплообмін у розподільному каналі екструзійної головки із дорном, що містить термоактивний елемент (рис. 19), та без нього. Для аналізу теплообміну в таких умовах було розглянуто теплообмін у каналі, стінки якого не містять теплоізоляційних вставок і джерела або стоку теплоти, а розподіл температури стінок уздовж плинину задається виразами (108), (109), де $f_1(\xi) = -0.01(\xi - \xi_0)$ і $f_2(\xi) = -0.02(\xi - \xi_0)$ та в співвісному каналі, внутрішня стінка якого містить термоактивний елемент, укладений між теплоізоляційними вставками (рис. 19). Розподіл температури на зовнішній границі виберемо такий ж, як і в каналі без вставок, а на внутрішній границі розподіл буде визначатися виразами:

Рис. 19 Розподільне: 1 - екструдер, 2 - корпус екструзійної головки, 3 - дорн, 4 - теплоізолюючі прокладки, 5 - канал із теплоносієм, 6 - співвісний конічний канал, 7 - фільтрна плита.

(123)

де $a_1 = 3 \cdot 10^{-3}$, $a_2 = 0.24$, $a_3 = -0.3$, $a_4 = -5 \cdot 10^{-3}$, $\xi_0 = 20$, $\xi_1 = 100$, $\xi_2 = 45$, $\xi_3 = 50$, $\xi_4 = 80$, $\xi_5 = 85$.

Розподіл температури при плинні в каналі із однорідними границями показано на рис. 20а. Тепловий прилеглий шар більш інтенсивно розвивається біля зовнішньої стінки каналу внаслідок більшої початкової різниці температур. Тут же спостерігаються найбільші значення теплового потоку (рис. 21а). Числа Нусельта Nu_i мають немонотонний характер зміни уздовж каналу (рис. 21а). На початку плинину вони зменшуються із розвитком теплового прилеглому шару, потім на границі $\chi = 0$ значення Nu_1 трохи зростають внаслідок зменшення різниці $\bar{\Theta} - \Theta|_{\chi=0}$ (рис. 21а), а потім починають знижуватися через устанавлення теплообміну.

a
b

Рис. 20. Безрозмірна температура в каналі із параметрами: (а) – $\xi_0 = 20$, $Re = 10^4$, $\Theta_2 = 0$, $\alpha = 15^\circ$, зміна безрозмірних температур на границях визначається залежностями $f_1(\xi) = -0.01(\xi - \xi_0)$ при $\chi = 0$, а при $\chi = 1 - f_2(\xi) = -0.02(\xi - \xi_0)$; (б) – $\xi_0 = 20$, $Re = 10^4$, $\Theta_2 = 0$, $\alpha = 15^\circ$, зміна безрозмірної температури на границі $\chi = 0$ колишнє, а на $\chi = 1$ визначається вираженням (123).

При плинні в каналі, внутрішня границя якого містить теплоактивний елемент, укладений між теплоізолюючими вставками, зміна температури внутрішньої стінки на початку плинину незначна. Тому зміна температури потоку рідини відбувається, в основному, біля зовнішньої стінки каналу (рис. 20б). На цій стінці спостерігається й найбільше значення теплового потоку, які в міру розвитку теплового прилеглому шару зменшуються. Потім, зі зменшенням безрозмірної температури зовнішньої стінки уздовж плинину, відбувається обертання теплового потоку (рис. 21б).

Рис. 21. Розподіл (а, б) Nu_i^* – суцільні лінії й Nu_i – штрихові й штрихпунктирні лінії: (а) – для розподілу температури, представленого на рис. 20а; (б) – на рис. 20б; 1 – для $\chi = 0$, 2 – $\chi = 1$. Θ – $\bar{\Theta}$ і безрозмірних температур границь: пунктирна лінія для $\chi = 0$, штрихпунктирна для $\chi = 1$. 1 – для рис. 20а, 2 – для 20б.

На внутрішній стінці каналу в районі першої теплоізолюючої вставки відбувається значне підвищення температури границі (рис. 21в), тому тут значно зростає тепловий потік, що формує тепловий прилеглий шар у рідині (рис. 20б). У межах другої вставки відбувається різке зниження безрозмірної температури (але умова $|a_3| < 1$ виконується), внаслідок чого тепловий потік на границі різко зменшується й міняє знак (рис. 21б). Далі донизу по течії внаслідок перебудови поля

температури в рідині значення Nu_2^* зменшується по абсолютній величині.

У розглянутому випадку безрозмірна середньомасова температура зростає на початку плинку за рахунок теплообміну на зовнішній границі, але в районі між вставками $\bar{\Theta}$ підвищується, в основному, через теплообмін із внутрішньою стінкою. Далі за течією при зниженні безрозмірних температур на границях зменшується і $\bar{\Theta}$, але на відміну від попереднього варіанта значення $\bar{\Theta}$ залишаються, у межах каналу вище значень безрозмірних температур обох границь (рис. 21в). На виході з каналу $\bar{\Theta}$ є позитивна. Числа Nu_i на обох границях мають розриви на координатах, де $\bar{\Theta}$ рівняється із температурами стінок каналу (рис. 21).

У восьмому розділі також розглянуто рішення задачі ламінарного теплообміну в співвісному конічному конфузорі постійної ширини із функціонально заданими температурами границь каналу й урахуванням дисипації механічної енергії.

Задача в безрозмірних змінних:

(124)

формулюється у вигляді:

(125)

де $Re_0 = V_0 / ha$, $Br = \mu V_0^2 / [\lambda(T_1 - T_0)]$,

$$\Theta = 0, \quad 0 \leq \chi \leq 1, \quad s = 0, \quad (126)$$

$$\Theta = 1 + f_1(s), \quad \chi = 0, \quad 0 < s \leq \xi_1 - \xi_0; \quad (127)$$

$$\Theta = \Theta_2 + f_2(s), \quad \chi = 1, \quad 0 < s \leq \xi_1 - \xi_0, \quad (128)$$

де $f_i(s)$ – кусочно-диференціальні функції, що задовольняють умовам: $f_i(0) = 0, |df_i/ds| < 1$.

Рішення задачі (125)–(128) записується у вигляді:

(129)

(130)

де

Власні функції й власні числа визначаються виразами відповідно рівнянням (112)–(115).

Отримане рішення дозволяє обчислити безрозмірну середньомасову температуру потоку

(131)

а місцеві безрозмірні коефіцієнти тепловіддачі визначаються відповідно виразами (117) й (120).

У розділі також розглянуті задачі ламінарного теплообміну в співвісних конічних дифузорах постійної й змінної ширини із умовами третього роду на границях та із умовами першого роду й неоднорідним розподілом температури на вході в канал.

Розроблені методи рішення задач конвективного ламінарного теплообміну в співвісних конічних каналах і самих рішеннях використовуються для вибору оптимальних конструкційних параметрів технічного встаткування й вибору оптимальних технологічних параметрів його роботи.

У дев'ятому розділі проведено зіставлення рішень знайдених у дисертації з експеримента-

льними даними, отриманими проф. Яхно О.М. при дослідженні ламінарних плинів рідини в співвісних конічних каналах різної геометрії. Порівняння розрахункових значень перепаду тиску в каналах з експериментальними значеннями показало добру згоду (рис. 22), що підтверджує адекватність знайдених рішень.

Рис. 22. Порівняння експериментальних значень модуля перепаду тиску при ламінарному плинні в співвісному конічному каналі з розрахунковими значеннями які отримано в дисертації. 1 – течія у дифузорі при ширині яка зменшується уздовж каналу з параметрами $2\alpha = 58,13^\circ$, $\alpha - \alpha_1 = -0.77^\circ$, $R = 9.94 \times 10^{-2}$ м; $R_1 = 0.19$ м; 2 – плин у дифузорі при зменшуваній ширині уздовж каналу з параметрами $\alpha - \alpha_1 = -3.95^\circ$, $R_1 = 0.125$ м. 3 – плин у дифузорі при ширині, що збільшується, уздовж каналу з параметрами, $\alpha - \alpha_1 = 2.9^\circ$, $R_1 = 0.145$ м. Числа $Re_{кр}$ показують значення чисел Re_{π} аж до яких розрахунок ΔP без обліку інерційної сили не приведе до помилки більш ніж в 5%.

ВИСНОВКИ

У дисертації отримані науково обґрунтовані результати, які в сукупності вирішують важливу науково-прикладну проблему, що полягає в розробці теоретичних основ, постановці й рішенні задач плинну та теплообміну в співвісних конічних каналах хіміко-технологічного обладнання, а також створенні інженерних методів розрахунку таких течій у промислових процесах. Проведене систематичне теоретичне дослідження ламінарного плинну й конвективного ламінарного теплообміну в'язких рідин у співвісних конічних каналах.

Наукові результати, які отримано в роботі, зводяться до наступних:

1. Виконано класифікацію співвісних конічних каналів та отримана система гідродинамічних рівнянь у напругах, що описує ламінарний плин у біконічній системі координат, а потім цю систему спрощено для опису плинну рідини в практично важливих випадках.
2. Отримано й досліджено аналітичні рішення задач ламінарного дифузорного та конфузорного плинну в співвісних конічних каналах із загальною вершиною границь та урахуванням характерної інерційної сили, які включають і рішення задач повзучого плинну; розроблено інженерний метод розрахунку перепаду тиску й обчислення епюр швидкостей для таких плиннів; визначено діапазони зміни чисел Рейнольдса в межах, зміни яких, можна, при розрахунку перепаду тиску в зазначених каналах, нехтувати або інерційною, або дисипативною складовими тиску.
3. Отримано й досліджено аналітичні рішення задач повзучого плинну та ламінарного плинну із урахуванням характерної інерційної сили в співвісних конічних дифузорах та конфузорах постійної ширини, розроблено інженерний метод розрахунку перепаду тиску й обчислення епюр швидкостей для таких плиннів; визначено умови, при яких можна нехтувати при обчисленні тиску його дисипативною або динамічною складовою при ламінарних дифузорних і конфузорних плинах у співвісних каналах постійної ширини.
4. Отримано й досліджено аналітичні рішення задач повзучого плинну та ламінарного плинну із урахуванням характерної інерційної сили в співвісних конічних конфузорах і дифузорах змінної ширини, розроблено інженерний метод розрахунку перепаду тиску й обчислення епюр швидкостей для таких плиннів; визначено умови, при яких можна нехтувати при обчисленні тиску його ди-

сипативною або динамічною складовою при ламінарних дифузорних і конфузорних плинах у співвісних каналах змінної ширини.

5. Отримано й досліджено аналітичні рішення задач повзучого плинину та ламінарного плинину ньютонівської та псевдопластичної рідини із урахуванням характерної інерційної сили в секториальних дифузорах і конфузорах сталої та змінної ширини, розроблено інженерний метод розрахунку перепаду тиску й обчислення епюр швидкостей для таких плиннів; визначені умови, при яких можна нехтувати при обчисленні тиску його дисипативною або динамічною складовою при ламінарних дифузорних і конфузорних плинах у таких секториальних каналах для ньютонівської рідини.

6. Вирішено й досліджено задачу розвитку ламінарного плинину в співвісному конічному дифузори сталої ширини із однорідним та неоднорідним початковим розподілом швидкості.

7. Отримано вирази для обчислення довжини початкової гідродинамічної ділянки в співвісному конічному дифузори постійної ширини; отримано вирази для визначення входових виправлень тиску в співвісних конічних дифузорах і представлено інженерний метод їхнього обчислення; запропоновано оригінальний спосіб, відмінний від способу Прандтля, визначення довжини початкової гідродинамічної ділянки при розвитку ламінарного плинину.

8. Отримано й досліджено рішення задач повзучого плинину та ламінарного плинину із урахуванням характерної інерційної сили в співвісних конічних конфузорах і дифузорах постійної та змінної ширини й із урахуванням розходження в кривизні їхніх поверхонь;

9. Вирішено й досліджено задачі ламінарного конвективного теплообміну при дифузорному та конфузорному плинні в співвісних конічних каналах сталої ширини із однорідним та неоднорідним початковим розподілом температури і умовами першого роду на стінках; отримані вирази для визначення довжини початкових термічних ділянок при ламінарному теплообміні у цих каналах.

10. Вирішено й досліджено задачі ламінарного конвективного теплообміну при дифузорному та конфузорному плинні в співвісних конічних каналах сталої ширини із температурними умовами третього роду на стінках.

11. Вирішено й досліджено задачу ламінарного конвективного теплообміну в співвісному конічному дифузори сталої ширини із кусково-диференційованим розподілом температури стінок каналу, а також задачі ламінарного конвективного теплообміну при дифузорному та конфузорному плинні в співвісних конічних каналах постійної ширини при лінійній зміні температури на стінках каналу.

12. Вирішено й досліджено задача ламінарного конвективного теплообміну в співвісному конічному конфузори сталої ширини із умовами першого роду на стінках та урахуванням теплоти дисипації.

13. Результати досліджень використовуються для аналізу та розрахунку сталої течії та теплообміну у коаксіальних конічних каналах при створенні нових процесів та при розробці конструкцій

апаратів хімічної технології на ЗАТ «УкрНДІхіммаш».

14. Розроблені наукові положення використовуються у курсах лекцій на кафедрі інтегрованих технологій, процесів та апаратів НТУ «ХП» при викладанні дисциплін при викладанні дисциплін «Гідрогазодинаміка», «Теплофізика», «Процеси та апарати хімічних виробництв», «Типові технологічні об'єкти та процеси виробництв», «Процеси та апарати хімічних технологій» та «Процеси та апарати харчових виробництв», що також підтверджено довідкою про використання.

СПИСОК РОБІТ ОПУБЛІКОВАНИХ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ульєв Л.М. Ламинарные течения в соосных конических каналах (монографія у 2х томах): / Под ред. Л.Л. Товажнянского. – Харків. Вид-во НТУ «ХП». Т. 1. 2006. – 660 с.– Бібліогр.: с. 651–659.
2. Ульєв Л.М. Ламинарные течения в соосных конических каналах (монографія у 2х томах): / Под ред. Л.Л. Товажнянского. – Харків. Вид-во НТУ «ХП». Т. 2.– 2006. 760 с, (661–1420). – Бібліогр.: с. 1400–1415.
3. Ульєв Л.М. Медленные течения в коаксиальных конических каналах. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. –Харьков: ХГПУ. 1997. –Вып. 7. Ч. 2. –С. 22–31.
4. Ульєв Л.М. Медленные течения между соосными коническими поверхностями // Инженерно–физический журнал. – Минск: –1998. –Т. 71, –№ 6. –С. 1092–1098.
5. Ульєв Л.М. Теплообмен при медленном диффузорном течении в кольцевых конических каналах переменной ширины // Сборник научных трудов Харьковского государственного политехнического университета. –Харьков: ХГПУ. –1998. –Вып.6. Част 3. –С. 509–513.
6. Ульєв Л.М. Медленные течения в коаксиальных конических щелях переменной ширины // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. –Харьков: ХГПУ 1999. – Випуск 34. –С. 3–8.
7. Ульєв Л.М. Ламинарный теплообмен для четных граничных условий первого рода при диффузорном течении в коническом зазоре // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. –Харьков: ХГПУ –1999. –Випуск 47. –С. 7–15.
8. Ульєв Л.М. Теплообмен при медленном диффузорном течении в коническом зазоре с граничными условиями первого рода // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. –Харьков: ХГПУ –1999. –Випуск 56. –С. 37–52.
9. Ульєв Л.М. Теплообмен при медленном диффузорном течении в коаксиальном коническом канале с переменной температурой внутренней стенки канала // Сборник научных трудов Государственного аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». Харьков: «ХАИ». –1999. –Вып. 9. –С. 165–178.
10. Ульєв Л.М. Теплообмен при медленном течении в коаксиальных конических конфузорах для граничных условий первого рода // Інтегровані технології та енергозбереження. –Харків: ХДПУ – 1999. –№ 2. –С. 40–52.

11. Ульев Л.М. Ламинарный теплообмен при диффузорном течении в соосных конических зазорах для граничных условий первого рода с линейным изменением температуры стенок вдоль течения // *Інтегровані технології та енергозбереження*. –Харків: ХДПУ –1999. –№4. –С. 45–59.
12. Ульев Л.М. Ламинарный теплообмен для нечетных граничных условий первого рода при диффузорном течении в коническом зазоре // *Сборник научных трудов Харьковского государственного политехнического университета*. Харьков: ХГПУ. 1999. Вып.7. Ч.4 –С. 110–118.
13. Ульев Л.М. Развитие ламинарного диффузорного течения в конической щели постоянной ширины // *Інтегровані технології та енергозбереження*. –Харків: ХДПУ –2000. –№1. –С. 57–69.
14. Ульев Л.М. Течение и теплообмен в кольцевых конических каналах. Аппроксимация плоским каналом // *Інтегровані технології та енергозбереження*. –Харків: ХДПУ –2000. –№ 2. –С. 55–64.
15. Ульев Л.М. Теплообмен при медленном диффузорном течении жидкости в коаксиальных конических каналах // *Теоретические основы химической технологии*. –Москва: –2000. –Т. 34, №1. –С. 16–24.
16. Ульев Л.М. Длина участка термической стабилизации при ламинарном теплообмене в соосных конических каналах постоянной ширины // *Вестник Харьковского государственного политехнического университета*. –Харьков: ХГПУ . –2000. –Выпуск 98. –С. 137–141.
17. Ульев Л.М. Решение задачи ламинарного теплообмена для диффузорного течения в соосных конических каналах при произвольном непрерывном изменении температуры стенок вдоль течения // *Вестник Харьковского государственного политехнического университета*. –Харьков: ХГПУ –2000. –Выпуск 89. –С. 81–88.
18. Ульев Л.М. Теплообмен при медленном диффузорном течении в конической щели для граничных условий первого рода и произвольном распределении температуры на входе // *Вестник Харьковского государственного политехнического университета*. –Харьков: ХГПУ . –2000. –Выпуск 105. –С. 113–124.
19. Ульев Л.М. Ламинарный теплообмен при расходящемся течении в коническом зазоре с кусочно–дифференцируемым распределением температуры на границах // *Інтегровані технології та енергозбереження*. –Харків: ХДПУ. –2000. –№3. –С. 20–36.
20. Ульев Л.М. Решение задачи ламинарного течения между коническими поверхностями с общей вершиной при частичном учете инерционных свойств // *Вістник НТУ «ХП»*. Харьков: НТУ «ХП». –2001. –№ 3. – С. 224–235.
21. Ульев Л.М. Влияние кривизны границ на ламинарное установившееся течение в кольцевом коническом канале постоянной ширины // *Інтегровані технології та енергозбереження*. –Харків: НТУ “ХП”. –2001. –№ 1. –С. 34–44.
22. Ульев Л.М. Ламинарный теплообмен при диффузорном течении жидкости в коаксиальном коническом канале с переменной температурой внутренней стенки // *Теоретические основы химической технологии*. –Москва: –2001. –Т. 35, № 1. –С. 31–41.

23. Ульев Л.М. Ламинарный теплообмен при диффузорном течении в соосном коническом канале в случае граничных условий первого рода // Инженерно-физический журнал. –Минск: –2001. –Т. 74, № 1. –С. 21–26.
24. Ульев Л.М. Теплообмен при медленном конфузорном течении в соосных конических каналах постоянной ширины для граничных условий первого рода и с учетом диссипации механической энергии // Інтегровані технології та енергозбереження. –Харків: НТУ «ХПІ». –2001. –№ 3. –С. 64–81.
25. Ульев Л.М. Приближенное решение задачи ламинарного течения аномально вязкой жидкости в кольцевом коническом конфузоре // Механика та машинобудування. –Харків: НТУ «ХПІ». –2001. –№ 1, 2. –С. 13–23.
26. Ульев Л.М. Приближенное решение задачи ламинарного диффузорного течения аномально вязкой жидкости в кольцевом коническом канале // Вістник НТУ «ХПІ». Харків: НТУ «ХПІ». 2001. № 20. –С. 107–116.
27. Ульев Л.М. Медленные конфузорные течения в соосных конических каналах переменной ширины // Вістник НТУ «ХПІ». Харків: НТУ «ХПІ». 2002. № 3. –С. 122–130.
28. Ульев Л.М. Решение задачи ламинарного диффузорного течения в соосном коническом канале постоянной ширины с частичным учетом инерционных свойств // Вістник НТУ «ХПІ». Харків: НТУ «ХПІ». 2002. № 6. –С. 66–71.
29. Ульев Л.М. Влияние инерционных свойств на распределение давления при ламинарном конфузорном течении в соосном коническом канале постоянной ширины // Вістник НТУ «ХПІ». Харків: НТУ «ХПІ». 2002. Вип. 9. Т. 1. –С. 88–94.
30. Ульев Л.М. Ламинарное диффузорное течение в соосном коническом канале переменной ширины с частичным учетом сил инерции // Вістник НТУ «ХПІ». Харків: НТУ «ХПІ». 2003. Вип. 17. –С. 143–153.
31. Ульев Л.М. Развитие ламинарного диффузионного течения в соосных конических каналах постоянной ширины // Інтегровані технології та енергозбереження. –Харків: 2003, № 2. С. 47–57.
32. Ульев Л.М. Ламинарное диффузорное течение в секториальном канале постоянной ширины с частичным учетом инерциальных свойств // Вістник НТУ «ХПІ». Харків: НТУ «ХПІ». 2003. Вип. 11. Т.2. –С. 122–131.
33. Ульев Л.М. Длина начального гидродинамического участка при ламинарном диффузорном течении в соосных конических каналах постоянной ширины // Інтегровані технології та енергозбереження. –Харків: 2003. №4. –С. 56–64.
34. Ульев Л.М. Диапазон чисел Рейнольдса, в котором ламинарное диффузорное течение в соосном коническом канале с линейно меняющейся шириной можно считать безинерционным // Вістник НТУ «ХПІ». Харків: НТУ «ХПІ». 2003, № 13. –С. 103–111.
35. Ульев Л.М. Особенности ламинарного течения в секториальном диффузоре с переменной ши-

- риной вдоль канала // Интегровані технології та енергозбереження. –Харків:2004, № 1. –С. 25–35.
36. Ульев Л.М. Приближенное решение задачи ламинарного течения в соосном коническом диффузоре с общей вершиной границ // Интегровані технології та енергозбереження. –Харків:2004, № 2. –С. 60–65.
37. Ульев Л.М. Приближенное решение задачи ламинарного течения в соосном коническом конфузоре с общей вершиной его границ // Интегровані технології та енергозбереження. –Харків: НТУ «ХПИ». –2004, № 3. –С. 30–38.
38. Ульев Л.М. Система гидродинамических уравнений, описывающих ламинарное течение в соосных конических каналах постоянной ширины // Интегровані технології та енергозбереження. –Харків: НТУ «ХПИ». –2005. –№ 1. –С. 9–20.
39. Ульев Л.М. Классификация соосных конических каналов // Интегровані технології та енергозбереження. –Харків: НТУ «ХПИ». –2005. –№ 2. –С. 55–62.
40. Ульев Л.М. Ламинарное конфузорное течение в соосном коническом канале переменной ширины с частичным учетом сил инерции // Интегровані технології та енергозбереження. –Харків: НТУ «ХПИ». –2005. –№ 3. –С. 29–36.
41. Ульев Л.М. Оценка перепада давления на начальном гидродинамическом участке ламинарного течения в соосном коническом диффузоре // Интегровані технології та енергозбереження. –Харків: НТУ «ХПИ». –2005. –№ 4. –С. 11–28.
42. Ульев Л.М. Развитие ламинарного диффузорного течения в соосном коническом канале с неоднородным начальным профилем скорости // Интегровані технології та енергозбереження. –Харків: НТУ «ХПИ». –2006. –№ 2. –С. 8–29.
43. Ульев Л.М. Медленные течения между соосными коническими поверхностями. I. Конусы с общей вершиной // International Meeting on Information Technology.–Kharkiv. –1997. Vol. 5. –P. 438–440.
44. Ульев Л.М. Медленные течения между соосными коническими поверхностями. II. Конусы не имеющие общей вершины // International Meeting on Information Technology –Kharkiv. –1997. Vol. 5–P. 441–443.
45. Ульев Л.М. Теплообмен при медленном диффузорном течении в коаксиальных конических зазорах для условий первого рода с заданным изменением температуры стенок вдоль течения // 4й Минский Международный форум по тепло–и массообмену. Тепломассообмен в реологических системах. – Минск: –2000. – Т. 7. –С. 204–213.
46. Ulyev L.M. Laminar heat transfer in the constant width coaxial conic channels // 14th International Congress of Chemical and Process Engineering. Summaries. Mechanical and Heat Transfer. Processes and Equipment. Praha. 2000. Vol. 3. P. 197. (Paper No. P1. 129. P.20).
47. Ulyev L.M. Solution of Slow Steady State Flow Problem in a Constant Width Channel with Taking into account curvature distinction of its Boundaries // 15th International Congress of Chemical and

Process Engineering, Summaries. Fluid Flow. Multiphase System. –Praha. –2002. – Vol. 3. –P. 178-179. (Paper No. P5. 102. P. 11).

48. Ulyev L.M. Hydrodynamic entrance length with the laminar diffuser flow in the constant width conic channel // 16th International Congress of Chemical and Process Engineering. Summaries. Hydrodynamic Process. –Praha. Czech Republic. 2004. –Vol. 3. –P. 1126-1127. (Paper No. 0587).

АНОТАЦІЯ

Ульєв Л.М. Ламінарні течії й теплообмін у співвісних конічних каналах хіміко-технологічного обладнання. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.17.08 - процеси та устаткування хімічної технології. - Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2007.

Дисертація присвячена розробці наукових основ і створенню науково обґрунтованих інженерних методів розрахунку гідромеханічних і теплообмінних процесів у ламінарних плинах рідких систем у співвісних конічних каналах хіміко-технологічного обладнання. Для цього виконана класифікація співвісних конічних каналів.

У роботі вирішено проблему повзучого плинину й плинину з характерною інерційною силою в співвісних конічних каналах. Задачі дифузornoї та конфузornoї течій в співвісних конічних каналах із загальною вершиною границь вирішені в сферичних координатах, а в співвісних конічних каналах постійної й змінної ширини з рознесеними вершинами границь вирішені в біконічних координатах, для яких отримані рівняння рухові рідини, записані в напругах.

Вирішено проблему ламінарного плинину в'язкої та аномально в'язкої рідини в апроксимуючих секторіальних каналах і визначені умови згоди рішень у секторіальних і співвісних конічних каналах.

Вирішено завдання розвитку ламінарних течій у співвісних конічних дифузорах, визначена довжина початкової гідродинамічної ділянки й входове виправлення тиску. Знайдено умови виникнення зон зі зворотним плинном.

Розроблено науково обґрунтовані інженерні методи розрахунку основних параметрів ламінарних течій в співвісних конічних каналах хіміко-технологічного обладнання.

Вирішено проблему ламінарного конвективного теплообміну в співвісних конічних каналах із граничними умовами, заданими кусково-диференційованими функціями й умовами третього роду. Для умов першого роду знайдено прості вирази для інженерного розрахунку довжини початкової термічної ділянки.

Відмінною рисою отриманих рішень є їхнє розкладання по двох різних наборах власних функцій, кожен з яких має свої власні числа.

Ключові слова: гідромеханічні процеси, теплообмін у рідких системах, формуюче встаткування, розподіл тиску, співвісний конічний канал, ламінарна течія, початкова гідродинамічна ді-

лянка, конвективний теплообмін, внутрішні джерела теплоти, початкова тепла ділянка.

АННОТАЦИЯ

Ульев Л.М. Ламинарные течения и теплообмен в соосных конических каналах химико-технологического оборудования. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2007.

Диссертация посвящена разработке научных основ и созданию научно обоснованных инженерных методов расчета гидромеханических и теплообменных процессов в ламинарных течениях жидких систем в соосных конических каналах химико-технологического оборудования. Для этого выполнена классификация соосных конических каналов.

Сформулирована и решена проблема конфузорного и диффузорного ламинарных течений в соосных конических каналах с общей вершиной границ в сферической системе координат. Проблема конфузорного и диффузорного ламинарных течений в соосных конических каналах с разнесенными вершинами решена в биконической системе координат, для которой получены уравнения движения жидкости, записанные в напряжениях.

Определены диапазоны изменения чисел Рейнольдса, в которых можно пренебречь либо динамической, либо диссипативной составляющей давления при его вычислении. Получены научно обоснованные методы расчета поля давления и эпюр скорости для ламинарных течений вязких жидкостей в соосных конических каналах.

Решены задачи ламинарных диффузорного и конфузорного течения в секториальных каналах постоянной и переменной ширины, течением в которых можно аппроксимировать течение в соосных конических каналах. Определены условия согласия решений в секториальных и соосных конических каналах.

Решена проблема ламинарного конфузорного и диффузорного течения аномально вязких жидкостей в секториальных каналах. Получены аналитические выражения для определения перепада давления и распределения скорости в таких течениях.

Решена проблема развития ламинарных течений в соосных конических диффузорах как для однородного начального распределения скорости, так и для неоднородного. Получены научно обоснованные методы расчета длины начального гидродинамического участка и входовой поправки давления. Найдены условия возникновения зон с обратным течением. Получены условия, при выполнении которых входовой поправкой при расчете перепада давления можно пренебречь.

Исследовано влияние кривизны границ на течение жидкости в соосных конических каналах. Получен критерий, при выполнении которого, можно пренебрегать различием в кривизне границ соосных конических каналов без общей вершины границ.

Решена проблема ламинарного конвективного теплообмена как в соосных конических конфузорах, так и диффузорах с распределением температуры на границах канала, заданным кусочно-дифференцируемыми функциями. Задачи решены как для однородного начального распределения температуры, так и для неоднородного распределения. Решена задача ламинарного конвективного теплообмена для ламинарного течения вязкой жидкости в соосном коническом конфузоре с учетом внутренних источников теплоты. Отличительной особенностью полученных решений является их разложение по двум различным наборам собственных функций.

Для условий первого рода найдены простые выражения для расчета длины начального термического участка.

Ключевые слова: гидромеханические процессы, поле давления, теплообмен в жидких системах, формирующее оборудование, соосный конический канал, ламинарное течение, начальный гидродинамический участок, конвективный теплообмен, внутренние источники теплоты, начальный тепловой участок.

SUMMARY

Ulyev L.M. Laminar flow and heat transfer in coaxial conic channels of chemical engineering equipment. – Manuscript. Thesis for the doctor's degree of engineering science in specialty 05.17.08 – process and equipment of chemical technology. – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” Kharkiv, 2007.

The thesis is devoted to development of scientific bases and engineer computing methods creation for hydrodynamic and heat processes in the laminar flows of liquid systems in the coaxial conic channels of chemical engineering equipment.

The theoretical solutions of creeping flow and flow with the distinctive inertial force problems in the coaxial conic channels were found and studied. The problems of diffuser and confuser flows in the coaxial conic channels with common vertex of boundaries were solved in the spherical coordinates, and in the coaxial conic channels with constant and variable width and spaced vertexes were solved in the biconical coordinates. The hydrodynamic equations in tensions were received in biconical coordinates.

The problems of the Newtonian and power liquid laminar flows in approximate sector channels were solved and the condition of proximity of solutions in sector and coaxial conic channels were determined.

The problem of the laminar flow development in coaxial conic diffuser were solved, the entrance length and entrance correction of pressure were founded. The conditions for contraflow appearance were founded. The boundary curves influence on the flow was investigation in the dissertation.

The laminar convective heat transfer problems in the coaxial conic channels were solved for piecewise differentiable boundary conditions and boundary conditions of third kind were solved and investigated. The problem of internal heat sources in confuser laminar flow was investigated. The

expressions for thermal entrance length calculates were founded. The distinctive feature of received solutions is their expansion on two set eigen-functions.

Key words: hydromechanics processes, heat transfer in liquid systems, molding equipment, coaxial conic channel, laminar flow, pressure field, hydrodynamic entrance length, convective heat transfer, internal heat sources, thermal entrance length.