

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

БІЛЕЦЬКИЙ ЕДУАРД ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 643.33:547.128

**ЗАКОНОМІРНОСТІ РЕОДИНАМІКИ ТА ТЕПЛОБМІНУ НЕНЬЮТОНІВСЬКИХ РІДИН
У КАНАЛАХ
ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ**

Спеціальність 05.17.08 – Процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат

Дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор
Товажнянський Леонід Леонідович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», ректор
завідувач кафедри інтегрованих технологій,
процесів та апаратів

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Атаманюк Володимир Михайлович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
завідувач кафедри хімічної інженерії

доктор технічних наук, професор
Склябінський Всеволод Іванович,
Сумський державний університет,
завідувач кафедри обладнання хімічних
та нафтопереробних виробництв

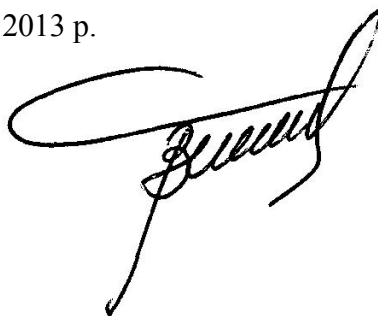
доктор технічних наук, професор
Потапов Володимир Олексійович,
Харківський державний університет
харчування та торгівлі,
завідувач кафедри холодильної та торговельної техніки

Захист відбудеться «25» жовтня 2013 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.64.050.05 Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

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

Автореферат розісланий «24» вересня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.К. Тимченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Обмеженість природних енергоресурсів України викликає гостру потребу у створенні нових енерго- та ресурсозберігаючих технологій та розробці екологічно безпечного устаткування. До теперішнього часу виготовлення значної частини продукції на вітчизняних виробництвах супроводжується підвищеними витратами енергоресурсів, вартість яких останнім часом має стійку тенденцію до зростання. У цих умовах розробка та оптимізація хіміко-технологічного обладнання з підвищеним енергозбереженням є одним із пріоритетних напрямків в економіці України.

Основні процеси хімічної промисловості пов'язані з рухом складних дисперсних систем, більшість з яких є неньютонівськими рідинами. Течії рідин із малими значеннями в'язкості знаходять застосування, як проміжні теплоносії, в оболонках теплових апаратів. Як правило, рух рідини з великою в'язкістю відбувається у каналах робочих камер різноманітних хіміко-технологічних машин і залежить від багатьох параметрів, а саме: тиску, витрати, швидкості зрушення, температури, ступеня перемішування, дисперсності та ін. Таким чином, знання структури та режимів течії відіграє важливу роль в організації технологічних процесів і дозволяє впливати на їх енергоефективність шляхом встановлення раціональних значень гідродинамічних, теплових, масообмінних та інших показників.

У хімічній та харчовій технологіях відома велика кількість феноменологічних реологічних моделей, які описують особливості нелінійних матеріалів за допомогою різноманітних рівнянь стану. Більшість з них базуються на експериментальних дослідженнях і мають наявність різних залежностей між напруженням зрушення, швидкістю зрушення, температурою (рідше тиском) і використовуються для опису окремих матеріалів. Крім цього, складна залежність реологічних моделей, не завжди враховує всі функціональні зв'язки між основними параметрами процесу, чим суттєво ускладнює розробку нових енергоефективних технологій і потребує значних фінансових і часових витрат. З цих причин актуальною проблемою є створення розвинених науково обґрунтованих підходів щодо вивчення та опису течії нелінійних матеріалів у каналах складної геометрії шляхом розроблення теоретично обґрунтованих тривимірних математичних моделей течії неньютонівської рідини у каналах базової геометрії для подальшого отримання найбільш оптимальних та енергоефективних конструктивно-технологічних показників процесів та апаратів у хімічній та харчовій галузях. Вирішення зазначеної проблеми визначило напрямок дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота спрямована на реалізацію задач, сформульованих у «Комплексній державній програмі енергозбереження України» та виконувалася відповідно до тематичних планів наукових досліджень кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів НТУ «ХПІ» у межах держбюджетної НДР МОН України «Створення теоретичних основ логістики енергоефективності та ресурсозбереження для забезпечення енергетичної та екологічної безпеки промислових комплексів з хіміко-технологічними системами» (ДР № 0112U000409) та госпдоговірної теми «Розробка та впровадження сучасних систем обігріву технологічного обладнання з використанням нетрадиційних теплоносіїв» (ДР № 0113U000458) на замовлення ТОВ «Золочівське ХПІ», м. Харків, в яких здобувач був відповідальним виконавцем.

Мета та задачі дослідження. Метою досліджень є встановлення макродинамічних та макрокінетичних закономірностей реодинаміки та теплообміну не ньютонів

ських рідин у каналах базової геометрії апаратів хімічної та харчової технологій для подальшого удосконалення практичних методів розрахунку та конструювання технологічного обладнання.

Для досягнення мети досліджень, вирішуються наступні задачі:

- проаналізувати сучасний стан досліджень течії в'язких матеріалів та обґрунтувати доцільність удосконалення опису процесів реодинаміки та теплообміну в каналах хіміко-технологічного обладнання;
- розвинути теоретичні методи моделювання течії неньютонівських рідин на підставі використання принципу суперпозиції течій меншої розмірності, граничних умов та методу аналогій;
- обґрунтувати та розробити математичну модель в'язкопластичної течії в каналах прямокутної та пласкої форм хіміко-технологічного обладнання;
- проаналізувати і узагальнити існуючі різноманітні феноменологічні моделі матеріалів, які мають залежність в'язкості від швидкості зрушення, для визначення основних макродинамічних та макрокінетичних характеристик течії вказаних рідин;
- створити математичну модель течії ступеневої рідини з визначенням величин гідравлічних опорів у широкому діапазоні зміни числа Рейнольдса, що є характерним для хімічної та харчової технології;
- розвинути теоретичні основи теплообміну при течії рідини, яка залежить від швидкості зрушення та в'язкопластичної рідини в трубах та каналах;
- створити науково обґрунтовані інженерні методики розрахунку гідродинамічних і теплообмінних показників течії рідини в каналі, в'язкість якої залежить від швидкості зрушення, в'язкопластичної та ступеневої рідин;
- провести експериментальне підтвердження вірогідності отриманих рівнянь для визначення адекватності основних макродинамічних і макрокінетичних параметрів течії неньютонівських матеріалів у каналах, які є визначальними чинниками при проведенні хіміко-технологічних процесів;
- впровадити результати досліджень при проектуванні та конструюванні обладнання хімічних та харчових технологій у виробничий та навчальний процес.

Об'єкт дослідження – процеси реодинаміки та теплообміну неньютонівських рідин у каналах базової геометрії.

Предмет дослідження – макродинамічні та макрокінетичні характеристики течії рідин, в'язкість яких залежить від швидкості зрушення, в'язкопластичних та ступених рідин у пласких та прямокутних каналах хіміко-технологічного обладнання.

Методи дослідження – теоретичні положення дисертації ґрунтуються на фундаментальних положеннях прикладної реології, теплообміну та гідродинаміки з використанням методів симетрії, диференціального й інтегрального числення. При отриманні визначальних рівнянь для течій нелінійних матеріалів у каналах та трубах використовується метод суперпозиції на підставі зниження розмірності, шляхом зведення тривимірних задач до одновимірних задач, та метод аналогії, який базується на трансформації гідравлічних рівнянь за рахунок перенормування числа Рейнольдса та перенесення їх для випадку гідравліки ступених (кремнійорганічних) рідин. Експериментальні дослідження виконувалися за створеними оригінальними методиками з використанням обчислюваної техніки. Достовірність одержаних даних перевірена методом порівняння експериментальних і теоретичних результатів.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова концепція роботи полягає в теоретично-експериментальному обґрунтуванні реодинамічних та теплообмінних

процесів шляхом визначення макродинамічних та макрокінетичних закономірностей течії неньютонівських рідин у каналах базової геометрії, що є визначальними чинниками при проведенні розрахунків гідродинамічних та теплообмінних процесів у технологічному обладнанні хімічної та харчової промисловості для зниження питомих енерговитрат та матеріалоемності.

На підставі проведених теоретичних і експериментальних досліджень вперше:

- розроблено методику рішення тривимірних задач реодинаміки неньютонівських матеріалів у каналах складної форми з рухомими границями шляхом зведення тривимірних задач до одновимірних задач базової геометрії та трансформації їх для випадку гідравліки степеневих рідин за рахунок перенормування числа Рейнольдса;

- отримано та досліджено рішення задач двовимірної течії в пласкому каналі та тривимірної течії в прямокутному каналі для в'язкопластичної рідини при довільному розподілі швидкості на границях каналу, яка значно спрощує визначення макродинамічних та макрокінетичних характеристик хіміко-технологічних процесів;

- аналітично розв'язано рівняння в'язкопластичної течії зі сталими показниками в'язкості та напруженням зрушення в прямокутному каналі, що дозволило отримати значення координат та швидкості руху твердого ядра при довільному розподілі швидкості на границях каналу;

- отримано і аналітично досліджено рішення задач опису поздовжньо-поперечної течії в прямокутному каналі з довільним розподілом граничних швидкостей та градієнтом тиску, що дозволило визначити контури поділу поперечного перетину прямокутного каналу та дослідити залежність в'язкості та напруження зрушення від тиску який змінюється за довільним законом;

- отримано узагальнене реологічне рівняння стану течії неньютонівських рідин із монотонною та екстремальною залежністю в'язкості від швидкості зрушення та запропоновано новий термін для таких рідин – узагальнено-зрушені рідини, для яких визначено основні закономірності поздовжньої течії в пласкому каналі з довільними граничними умовами;

- методом розмірної редукції та суперпозиції одновимірних течій отримано та розв'язано задачу для поздовжньої та поздовжньо-поперечної течії у пласкому та прямокутному каналах для визначення режимних характеристик технологічних апаратів хімічних та харчових виробництв;

- отримано рішення задач течії неньютонівських матеріалів, в'язкість яких залежить від швидкості зрушення, для поздовжніх та поздовжньо-поперечних течій, яке дозволяє дослідити зміни тиску вздовж каналу хіміко-технологічного обладнання;

- досліджено та розв'язано задачі для моделі перехідної течії ньютонівської рідини в трубі та каналі, яка дозволяє проводити обчислення коефіцієнтів тертя та місцевих опорів, визначати довжини ламінарної та турбулентної релаксації вхідної (початкового профілю) швидкості потоку степеневі (кремнійорганічної) рідини;

- отримано вирази для визначення коефіцієнтів опору тертя та місцевих опорів для степеневі (кремнійорганічної) рідини, які є рівномірно придатні у широкому діапазоні зміни числа Рейнольдса;

- набуло подальшого розвитку: теоретичні основи дослідження різних випадків теплообміну при течії неньютонівської рідини в каналах із довільним розподілом швидкостей характерних для хіміко-технологічних процесів; дослідження та узагальнення моделі течії ньютонівської та степеневі (кремнійорганічної) рідини, що дозво

ляє визначати коефіцієнти тепловіддачі в умовах перехідного режиму течії в технологічних апаратах хімічних та харчових виробництв.

Практичні значення одержаних результатів для хімічної та харчової галузей полягають у наступному:

- створено методику інженерних розрахунків основних макродинамічних і макрокінетичних показників течії неньютонівських матеріалів у каналах базової геометрії з рухомими границями та різницею тисків на кінцях, що дозволяє в подальшому визначати необхідні параметри для підвищення енергоефективності різноманітного хіміко-технологічного обладнання;
- розроблено блок-схему для проведення гідродинамічних та теплових розрахунків течії в каналах для різних випадків теплообміну, яка дозволяє за допомогою спеціального програмного забезпечення визначати основні характеристики технологічного обладнання;
- запропоновано конструкцію шнекового теплообмінного апарата з використанням як проміжного теплоносія кремнійорганічної (ступеневої) рідини, що дозволяє усунути руйнівну дію CaCl_2 на конструктивні елементи теплообмінника, підвищити довговічність роботи агрегата, спростити експлуатацію та обслуговування (патент України на корисну модель № 52068);
- удосконалено систему централізованого теплопостачання теплових апаратів із використанням проміжного кремнійорганічного теплоносія, що дозволяє проводити теплові процеси у більш широкому діапазоні температур, усунути небезпеку вибуху проміжного теплоносія, знизити енергоємність апаратів (патент України на корисну модель № 36262). Запропоновано конструкції теплових апаратів із проміжним кремнійорганічним теплоносієм, які є складовими елементами вище зазначеної системи теплопостачання (патенти України на корисну модель № 23495, № 38821);
- створено оригінальні експериментальні установки для дослідження реологічних параметрів неньютонівських матеріалів, які знайшли використання під час проведення лабораторних робіт для підготовки фахівців за спеціальністю 8.05050313 «Обладнання переробних та харчових виробництв» в НТУ «ХП», на пряму підготовки 6.051701 «Харчові технології та інженерія» ХТЕІ КНТЕУ (патент України на винахід № 96170; патенти України на корисну модель № 80031, № 80032, № 80033).

Наукові положення, які розроблені, використовуються під час розрахунку та створення нових процесів та апаратів хімічної та харчової промисловості і впроваджені: Українським державним науково-дослідним вуглехімічним інститутом (м. Харків, акт від 05.02.2011 р., акт від 15.02.2011 р., акт від 18.02.2011 р.); ПАТ ХЛФЗ «Червоний хімік» (акт від 10.01.2013 р.); ТОВ «Золочівське хлібоприймальне підприємство» (акт від 05.07.2013 р.). Результати роботи використовуються у навчальному процесі для підготовки фахівців за спеціальністю 8.05050313 «Обладнання переробних та харчових виробництв» в НТУ «ХП» (акт від 25.01.2013 р., акт від 10.02.2013 р.); на пряму підготовки 6.051701 «Харчові технології та інженерія» ХТЕІ КНТЕУ (акт від 12.09.2012 р.), а також при проведенні науково-дослідної роботи студентів різного рівня підготовки.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення і результати, наведені в дисертації, отримані здобувачем особисто, а саме: аналіз стану наукової проблеми; наукове обґрунтування і формування мети, завдань, складання програми досліджень і її реалізації; розробка математичних моделей течії рідин, в'язкість яких залежить від швидкості зрушення, ступеневих, в'язкопластичних рідин у прямокутному та пласко

му каналах; проведення експериментів та обробка дослідних даних; узагальнення отриманих результатів і формулювання висновків; розробка інженерних методик розрахунку гідродинамічних та теплових характеристик течії неньютонівських рідин; впровадження науково-технічних розробок у виробничий та навчальний процеси.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та були схвалені на: Міжнародній науково-практичній конференції «Научные и практические аспекты переработки мяса и мясопродуктов» (Харків, 2001 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Управлінські та технологічні аспекти розвитку підприємств харчування та торгівлі» (Харків, 2003 р.); VI Міжнародній науково-технічній конференції «Техника и технология пищевых производств» (Могильов, Білорусія, 2007 р.); IV, V, VI International Conference «Strategy of Qualitysn Industry and Education» (Варна, Болгарія, 2008 р., 2009 р., 2010 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Стратегічні напрямки розвитку підприємств харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі» (Харків, 2008 р.); V Міжнародній науково-практичній конференції «Naukova mysl informacyjnego wieku – 2009. Chemia i chemiczne technologie» (Пшемишль, Польща, 2009 р.); V Міжнародній науково-технічній конференції «Удосконалення малої хладотеплотехніки – використання холоду в харчовій галузі» (Донецьк, 2010 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні проблеми техніки та технології харчових виробництв, ресторанного бізнесу та торгівлі» (Харків, 2010 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Теория и практика инновационного развития кооперативного образования и науки» (Белгород, Росія, 2010 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Готельно-ресторанний, туристичний та виставковий бізнес: інноваційні напрями розвитку» (Ялта, 2011 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Наука и кооперация: проблемы и пути развития» (Белгород, Росія, 2011 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Прогресивна техніка і технології харчових виробництв, готельного, ресторанного господарстві і торгівлі» (Харків, 2011 р., 2012 р.).

Основні практичні досягнення на основі результатів дисертаційної роботи демонструвались на всеукраїнських, міжнародних багатогалузевих виставках-ярмарках в період з 2003 по 2013 рр.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 58 праць, з них: 1 монографія, 34 статті в фахових виданнях України та іноземних виданнях, 8 патентів України на винахід, 15 матеріалів конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 7 розділів, висновків до розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг складає 393 сторінки (крім додатків): рисунків 71 по тексту, 66 на 40 окремих сторінках, 7 таблиць по тексту, 2 – на окремій сторінці, списку використаних джерел 342 найменування на 35 сторінках, додатків на 270 сторінках в окремому томі.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету і задачі досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача, наведено відомості щодо апробації та реалізації результатів роботи, надано кількість публікацій.

У першому розділі наведено аналітичний огляд науково-технічної інформації в області реодинаміки та теплообміну неньютонівських рідин у хімічній та харчовій промисловостях. Встановлено, що більшість матеріалів, які використовуються в хімічних, харчових технологіях мають нелінійний характер залежності в'язкості і описуються різноманітними рівняннями стану. Виявлено, що існуючі рівняння стану не завжди враховують усі функціональні зв'язки між основними параметрами процесу, що суттєво ускладнює розробку нових енерго- та ресурсозберігаючих технологій. Обґрунтовано, що перспективним напрямком є створення феноменологічних моделей течії, які дозволяють вирішувати складні тривимірні задачі

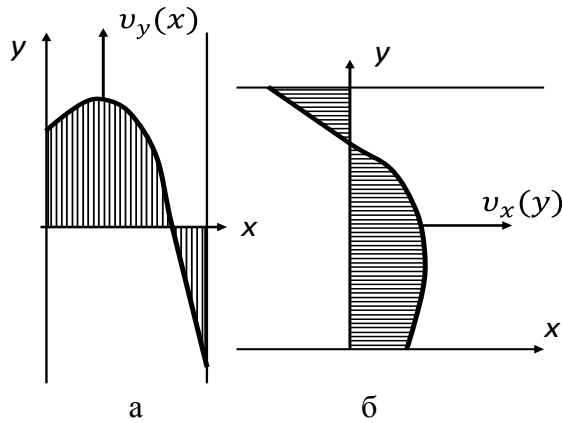


Рис. 1. Профілі швидкості в поперечних течіях.

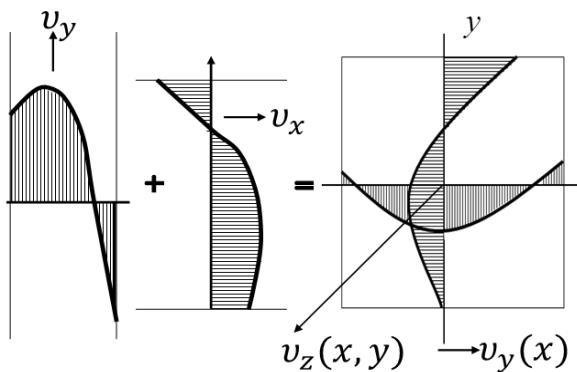


Рис. 2. Суперпозиція двох поздовжніх течій в плоских каналах.

взаємно перпендикулярних каналах із нульовою витратою. У цьому випадку рівняння рівноваги течії та граничні умови мають вигляд (1-2):

Рівняння рівноваги течії:

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}, \quad \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}. \quad (1)$$

поздовжньо-поперечної течії неньютонівських рідин у каналах прямокутної та плоскої форми під впливом різниці тиску і рухомими границями. Це дає змогу визначити основні макродинамічні та макрокінетичні характеристики течії (профіль та розподіл швидкості, їх градієнти, витрати, величину дисипації, залежності в'язкості від швидкості зрушення, напруження зрушення) в кожній точці каналу, з довільним розподілом граничних швидкостей та суттєво покращити умови роботи хіміко-технологічного обладнання.

У другому розділі викладено теоретичні методи моделювання течії неньютонівських рідин у трубах і каналах базової геометрії із границями, що рухаються або з різницею тисків на кінцях каналу. Запропоновано метод суперпозиції, який дозволяє звести рішення задач більшої розмірності до задач меншої розмірності, таким чином, що для відновлення тривимірного поля течії достатньо вирішити задачу в одному вимірі. Метод зводиться до вираження компонентів тензора напруження через єдиний компонент, при цьому вважається, що границі каналу є рухомими і течія може відбуватися як в поздовжньому так і поперечному напрямках каналу. Канал, що розглядається вважається стандартним, тобто має прямокутно-поперечний переріз. Течії в каналах характеризуються величинами швидкості і тиску в кожній точці ділянки течії.

Сутність запропонованого методу полягає в тому, щоб представити поперечну течію у прямокутному каналі як суперпозицію двох поперечних течій у пла-

Граничні умови течії:

$$\begin{aligned} v_y(+h) &= W_{\square y}^+, & v_y &= v_y(x), & v_y(-h) &= W_{\square y}^-, \\ v_x(+a) &= W_{\square x}^+, & v_x &= v_x(y), & v_x(-a) &= W_{\square x}^-. \end{aligned} \quad (2)$$

На рис. 1а зображена поздовжня течія в пласкому каналі з границями, які є паралельними осі y і компонентою швидкості, яка залежить від поперечної координати x . На рис. 1б зображена поздовжня течія в пласкому каналі з границями, які є паралельними осі x і компонента швидкості залежить від поперечної координати y . Використовуючи метод суперпозиції отримано модель поздовжньої течії в прямокутному каналі з єдиною поздовжньою компонентою швидкості v_z , яка залежить від двох поперечних координат x та y , яка схематично зображено на рис. 2.

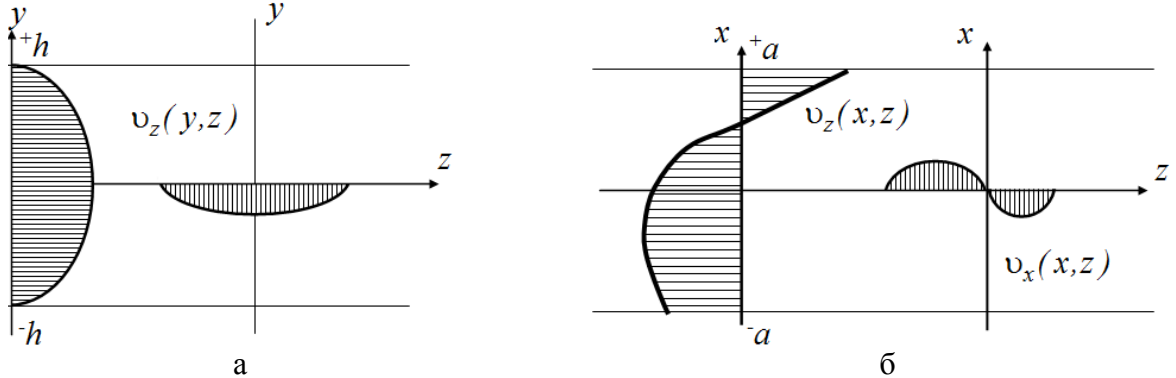


Рис. 3. Поздовжня течія з поперечною компонентою для рідини, властивості якої залежать від тиску: а – поперечна компонента спрямована вздовж осі ox ; б – поперечна компонента спрямована вздовж осі oy .

Моделювання поздовжньо-поперечної течії з компонентами вектора швидкості, одна з яких є направленою вздовж осі z , а інша вздовж $-y$, які залежать від поперечної координати y зображено на рис. 3а, з залежністю від координати x на рис. 3б. За допомогою використання методу суперпозиції побудовано модель поздовжньо-поперечної течії в прямокутному каналі, при цьому на поперечну течію накладено умову нульової витрати. Рішення такої задачі побудовано на рівняннях:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} &= 0; \\ v_z &= v_z(y, z); & v_z(+h, z) &= W_{\square y}^+; & v_y(+h, z) &= W_{\perp y}^+; \\ v_y &= v_y(y, z) & v_z(-h, z) &= W_{\square y}^-; & v_y(-h, z) &= W_{\perp y}^-. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} &= 0 \\ v_z &= v_z(x, z); & v_z(+a, z) &= W_{\square x}^+; & v_y(+a, z) &= W_{\perp x}^+; \\ v_x &= v_x(x, z); & v_z(-a, z) &= W_{\square x}^-; & v_y(-a, z) &= W_{\perp x}^-. \end{aligned} \quad (4)$$

Інтегрування виразів (3-4) дозволило визначити поля швидкостей, які утворюються в ділянках перетинання пласких каналів (рис. 4). У цьому випадку виникають чотири ділянки для яких умовами їх фіксації є умови безперервності абсолютної швидкості. Шляхом складання поздовжніх та поздовжньо-поперечних течій у пласкому каналі описано поздовжні та поздовжньо-поперечні течії в прямокутному каналі

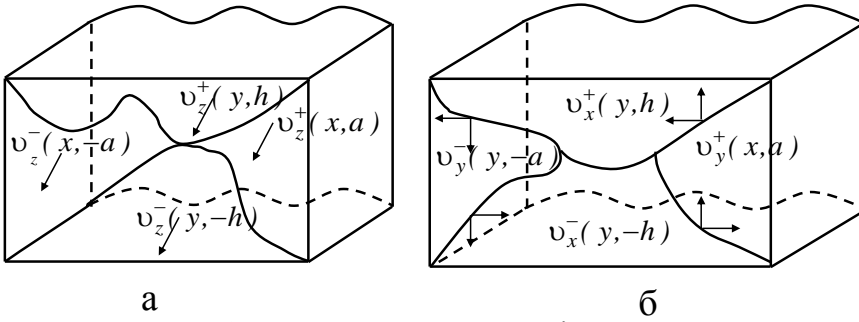


Рис. 4. Розбивка поперечного перерізу прямокутного каналу на ділянки: а – для поздовжньої течії; б – для поперечної течії.

такий вид зв'язку між величиною ковзання та компонентами тензорів напруження записано у вигляді формул:

$$W_{\Gamma} - v_{\Gamma} = f(T_2), \quad \sqrt{T_2} > \tau^*, \quad T_2 = \sum_{ij} \tau_{ij}^2, \quad \sqrt{T_2} \leq \tau^*, \quad W_{\Gamma} = v_{\Gamma}. \quad (5)$$

У наведених рівняннях усі компоненти тензора напруження τ_{ij} виражено через одну компоненту $\tau_{i_0j_0}$. У результаті для визначення двох граничних швидкостей, отримано два нелінійних рівняння: $W_{\Gamma}^+ - v_{\Gamma 1} = f(I_2, v_{\Gamma 1}, v_{\Gamma 2}, P, T, h)$, $W_{\Gamma}^- - v_{\Gamma 2} = f(I_2, v_{\Gamma 1}, v_{\Gamma 2}, P, T, -h)$. Якщо виключити з рівнянь параметри тиску і температури наведені формули можна застосувати для спеціального випадку течії з проковзуванням при відсутності залежності тиску на границях каналу.

Третій розділ присвячено математичному моделюванню в'язкопластичної течії у каналах

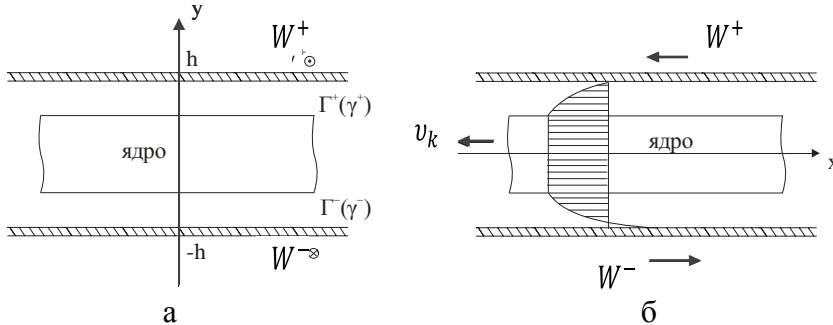


Рис. 5. Поздовжня в'язкопластична течія в пласкому каналі.

вано формулами:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v_x}{\partial y} \pm \tau_0 \right); \quad \begin{aligned} v_x \neq 0: & \Gamma^+ \leq y \leq h, \\ v_x \neq 0: & -h \leq y \leq \Gamma^-; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_x^+(h) &= W^+, & v_x^+(\Gamma^+) &= v_x^-(\Gamma^-) = v_k, \\ v_x^-(h) &= W^-, & \tau(\Gamma^+) &= \tau_0, \tau(\Gamma^-) = -\tau_0, \end{aligned} \quad (6)$$

з різним розподілом граничних швидкостей з комбінуванням тільки поздовжніх течій у пласкому каналі хіміко-технологічного обладнання.

Деякі неньютонівські рідин при течії демонструють проковзування на границях. З огляду на це запропоновано використання методу суперпозиції для побудови полів швидкості та тиску в трикомпонентних тривимірних течіях із ковзанням. У загальному випадку

пласкої та прямокутної форм. Розглядалась поздовжня течія під впливом дії різниці тисків на кінцях каналу, додатковою рушійною силою є рух границь каналу, на швидкості яких не накладаються жодні граничні обмеження.

Задача поздовжнього руху в пласкому каналі з одним компонентом швидкості уздовж каналу на підставі рівнянь рівноваги та граничних умов течії, сформульовано

де x, y – координати вздовж і поперек каналу; v^{\pm} – швидкості в'язкої течії вище і нижче квазітвердо-го ядра, м/с; h – ширина плоского каналу, м; W^{\pm} – швидкості поздовжньої течії верхньої і нижньої границь каналу, м/с.

Отримані кінцеві розрахункові формули дозволили визначити основні параметри поздовжньої в'язкопластичної течії в плоскому каналі:

а) визначення ширини квазітвердого ядра течії:

$$\Gamma^+ - \Gamma^- = \frac{2\tau_0}{dP/dx}, \quad (7)$$

Γ^{\pm} – границі ядра, м;

б) визначення координат границь ядра:

$$\Gamma^{\pm} = \pm \frac{\tau_0}{dP/dx} + \frac{\left(\frac{1}{2}\right)(W^+ - W^-)}{\frac{h}{\mu} \frac{dP}{d\zeta_x} - \frac{\tau_0}{\mu}}; \quad (8)$$

в) обчислення швидкості течії квазітвердого ядра:

$$v_k = \frac{W^+ + W^-}{2} - \frac{h}{2\mu} \frac{dP}{d\zeta_x} \times \left[(1-\gamma)^2 - \gamma^2 \left(\frac{\mu(W^+ + W^-)}{h\tau_0} \right)^2 \frac{1}{(1-\gamma)^2} - 1 \right]; \quad (9)$$

г) визначення витрат течії у плоскому каналі:

$$\dot{V} = \dot{V}_W + \dot{V}_P;$$

$$\dot{V}_W = (W^+ + W^-)h \left(1 - \gamma^+ / 2 - \gamma^- / 2 \right), \quad (10)$$

$$\dot{V}_P = \frac{h^2}{2\mu} \frac{dP}{d\zeta_x} \left[\frac{4}{3} - \gamma^+ + \gamma^- - (\gamma^+)^2 - (\gamma^-)^2 - \gamma^+ \gamma^- \right];$$

$$\left[-\frac{(\gamma^+)^3}{6} + \frac{(\gamma^-)^3}{6} + \frac{\gamma^+ (\gamma^-)^2}{2} - \frac{(\gamma^+)^2 \gamma^-}{2} \right];$$

д) визначення густини виділення дисипативного тепла:

$$\dot{e} = \frac{h}{2\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right)^2 \left[(1-\gamma^+)^3 - (1-\gamma^-)^3 \right]. \quad (11)$$

Запропоновані формули (7-11) лягли в основу розвитку методу побудови дво- та тривимірних течій, який дозволяє розраховувати основні макродинамічні та макрокінетичні показники в'язкопластичної течії в плоскому каналі і в подальшому були реалізовані в інженерних методиках розрахунків хіміко-технологічного обладнання. На рис. 6 наведено графіки для визначення границь квазітвердого ядра, які обчисленні за допомогою формули (8):

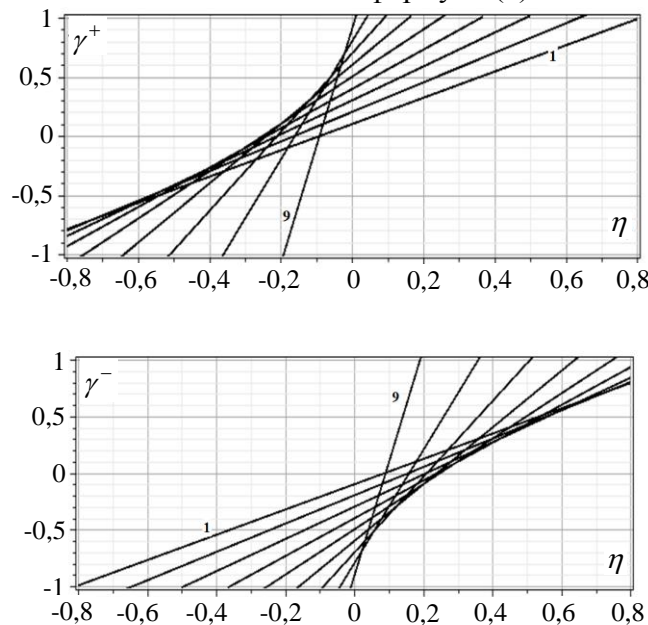


Рис. 6. Залежність координати верхньої та нижньої границь ядра течії від змінної

$$\eta = \frac{\mu(W^+ - W^-)}{h\tau_0} \text{ для значень } \theta = \tau_0 \left/ \frac{dP}{d\zeta_x} \right. \text{ від 1 (пряма 1) до 9 (пряма 9) через 0,1.}$$

Наведені графіки наочно демонструють знаходження верхньої та нижньої границь ядра в поперечному перетині плаского каналу. Розгляд течії у пласкому каналі границі якого розташовані вертикально з довільним розподілом граничних швидкостей проводився за аналогічним алгоритмом.

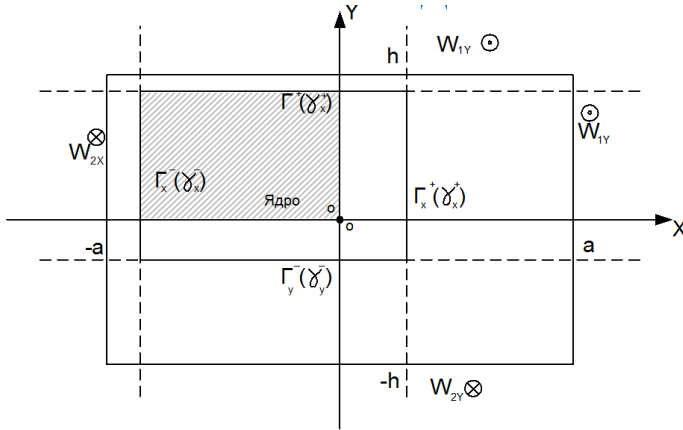


Рис. 7. Канал прямокутного поперечного перетину.

Досліджено поздовжню в'язкопластичну течію в прямокутному каналі. Течія утворюється у результаті спільної дії границь каналу, що рухається та різниці тиску на його кінцях (рис. 7). Течія вважається поздовжньою і має два компоненти тензора напруження. Зв'язок між компонентами напруження і швидкості пов'язано за допомогою формули:

$$\tau_{zx} = \left(\mu + \frac{\tau_0}{\sqrt{I_2}} \right) \frac{\partial v_z}{\partial x}; \quad \tau_{zy}$$

Рівняння рівноваги в'язкопластичної течії в прямокутному каналі та його граничні умови мають вигляд:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y}, \quad \tau_{zx}^2 + \tau_{zy}^2 = \tau_0^2. \quad (13)$$

Для вирішення (13) використані рівняння опису течії в плоскому каналі. Отримані кінцеві аналітичні результати визначення основних характеристик в'язкопластичної рідини в прямокутному каналі за формулами (14, 15).

а) визначення координат лівої та правої границь ядра в'язкопластичної рідини:

$$\gamma_x^\pm = \gamma_x^\pm \left(\begin{array}{c} \text{щ} = 0, \frac{\tau_0}{dP}, \frac{\mu(W_x^+ - W_x^-)}{h \frac{dP}{d\zeta_h}} \\ \frac{d\zeta_h}{d\zeta_h} \end{array} \right) \frac{1}{1 + \text{щ}^2} + \gamma_x^\pm \left(\begin{array}{c} \text{щ} = \infty, \frac{\tau_0}{dP}, \frac{\mu(W_x^+ - W_x^-)}{a \frac{dP}{d\zeta_a}} \\ \frac{d\zeta_a}{d\zeta_a} \end{array} \right) \frac{\text{щ}^2}{1 + \text{щ}^2}. \quad (14)$$

б) визначення координат верхньої та нижньої границь ядра:

$$\gamma_y^\pm = \gamma_y^\pm \left(\begin{array}{c} \text{щ} = 0, \frac{\tau_0}{dP}, \frac{\mu(W_y^+ - W_y^-)}{h \frac{dP}{d\zeta_h}} \\ \frac{d\zeta_h}{d\zeta_h} \end{array} \right) \frac{1}{1 + \text{щ}^2} + \gamma_y^\pm \left(\begin{array}{c} \text{щ} = \infty, \frac{\tau_0}{dP}, \frac{\mu(W_y^+ - W_y^-)}{a \frac{dP}{d\zeta_a}} \\ \frac{d\zeta_a}{d\zeta_a} \end{array} \right) \frac{\text{щ}^2}{1 + \text{щ}^2}. \quad (15)$$

в) визначення швидкості течії:

$$v_{kx} = -\frac{\text{щ}^2 a}{2\mu} \frac{dP}{d\zeta_a} \cdot \frac{(1 - \gamma_x)^2}{\text{щ}^2 + (1 - \gamma_x)^2}; \quad v_{ky} = -\frac{\text{щ}^2 h}{2\mu} \frac{dP}{d\zeta_h} \cdot \frac{(1 - \gamma_y)^2}{1 + \text{щ}^2 (1 - \gamma_y)^2}. \quad (16)$$

г) визначення загальної швидкості руху твердого ядра:

$$v_k = v_{kx} / 2 + v_{ky} / 2. \quad (17)$$

д) визначення координати перетину полів швидкості течії:

$$\frac{1 \mp \xi_y = \mp \gamma_y^\pm \pm \sqrt{(\gamma_y^\pm)^2 + 2[1 + \text{щ}^2 \rho_y^\pm (1 \mp \gamma_y^\pm)](W_x^\pm - W_y^\pm) + [1 + \text{щ}^2 \rho_y^\pm (1 \mp \gamma_y^\pm) / \text{щ}^2 + \rho_x^\pm (1 \mp \gamma_x^\pm)] \cdot (1 \mp \xi_x)^2 \pm 2\gamma_x^\pm (1 \mp \xi_x)}}{1 + \text{щ}^2 (1 - \gamma_y)^2}. \quad (18)$$

Загальна формула для визначення витрати течії:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{V}}{ah} = & v_k(\gamma_x^+ - \gamma_x^-)(\gamma_y^+ - \gamma_y^-) + (\gamma_x^+ - \gamma_x^-) \left[\int_{\gamma_y^+}^1 v_y^+ d\xi_y + \int_{-1}^{\gamma_y^-} v_y^- d\xi_y \right] + \\ & + (\gamma_x^+ - \gamma_x^-) \left[\int_{\gamma_x^+}^1 v_x^+ d\xi_x + \int_{-1}^{\gamma_x^-} v_x^- d\xi_x \right] + M. \end{aligned} \quad (19)$$

Визначення енергії дисипації:

$$\dot{e} = \frac{\mu}{2} \iint d\xi_x d\xi_y \left\{ \frac{R_y^2}{\Psi} \left[(1 - \gamma_y^\pm)^2 + \xi_y^2 \mp 2(1 - \gamma_y^\pm) \xi_y \right] + \Psi R_x^2 \left[(1 - \gamma_x^\pm)^2 + \xi_x^2 \mp 2(1 - \gamma_x^\pm) \xi_x \right] \right\}. \quad (20)$$

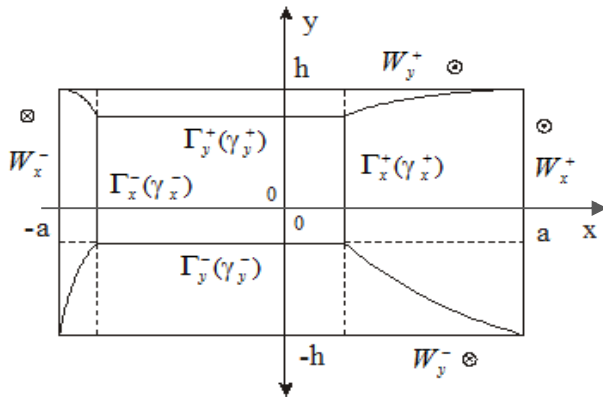


Рис. 8. Поперечний переріз прямокутного каналу й характеристики ядра течії.

в напруженнях та граничних умовах течії мають вигляд (21, 22):

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y}; \quad (21) \quad \gamma_y^\pm \equiv \frac{\Gamma_y^\pm}{h}; \quad \gamma_x^\pm \equiv \frac{\Gamma_x^\pm}{a}. \quad (22)$$

$$\tau_0^2(\gamma_{x(y)}^\pm) = \tau_{zx}^2 + \tau_{zy}^2 + 2\tau_{xx}^2 + 2\tau_{yy}^2;$$

Рівняння (21) послідовно зведено до рівнянь течії в плоскому каналі, яка має в поперечному перерізі смугу, одна з яких є паралельною осі ox інша паралельна осі oy . В основі побудованої моделі застосовано два основних елементи: перший полягає в розподілі прямокутника на тверде ядро та чотири прямокутні ділянки в'язкої течії. Другий – що в'язка течія у кожній з ділянок представлена сукупністю одновимірних течій, тобто поздовжньою і поперечною, які залежать від однієї координати.

Такий підхід виправдовує себе тим, що дозволяє в явному аналітичному вигляді обчислити основні характеристики складної тривимірної течії, а саме:

а) визначення границь ядра течії для $\kappa = 0$:

$$\gamma_y^\pm(\Psi = 0) = \pm \frac{\tau_{0y}^+ + \tau_{0y}^-}{2dP/d\xi_h} + \frac{\mu(W_{\parallel y}^+ - W_{\parallel y}^-)}{2hdP/d\xi_h \left(1 - \frac{\tau_{0y}^+ + \tau_{0y}^-}{2dP/d\xi_h} \right)}, \quad \zeta_h = \frac{z}{h}; \quad (23)$$

б) визначення границь ядра течії для $\kappa = \infty$:

$$\gamma_x^\pm(\text{ш} = \infty) = \pm \frac{\tau_{0x}^+ + \tau_{0x}^-}{2dP / d\zeta_a} + \frac{\mu(W_{\parallel x}^+ - W_{\parallel x}^-)}{2adP / d\zeta_a \left(1 - \frac{\tau_{0x}^+ + \tau_{0x}^-}{2dP / d\zeta_a}\right)}, \quad \zeta_a = \frac{z}{a}; \quad (24)$$

в) швидкість поздовжньої течії з поперечною циркуляцією:

$$v_z^\pm = -\frac{h}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial \zeta_h} \frac{1 - \xi_y^2}{1 + \text{ш}^2 \rho_y^\pm (1 \mp \gamma_y^\pm)} \pm \frac{h}{\mu} \frac{\partial P}{\partial \zeta_h} \frac{\gamma_y^\pm (1 \mp \xi_y)}{1 + \text{ш}^2 \rho_y^\pm (1 \mp \gamma_y^\pm)} + W_{\parallel y}^\pm; \quad (25)$$

$$v_z^\pm = -\frac{a}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial \zeta_a} \frac{1 - \xi_x^2}{1 + (1/\text{ш}^2) \rho_x^\pm (1 \mp \gamma_x^\pm)} \pm \frac{a}{\mu} \frac{\partial P}{\partial \zeta_a} \frac{\gamma_x^\pm (1 \mp \xi_x)}{1 + \text{ш}^2 \rho_x^\pm (1 \mp \gamma_x^\pm)} + W_{\parallel x}^\pm;$$

г) визначення величини енергії дисипації:

$$\dot{e} = \left\{ 2\mu \int_{\Gamma_y^+}^h \left(\frac{\partial v_z^+}{\partial y} \right)^2 dy \cdot 2a + \int_{-h}^{\Gamma_y^-} \left(\frac{\partial v_z^-}{\partial y} \right)^2 dy \cdot 2a + \int_{\Gamma_x^+}^a \left(\frac{\partial v_z^+}{\partial x} \right)^2 dx \cdot 2h + \int_{-a}^{\Gamma_x^-} \left(\frac{\partial v_z^-}{\partial x} \right)^2 dx \cdot 2h + \right. \\ \left. + \int_{\Gamma_y^+}^h \left(\frac{\partial v_x^+}{\partial y} \right)^2 dy \cdot 2a + \int_{-h}^{\Gamma_y^-} \left(\frac{\partial v_x^-}{\partial y} \right)^2 dy \cdot 2a + \int_{\Gamma_x^+}^a \left(\frac{\partial v_y^+}{\partial x} \right)^2 dx \cdot 2h + \int_{-a}^{\Gamma_x^-} \left(\frac{\partial v_y^-}{\partial x} \right)^2 dx \cdot 2h \right\}; \quad (26)$$

д) визначення величини поздовжньої витрати течії:

$$\dot{V}_z = \int_{\Gamma_y^+}^h v_{zy}^+ dy \cdot 2a + \int_{-h}^{\Gamma_y^-} v_{zy}^- dy \cdot 2a + \int_{\Gamma_x^+}^a v_{zx}^+ dx \cdot 2h + \int_{-a}^{\Gamma_x^-} v_{zx}^- dx \cdot 2h. \quad (27)$$

З огляду на отримані результати проаналізовано, як визначені характеристики залежать від граничних умов при цьому враховувався вплив усіх восьми поздовжніх і поперечних граничних умов із будь-яким можливим їхнім розподілом на границях каналу. Отримані аналітичні формули (25-27) в подальшому застосовано в інженерних методиках розрахунків параметрів в'язкопластичної течії в каналах базової геометрії хіміко-технологічного обладнання.

У четвертому розділі вирішено задачі течії неньютонівських рідин, в'язкість яких залежить від швидкості зрушення. Види такої залежності обрані таким чином, щоб передбачити залежність між профілем швидкості течії в пласкому каналі та структурними змінами при течії неньютонівської рідини.

Досліджено окремі ділянки реальних кривих течії рідин із монотонною та немонотонною залежністю в'язкості від швидкості зрушення. Для узагальнення проведення досліджень для рідин, в'язкість яких залежить від швидкості зрушення, використано єдиний алгоритм розрахунків та запропоновано узагальнюючий термін – «узагальнено-зрушені» рідини. З огляду на це, досліджено течії узагальнено-зрушених рідин у поздовжньому напрямку з границями, що рухаються поздовжньо і умовами прилипання на них та заданим градієнтом тиску на кінцях каналу. Досліджено шість випадків залежності в'язкості від швидкості зрушення, які є найбільш поширені в хімічній та харчовій галузях. Враховуючи, що кожен матеріал, в'язкість якого залежить від швидкості зрушення, є деякою функцією другого інваріанта тензора швидкості деформацій, вважаючи цю функцію гладкою та безперервною, її можна апроксимувати лінійними функціями вигляду: $\mu = \alpha + \beta \sqrt{\dot{\epsilon}_2}$, тобто виконати кусково-лінійну апроксимувати

оксимацию залежності в'язкості неньютонівської рідини від величини швидкості зрушення.

На рис. 9 зображено розбиття вісі швидкості зрушення на інтервали, кількість яких визначається необхідною точністю апроксимації.

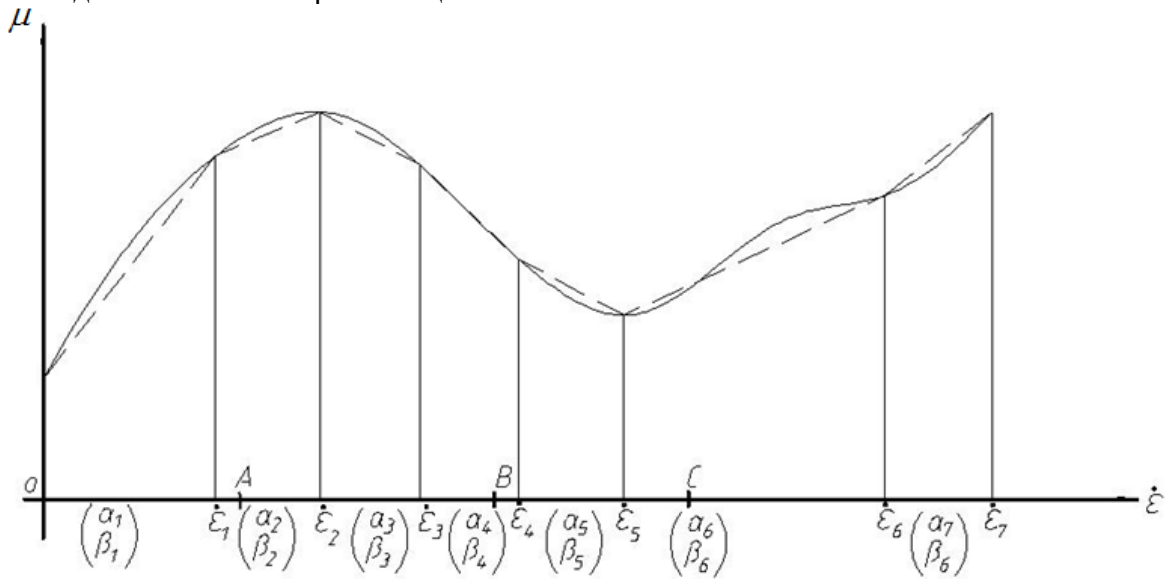


Рис. 9. Узагальнена залежність в'язкості від швидкості зрушення:

$(\epsilon_i, \epsilon_{i+1})$ – інтервали розбиття в'язкості за швидкістю зрушення;

$(0, A)$, (A, B) , (B, C) – інтервали розбиття, отримані в результаті підстановки величин y у формулу при $y \in (-h, +h)$.

Для значень швидкості зрушення з кожного інтервалу обчислена величина напруження зрушення за формулою

$$\frac{d}{dy} \left\{ \left(\alpha + \beta \left| \frac{dv_z}{dy} \right| \right) \frac{dv_z}{dy} \right\} = \frac{dP}{dz} . \quad (28)$$

Отримані рішення визначають інтервали зміни швидкості зрушення і дають змогу отримати значення напруження зрушення при заданому градієнті тиску і, таким чином, встановити межі зміни швидкості зрушення. Встановлено, що ці інтервали або цілком співпадають з інтервалом розбиття вісі швидкості зрушення або перетинаються з ними. Тим самим відбувається фіксація вказаних інтервалів розбиття та визначення параметрів α і β .

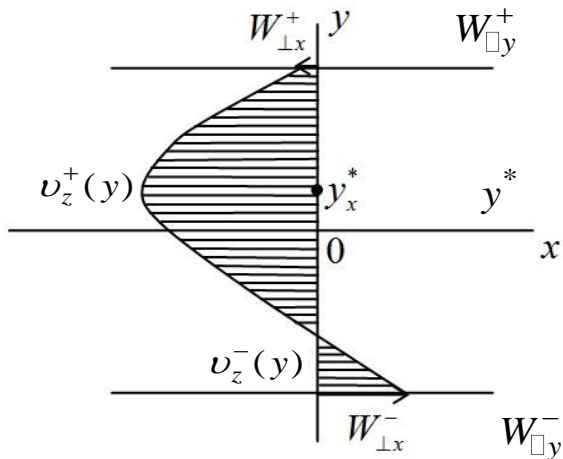


Рис. 10. Поздовжня течія в пласкому каналі – значення поздовжньої швидкості на стінках каналу нормальних до вісі oy

Враховуючи наявність різних реологічних властивостей рідин, в'язкість яких визначається швидкістю зрушення, вирішено завдання поздовжньої течії в пласкому каналі, яка відбувається під впливом градієнта тиску (рис. 10). Швидкість течії має єдину складову v_z , яка залежить від координати y і поділяється на дві гілки з протилежними знаками.

Вирази для визначення значень швидкості течії мають вигляд

дкості течії мають вигляд

$$v_z^+(y) = -\frac{\alpha y}{2\beta} + \left(\frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{y-y^*}{\beta} \cdot \frac{dP}{dz} \right)^{3/2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{\beta}{dP/dz} + \frac{\alpha h}{2\beta} - \left(\frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h-y^*}{\beta} \cdot \frac{dP}{dz} \right)^{3/2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{\beta}{dP/dz} + W_{\square y}^+, \quad (29)$$

$$v_z^-(y) = \frac{\alpha y}{2\beta} + \left(\frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{y-y^*}{\beta} \cdot \frac{dP}{dz} \right)^{3/2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{\beta}{dP/dz} + \frac{\alpha h}{2\beta} - \left(\frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h+y^*}{\beta} \cdot \frac{dP}{dz} \right)^{3/2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{\beta}{dP/dz} + W_{\square y}^-.$$

Координати перетину гілок профілів швидкості визначалися за формулою

$$y^* = -\frac{W_{\square y}^+ - W_{\square y}^-}{\frac{\alpha}{\beta} - 2 \left(\frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2}}. \quad (30)$$

Витрати, даного виду течій визначалися за формулою

$$\begin{aligned} \dot{V} = & (W_{\square y}^+ + W_{\square y}^-)h - (W_{\square y}^+ - W_{\square y}^-)y^* + \frac{\alpha}{2\beta} \cdot (h^2 + y^{*2}) + \frac{8}{15} \left(\frac{\beta}{dP/dz} \right)^2 \cdot \left[\left(\frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h}{\beta} \cdot \frac{dP}{dz} \right)^{5/2} \right] - \\ & - \frac{2\beta}{3dP/dz} \cdot \left[2h \left(\frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h}{\beta} \cdot \frac{dP}{dz} \right)^{3/2} + 3(y^*)^2 \cdot \left(\frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h}{\beta} \cdot \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} \right] \end{aligned} \quad (31)$$

Величина дисипації при поздовжній течії узагальнено-зрушеної рідини в пласкому каналі визначалась за формулою

$$\dot{e} = \int_{-h}^{y^*} \mu(v_z^-) \cdot \left(\frac{dv_z^-}{dy} \right)^2 dy + \int_{y^*}^h \mu(v_z^+) \cdot \left(\frac{dv_z^+}{dy} \right)^2 dy. \quad (32)$$

Отримані рішення дозволили визначити макродинамічні та макрокінетичні характеристики течії ступеневої рідини в пласкому каналі з рухомими стінками. У даному випадку течії профіль швидкості має дві гілки. На одній гілці похідна швидкості є позитивною, а на іншій – негативною. Вирази для визначення швидкості течії ступеневої рідини мають вигляд:

$$v_z^+(y) = \left(\frac{y-y^*}{\mu_0} \cdot \frac{dP}{dz} \right)^{\frac{n+2}{n+1}} \cdot \frac{n+2}{n+1} \cdot \frac{\beta}{dP/dz} - \left(\frac{h-y^*}{\beta} \cdot \frac{dP}{dz} \right)^{\frac{n+2}{n+1}} \cdot \frac{n+1}{n+2} \cdot \frac{\beta}{dP/dz} + W_{\square y}^+, \quad (33)$$

$$v_z^-(y) = \left(\frac{y^*-y}{\mu_0} \cdot \frac{dP}{dz} \right)^{\frac{n+2}{n+1}} \cdot \frac{n+1}{n+2} \cdot \frac{\beta}{dP/dz} - \left(\frac{h+y^*}{\beta} \cdot \frac{dP}{dz} \right)^{\frac{n+2}{n+1}} \cdot \frac{n+1}{n+2} \cdot \frac{\beta}{dP/dz} + W_{\square y}^-$$

Одержані значення швидкості течії дозволили визначити витрату рідини

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \left(\frac{\beta}{dP/dz} \right)^2 \cdot \frac{(n+1)^2}{(n+2) \cdot (2n+3)} \cdot \left[\left(\frac{h-y^*}{\beta} \cdot \frac{dP}{dz} \right)^{\frac{2n+3}{n+1}} + \left(\frac{h+y^*}{\beta} \cdot \frac{dP}{dz} \right)^{\frac{2n+3}{n+1}} \right] - \frac{\beta}{dP/dz} \cdot \frac{n+1}{n+2} \times \\ & \times \left[\left(\frac{h+y^*}{\beta} \cdot \frac{dP}{dz} \right)^{\frac{n+1}{n+2}} \right] \cdot (h+y^*) - \left(\frac{h-y^*}{\beta} \cdot \frac{dP}{dz} \right)^{\frac{n+1}{n+2}} \cdot (h-y^*) + W_{\square y}^+ (h-y^*) + W_{\square y}^- (h+y^*). \end{aligned} \quad (34)$$

Дисипація енергії для ступеневої рідини визначалась за формулою

$$\dot{e} = \frac{n+1}{2n+3} \cdot \left(\frac{1}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{\frac{n+2}{n+1}} \cdot \left[(h$$

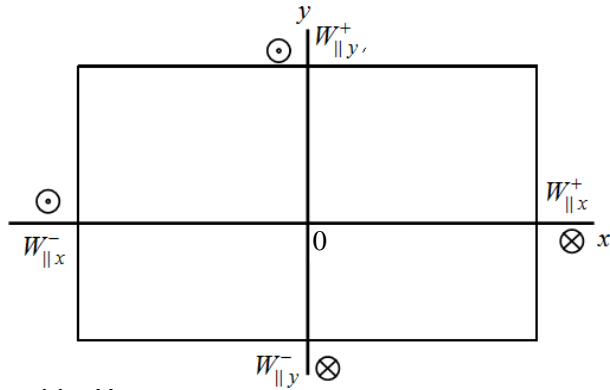


Рис 11. Поздовжня течія в прямокутному каналі і граничні умови на стінках.

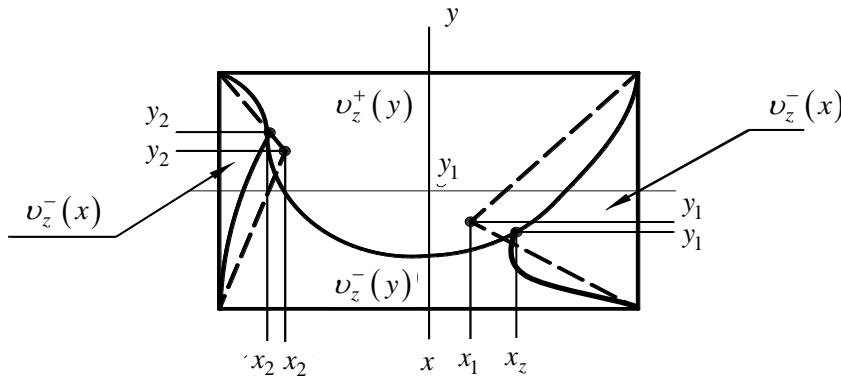
Аналогічним способом отримано рішення для поздовжньої течії узагальнено-зрушеної рідини в прямокутному каналі, з довільним розподілом граничних швидкостей (рис. 11). У цьому випадку поздовжня течія має одну компоненту швидкості v_z , яка залежить від двох координат x та y в прямокутному перетині каналу, де рівняння рівноваги течії має вигляд

$$\frac{dP}{dz} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\alpha + \beta \sqrt{I_2} \right) \frac{\partial v_z}{\partial x} \right.$$

В основу побудови рішень покладено обчислення одновимірної задачі за пласку течію. Композиція течій в пласких каналах із взаємно перпендикулярними парами стінок задовольняє принципу граничної відповідності між течіями в прямокутному і пласкому каналах, що дозволило отримати формули витрати течії, вигляду

$$\begin{aligned} \dot{V}_i = & W_{\square}^+(l_i - x_i^*) + W_{\square}^-(l_i + x_i^*) + \frac{\alpha i}{2\beta_i} (l_i^2 + x_i^{*2}) + \frac{8}{15} \left(\frac{\beta_i}{dP/dz} \right)^2 \cdot \left[\left(\frac{\alpha_i^2}{4\beta_i^2} + \frac{l_i}{\beta_i} \frac{dP}{dz} \right)^{5/2} - \left(\frac{\alpha_i^2}{4\beta_i^2} \right)^{5/2} \right] - \\ & - \frac{2}{3} \frac{\beta_i}{dP/dz} \cdot \left[2l_i \left(\frac{\alpha_i^2}{4\beta_i^2} + \frac{l_i}{\beta_i} \frac{dP}{dz} \right)^{3/2} + \frac{3}{\beta_i} \frac{dP}{dz} \cdot \left(\frac{\alpha_i^2}{4\beta_i^2} + \frac{l_i}{\beta_i} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} \cdot x_i^* \right]. \end{aligned} \quad (37)$$

Використовуючи спосіб суперпозиції побудовано поле поздовжньої течії в прямокутному каналі з рухомими стінками в основі якого є розбиття кінцевого перетину каналу на ділянки з різною залежністю від координат так, що на одних ділянках швидкість залежить тільки від однієї координати, а на інших – лише від другої координати (рис. 12).



Визначення профілів швидкості течії на окремих ділянках проводилося за формулами:

Рис. 12. Розбиття перетину каналу на області з профілями швидкості: суцільна лінія – дійсне розбиття; пунктирна лінія – наближене розбиття.

$$\begin{aligned}
v_z^+(y) &= W_{\square y}^+ + \left[\frac{\alpha_y}{2\beta_y} - \left(\frac{\alpha_y^2}{4\beta_y^2} + \frac{h-y^*}{\beta_y} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} \right] (h-y); \\
v_z^+(x) &= W_x^+ + \left[\frac{\alpha_x}{2\beta_x} - \left(\frac{\alpha_x^2}{4\beta_x^2} + \frac{a-x^*}{\beta_x} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} \right] (a-x); \\
v_z^-(x) &= W_{\square x}^- + \left[\frac{\alpha_x}{2\beta_x} + \left(\frac{\alpha_x^2}{4\beta_x^2} + \frac{a+x^*}{\beta_x} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} \right] (a+x); \\
v_z^-(y) &= W_{\square y}^- + \left[\frac{\alpha_y}{2\beta_y} + \left(\frac{\alpha_y^2}{4\beta_y^2} + \frac{h-y^*}{\beta_y} \frac{dP}{dz} \right)^{1/2} \right] (h+y).
\end{aligned} \tag{38}$$

Умови безперервності швидкості дозволили отримати рівняння ліній (39), що розмежують ці ділянки, на підставі чого запропоновано способи визначення форми розмежувальних ліній.

$$\begin{aligned}
y = h - \frac{(W_{\square x}^+ - W_{\square y}^+) + R \cdot a}{M} - \frac{R}{M} x; & \quad y = -h - \frac{(W_{\square x}^+ - W_{\square y}^-) + R \cdot a}{N} - \frac{R}{N} x; \\
y = h - \frac{(W_{\square x}^- - W_{\square y}^+) + S \cdot a}{M} + \frac{S}{M} x; & \quad y = -h + \frac{(W_{\square x}^- - W_{\square y}^-) + S \cdot a}{N} + \frac{S}{N} x.
\end{aligned} \tag{39}$$

П'ятий розділ присвячено моделюванню течії ступеневої рідини в каналах хіміко-технологічного обладнання. Для побудови виражень визначення місцевих опорів при течії ступеневої рідини у ступінчастому каналі та в повороті (які є найбільш поширеними в технологічному обладнанні), проаналізовано поведіння течії ньютонівської рідини в каналах з аналогічними гідравлічними опорами. Використовуючи відомі вираження, за допомогою методу аналогії, побудовано формули для опису гідравлічних опорів, при звуженні каналу (40) та розширенні каналу (41):

$$\zeta_M = 0,5 \left(1 - \frac{S_1}{S_2} \right)^{\frac{3}{4}} + \frac{15}{\sqrt{\text{Re}}} \cdot \left[1 - f_1 \left(\text{Re}, \frac{S_1}{S_2} \right) \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]. \tag{40}$$

$$\zeta_M = \left(1 - \frac{S_1}{S_2} \right)^2 + \frac{9}{\sqrt{\text{Re}}} \cdot \left[1 - f_2 \left(\text{Re}, \frac{S_1}{S_2} \right) \cdot \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]. \tag{41}$$

Наведені формули представлені у вигляді суми величин, що пов'язані з прискоренням або з уповільненням потоку, якщо є звуження або розширення, і поворотом потоку на деякий кут. Прискоренню або уповільненню відповідають перші доданки, а повороту ліній струму – другі доданки виражень (40, 41). Частина енергії, яка витрачається на поворот, є пропорційною величині кута повороту f_1 , який можна виразити

через поперечні розміри каналу та довжину відрізка лінії струму при повороті за допомогою співвідношення

$$f \sim \arcsin \frac{[1 - (S_1/S_2)^{1/2}]}{(Re)^m} \quad (42)$$

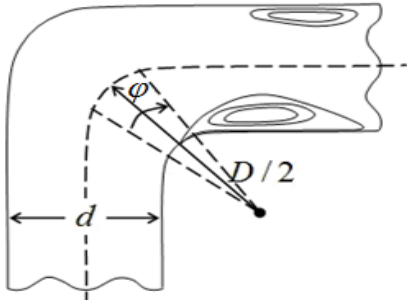


Рис. 13. Течія рідини у ділянці повороту.

Течія ньютонівської рідини при повороті визначається дією відцентрової сили, що викликає вторинні вихрові течії та обертання рідини. Так, цю течію представлено, як течію зі звуженням та розширенням із відокремленням від неї вторинної течії (рис. 13). Використовуючи принцип аналогії, для різних випадків числа Рейнольдса отримано формули для визначення місцевих опорів:

Для поворотів із малим радіусом закруглення

Для поворотів із великим радіусом закруглення

Для випадку $500 \leq Re \leq 6000$

$$\zeta_m \approx \frac{25\phi}{\left(Re \sqrt{\frac{d}{D}}\right)^{0,5}} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0,58}$$

$$\zeta_m \approx \frac{35\phi}{\left(Re \sqrt{\frac{d}{D}}\right)^{0,5}} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0,28} \quad (43)$$

Для випадку $6000 \leq Re \leq 40000$

$$\zeta_m \approx \frac{5\phi}{\left(Re \sqrt{\frac{d}{D}}\right)^{0,25}} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0,45}$$

$$\zeta_m \approx \frac{7\phi}{\left(Re \sqrt{\frac{d}{D}}\right)^{0,25}} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0,23} \quad (44)$$

Для визначення місцевих опорів, у випадку течії ступеневої рідини, в наведених рівняннях залежність від числа Re , яке визначене для ньютонівської рідини, підставлено число Рейнольдса для ступеневої рідини, яке визначено за формулами

$$Re_n = \frac{d^n v^{2-n} \rho}{\frac{\mu_0}{8} \left(6 + \frac{2}{n}\right)^n}, \quad \mu = \mu_0 \dot{\epsilon}^{n-1} \quad (45)$$

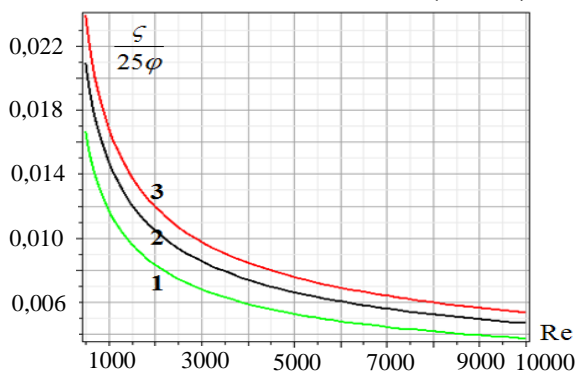


Рис. 14. Залежність коефіцієнта опору при повороті течії від числа Рейнольдса з різним радіусом закруглення при значеннях:

$$1 - \frac{d}{D} = 0,05; \quad 2 - \frac{d}{D} = 0,10; \quad 3 - \frac{d}{D} = 0,15.$$

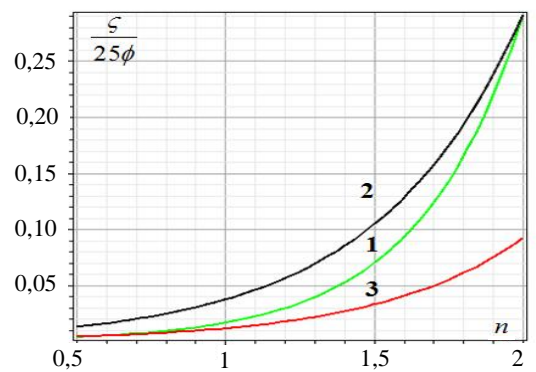


Рис. 15. Залежність коефіцієнта опору при повороті течії від індексу n за різних параметрів та значень:

$$1 - \frac{d}{D} = 0,05, \quad \mu_0 = 10^{-2}, \quad \rho_0 = 10^3, \quad \nu = 0,5, \quad d = 10^{-2};$$

$$2 - \frac{d}{D} = 0,05, \quad \mu_0 = 10^{-2}, \quad \rho_0 = 10^3, \quad \nu = 0,1, \quad d = 10^{-2};$$

$$3 - \frac{d}{D} = 0,05, \quad \mu_0 = 10^{-3}, \quad \rho_0 = 10^3, \quad \nu = 0,1, \quad d = 10^{-2}.$$

На рис. 14 наведено графік розрахункової залежності коефіцієнта опору повороту від числа Рейнольда за різних співвідношень діаметра кола повороту труби при течії ньютонівської рідини. Розрахункові залежності коефіцієнта опору при повороті від індексу n течії степеневі рідини наведено на рис. 15.

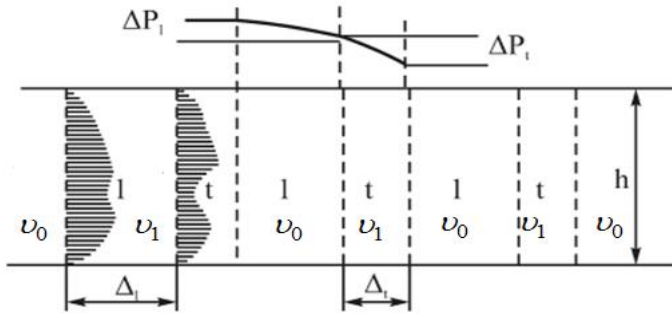


Рис 16. Перехідний рух у трубі.

ності смуг, що чергуються. При перехідному режимі профіль швидкості є періодичною функцією поздовжньої координати та змінюється від ламінарного стабілізованого до турбулентного стабілізованого режимів. Профіль швидкості параметрично залежить від двох довжин стабілізації і описується за допомогою експонентних множників, показники ступеня яких визначаються відношенням довжини ламінарної та турбулентної ділянок течії та довжини стабілізації відповідного режиму руху і пов'язані між собою відношенням

$$\begin{aligned} v_0 \rightarrow v_1 &= v_0 e^{-\Delta_l/L_l} + v_l^\infty \cdot (1 - e^{-\Delta_l/L_l}), v_1 \rightarrow v_0 = v_1 e^{-\Delta_t/L_t} + v_t^\infty \cdot (1 - e^{-\Delta_t/L_t}), \\ v_0 &= \frac{v_l^\infty e^{-\Delta_t/L_t} \cdot (1 - e^{-\Delta_l/L_l}) + v_t^\infty \cdot (1 - e^{-\Delta_t/L_t})}{1 - e^{\left(\frac{-\Delta_t}{L_t} - \frac{\Delta_l}{L_l}\right)}}, \quad v_1 = v_0 e^{-\Delta_l/L_l} + v_l^\infty \cdot (1 - e^{-\Delta_l/L_l}). \end{aligned} \quad (46)$$

Для визначення довжини стабілізації профілів швидкостей, що чергуються, обчислено профіль швидкості течії на кінцях ламінарної і турбулентної ділянок, за формулами (47, 48) залежно від початку режиму течії та парності або непарності течії:

Початок турбулентний:

$$\begin{aligned} N = 2k: \quad v_n &= v_H e_l^k e_t^k + [v_l^\infty \cdot (1 - e_l)] \cdot \frac{1 - e_l^k e_t^k}{1 - e_l e_t} + [v_t^\infty \cdot (1 - e_t) e_l] \cdot \frac{1 - e_l^k e_t^k}{1 - e_l e_t}, \\ N = 2k + 1: v_n &= v_H e_l^k e_t^{k+1} + [v_l^\infty \cdot (1 - e_l) e_t] \cdot \frac{1 - e_l^k e_t^k}{1 - e_l e_t} + [v_t^\infty \cdot (1 - e_t)] \cdot \frac{1 - e_l^k e_t^k}{1 - e_l e_t}. \end{aligned} \quad (47)$$

Початок ламінарний:

$$\begin{aligned} N = 2k: \quad v_n &= v_H e_l^k e_t^k + [v_l^\infty \cdot (1 - e_l^k) e_t^k] \cdot \frac{1 - e_l^k e_t^k}{1 - e_l e_t} + [v_t^\infty \cdot (1 - e_t^k)] \cdot \frac{1 - e_l^k e_t^k}{1 - e_l e_t}, \\ N = 2k + 1: v_n &= v_H e_l^{k+1} e_t^k + [v_l^\infty \cdot (1 - e_l)] \cdot \frac{1 - e_l^k e_t^k}{1 - e_l e_t} + [v_t^\infty \cdot (1 - e_t) e_l] \cdot \frac{1 - e_l^k e_t^k}{1 - e_l e_t}. \end{aligned} \quad (48)$$

У загальному вигляді довжина стабілізації перехідного режиму в трубі має вигляд:

$$L_{lt} = k \cdot (\Delta_l + \Delta_t). \quad (49)$$

Ламінарним і турбулентним ділянкам відповідають перепади тисків, між якими існує зв'язок, що виникає з умови рівності витрати течії на ламінарних і турбулентних ділянках:

$$\Delta P_l = \frac{12\mu}{h^3} \Delta_l \cdot \left(\frac{h^3 \Delta P_t}{2k_{Pr}^2 \rho \Delta_t} \right)^{1/2} \cdot \ln \left[\frac{h}{(\mu/\rho)} \left(\frac{h \Delta P_t}{2\rho \Delta_t} \right)^{1/2} \right], \quad (50)$$

де k_{Pr} – постійна Прандтля пристінної турбулентності;

$$\Delta P_t = \left\{ -\frac{6\mu}{h^3} \cdot \left(\frac{h^3}{2 \cdot 0,4^2 \rho \Delta_t} \right) \Delta_l \cdot \ln \left[\frac{h}{(\mu/\rho)} \left(\frac{h \Delta P_t}{2\rho \Delta_t} \right)^{1/2} \right] + \right. \\ \left. + \sqrt{\frac{36\mu^2}{h^3} \cdot \left(\frac{h^3}{2 \cdot 0,4^2 \rho \Delta_t} \right)^2 \Delta_{ll}^2 \cdot \ln^2 \left[\frac{h}{(\mu/\rho)} \left(\frac{h \Delta P_t}{2\rho \Delta_t} \right)^{1/2} + \frac{2}{N} (P_K - P_H) \right]} \right\}^2. \quad (51)$$

Визначення коефіцієнта опору тертя та місцевих опорів проводилось шляхом вираження їх через коефіцієнти опору тертя та місцевих опорів для ламінарної та турбулентної ділянок розвинутих течій, які є добре визначеними в гідравліці. Виражаючи втрати тиску на подолання тертя через втрати в кожній ділянці кінцеві формули мають вигляд:

$$\lambda_l^* = \lambda(\text{Re}^*), \quad \lambda_l^{**} = \lambda(\text{Re}^{**}), \quad \lambda_{lt} = \frac{\lambda_l^* \cdot \Delta_l + \lambda_l^{**} \cdot \Delta_t}{\Delta_l + \Delta_t}, \quad (52)$$

$$\zeta_l^* = \zeta(\text{Re}^*), \quad \zeta_l^{**} = \zeta(\text{Re}^{**}), \quad \zeta_{lt} = \frac{\zeta_l^* \Delta_l + \zeta_l^{**} \Delta_t}{\Delta_l + \Delta_t}, \quad (53)$$

де λ_l^* , ζ_l^* – коефіцієнти опору тертя та місцевих опорів на ламінарній ділянці сталої течії; λ_l^{**} , ζ_l^{**} – коефіцієнти опору тертя та місцевих опорів на турбулентній ділянці сталої течії.

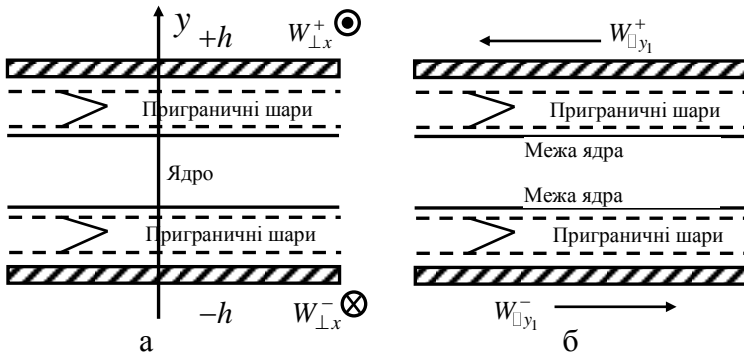


Рис. 17. Приграничні шари при течії в'язкопластичної рідини в пласкому каналі: а – вид поперек каналу; б – вид уздовж каналу.

Опис гідравліки перехідної течії неньютонівської рідини доповнено описом теплообміну між течією і стінкою труби. Для обчислення коефіцієнтів тепловіддачі представлено рівняння конвективного переносу температури записано в наближенні теплового приграничного шару так, що у правій його частині збережена тільки поперечна похідна за змінною y . Координата x вважається спрямованою вздовж дотичної компоненти швидкості рідини (рис. 17). У випадку течії в'язкопластичної рідини, слід у рівнянні (54) використовувати

розкладання першого і другого доданків відповідно за малою величиною відстані до твердої поверхні

$$v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad \chi = \frac{\lambda}{\rho c_p}, \quad \tilde{y} = \pm h \mp y. \quad (54)$$

Якщо означити цю відстань через \tilde{y} , то для визначення швидкості в'язкопластичної рідини поблизу твердого ядра (55), а біля границі каналу (56):

$$v_x = v_k + \frac{\partial^2 v_x}{\partial \tilde{y}^2} \tilde{y}^2. \quad (55)$$

$$v_x = W_r + \frac{\partial v_x}{\partial \tilde{y}} \tilde{y}. \quad (56)$$

Числа Нуссельта визначалися похідними дотичної швидкості на стінках каналів і на границі твердого ядра для в'язкопластичної рідини у вигляді:

$$\text{Nu} = \frac{8}{15} \frac{h}{L^{1/4}} \left(\frac{1}{\chi} \frac{\partial v_x}{\partial \tilde{y}} \right)^{1/4}, \quad \text{Nu} = \frac{2^{2/3}}{3} \cdot \frac{h}{L^{1/3}} \left(\frac{1}{\chi} \frac{\partial v_x}{\partial \tilde{y}} \right)^{1/3}. \quad (57)$$

Для обчислення коефіцієнтів тепловіддачі при течії узагальнено-зрушеної рідини визначено профіль швидкості поздовжньої течії в пласкому каналі за формулою (58). При цьому взято до уваги те, що в пласкому каналі в поздовжній і поздовжньо-поперечній течіях є два коефіцієнти тепловіддачі

$$v_z^\pm = \frac{\alpha(h \mp y)}{\beta} + \frac{2}{3} \left(\frac{\alpha^2}{4\beta^2} \pm \frac{y^* - y}{\beta} \frac{dP}{dz} \right)^{3/2} \cdot \frac{\beta}{dP/dz} - \frac{2}{3} \left(\frac{\alpha^2}{4\beta^2} + \frac{h \mp y^*}{\beta} \frac{dP}{dz} \right) \cdot \frac{\beta}{dP/dz} + W^\pm. \quad (58)$$

Для поздовжньої течії в прямокутному каналі існує чотири коефіцієнти тепловіддачі. Обчислення швидкості поздовжньої течії в прямокутному каналі зводиться до формули з відповідними значеннями α_i , β_i , x_i^*

$$v_{zi}^\pm = \frac{\alpha_i}{2\beta_i} (l_i \mp x_i) + \frac{2}{3} \left(\frac{\alpha_i^2}{4\beta_i^2} \pm \frac{x_i x_i^*}{\beta_i} \frac{dP}{dz} \right)^{3/2} \cdot \frac{\beta_i}{dP/dz} - \frac{2}{3} \left(\frac{\alpha_i^2}{4\beta_i^2} + \frac{\alpha_i \mp x_i^*}{\beta_i} \frac{dP}{dz} \right)^{3/2} \cdot \frac{\beta_i}{dP/dz}. \quad (59)$$

Визначення швидкості поздовжньої течії ступеневої рідини з показником n обчислювалось за формулою

$$v_z^\pm = \left| \frac{y - y^*}{\beta} \cdot \frac{dP}{dz} \right|^{\frac{n+2}{n+1}} \cdot \frac{n+1}{n+2} \frac{\beta}{dP/dz} - \left| \frac{h \mp y^*}{\beta} \cdot \frac{dP}{dz} \right|^{\frac{n+2}{n+1}} \cdot \frac{n+1}{n+2} \frac{\beta}{dP/dz} + W^\pm. \quad (60)$$

У шостому розділі подано результати, що спрямовані на оцінку вірогідності запропонованих теоретичних моделей течії в каналах хіміко-технологічного обладнання. Перевірка відповідності моделі течії здійснювалась за допомогою експериментальних досліджень, з використанням різних матеріалів, реологічні характеристики яких приймали різні за величинами значення в'язкості та граничного напруження зрушення. Для проведення досліджень гідравлічних характеристик розроблено та виготовлено експериментальний стенд (патент України на корисну модель № 80033). На експериментальному стенді (рис. 18) досліджувались наступні характеристики: тиск, температура, витрати та потужність. Як об'єкти досліджень характеристик течії неньютонівських рідин обрано матеріали, які завдяки своїм властивостям дали змогу найбільш повно оцінити макродинамічні та макрокінетичні характеристики течії рідин в реальних умовах експерименту.

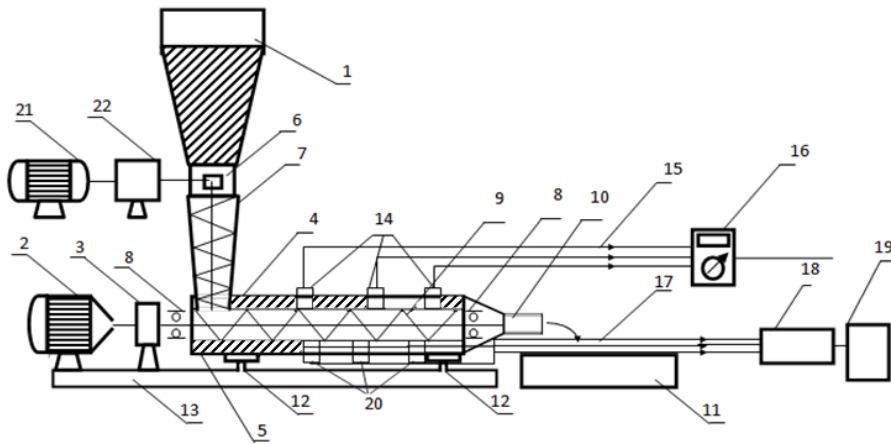


Рис.18. Пристрій для вимірювання гідравлічних характеристик течії:
 1 – завантажувальний бункер; 2 – електродвигун; 3 – редуктор; 4 – шнековий нагнітач; 5 – охолоджуюча сорочка; 6 – з'єднувальна труба; 7 – живильник-дозатор; 8 – підшипникові вузли; 9 – черв'як; 10 – мундштук; 11 – приймальна ємність; 12 – опори; 13 – опорна рама; 14 – термопари; 15 – дроти термопар; 16 – вольтметр; 17 – дроти; 18 – тензопідсилювач; 19 – самописний прилад; 20 – тензодатчики; 21 – електродвигун; 22 – редуктор.

Для перевірки адекватності отриманих експериментальних даних із висновками побудованих теоретичних моделей проведено чисельний розрахунок основних гідродинамічних характеристик течії в'якопластичної рідини. Уважаючи, що у черв'ячному пристрої канали є близькими до плоского, то для розрахунків застосовувалися вищезазначені теоретичні моделі течії. Після проведення відповідних перетворень, отримано формули для визначення величини витрати рідини черв'ячного пристрою: для черв'яка із кроком $t_B = 86 \text{ мм}$ і глибиною каналу $2h = 7 \text{ мм}$ формула

$$\dot{V} = 33,2 \times N \left\{ 1 + \frac{0,63\gamma}{(1-\gamma)^2} \right\} \times \frac{0,60(1-\gamma/7,14)}{1 + 0,60 \times (1-\gamma/7,14)/(1-\gamma)}, \quad \gamma = \frac{1,31}{\mu_0 W^+ / h\tau_0}. \quad (61)$$

для черв'яка із кроком $t_B = 132 \text{ мм}$ і глибиною каналу $2h = 14 \text{ мм}$

$$\dot{V} = 83,5 \times N \left\{ 1 + \frac{0,67\gamma}{(1-\gamma)^2} \right\} \times \frac{0,68(1-\gamma/5,80)}{1 + 0,68 \times (1-\gamma/5,80)/(1-\gamma)}, \quad \gamma = \frac{1,31}{\mu_0 W^+ / h\tau_0}. \quad (62)$$

Повна потужність черв'ячного пристрою визначається, як сума потужностей холостого ходу, переміщення матеріалу, теплової дисипації в каналі черв'яка та в трубці мундштука і представлена формулами:

$$W_{\text{трансп.}} = 0,36 \cdot 10^{-4} \frac{\mu_0 \dot{V}^2}{0,68 \times \frac{1-\gamma_1/5,80}{1-\gamma_1}},$$

$$W_{\text{дис. черв.}} = 5,94 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\mu_0} \left\{ \frac{\mu_0 \dot{V}}{0,60 \times \frac{1-\gamma_1/7,14}{1-\gamma_1}} \right\}^2 \times \left[(1-\gamma_1^+)^3 + (1+\gamma_1^-)^3 \right], \quad (63)$$

$$W_{\text{дис. мундшт.}} = 0,22 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\mu_0} \left\{ \frac{\mu_0 \dot{V}}{0,68 \times \frac{1-\gamma_1/5,80}{1-\gamma_1}} \right\}^2 \times 2(1-\gamma_1/5,80)^3.$$

Графіки залежності витрат та потужності від частоти обертання черв'яка наведено на рис. 19, 20. Отримані експериментальні значення порівняні з розрахунковими даними і знаходяться у межах припустимої погрішності і підтверджують адекватність математичних моделей.

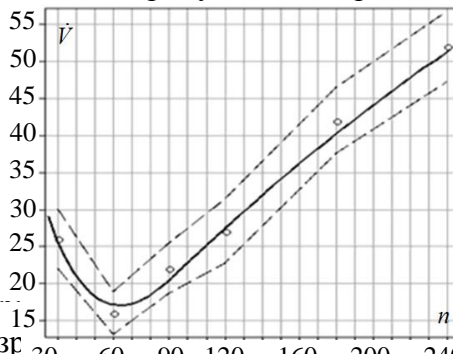


Рис. 19. Показує залежність витрат \dot{V} від частоти обертання черв'яка n . \circ – експериментальні дані.

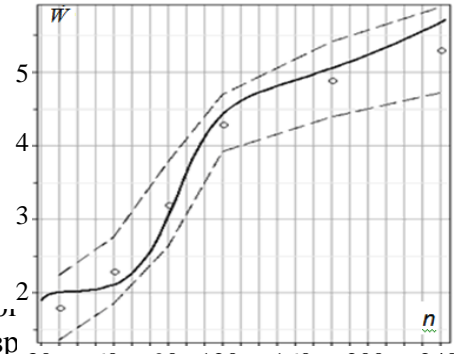


Рис. 20. Показує залежність потужності W від частоти обертання черв'яка n . \circ – експериментальні дані.

Для вимірювання реологічних характеристик неньютонівських рідин в пласкому каналі розроблено та виготовлено експериментальний стенд (рис. 21), який дозволив дослідити та адекватно оцінити в'язкість і граничне напруження зрушення (патент України на корисну модель № 80031).

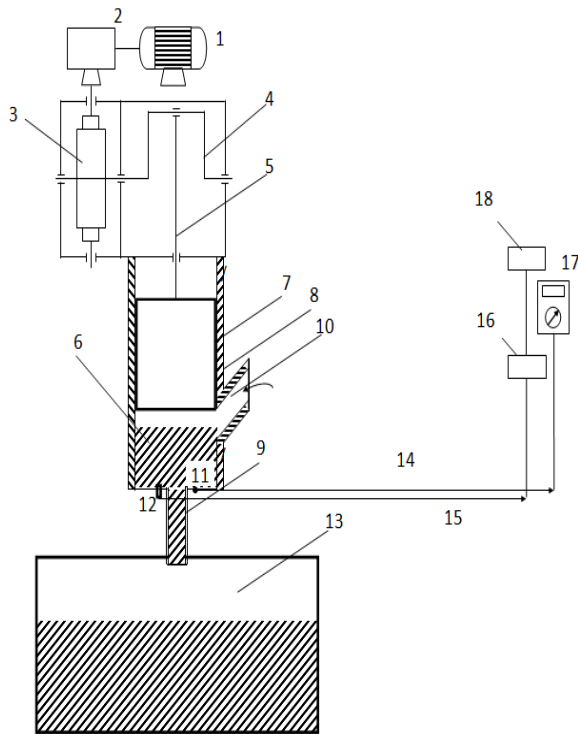


Рис. 21. Пристрій для вимірювання реологічних характеристик неньютонівських матеріалів: 1 – електродвигун; 2 – редуктор; 3 – черв'ячний редуктор; 4 – колінчатий вал; 5 – шток; 6 – живильний циліндр; 7 – поршень; 8 – охолоджуюча сорочка; 9 – капіляр; 10 – завантажувальна воронка; 11 – термопара; 12 – тензодатчик; 13 – приймальна ємність; 14 – дріт термопари; 15 – дріт тензодатчика; 16 – тензопідсилювач; 17 – вольтметр; 18 – самописний прилад.

Визначення реологічних характеристик в'язкості μ_0 та граничного напруження зрушення τ_0 визначалися шляхом вимірювання величин витрат і тисків у пристрої для виміру реологічних характеристик з розв'язанням системи рівнянь:

$$\begin{aligned} V_n^1 &= \frac{\pi r_0^3 P_n^{(1)}}{8\mu_0 L_n} \left(1 - \frac{2L_n \tau_0}{r_0 P_n^{(1)}} \right), \\ V_n^2 &= \frac{\pi r_0^3 P_n^{(2)}}{8\mu_0 L_n} \left(1 - \frac{2L_n \tau_0}{r_0 P_n^{(2)}} \right), \\ \tau_0 &= \frac{r_0}{2L} \cdot \frac{\dot{V}^{(1)} P^{(2)} - \dot{V}^{(2)} P^{(1)}}{\dot{V}^{(1)} - \dot{V}^{(2)}}, \\ \mu_0 &= \frac{\pi r_0^4}{8L} \cdot \frac{P^{(1)} - P^{(2)}}{\dot{V}^{(1)} - \dot{V}^{(2)}}. \end{aligned} \quad (64)$$

Отримані експериментальні значення в'язкості та напруження зрушення порівняні з розрахунковими даними і знаходяться у межах припустимої похибки.

Для вимірювання втрати тиску на ділянках розширення, звуження та повороту труби розроблено та виготовлено експериментальний стенд для вимірювання гідравлічних місцевих опорів (рис. 22) (патент України на корисну модель №80032). За допомогою даного пристрою проведено вимірювання гідравлічного опору кремнійорганічної рідини ПМС-5 та визначено величини місцевого опору за формулою

$$\xi_n = (P_{\text{після}} - P_{\text{до}}) / (\rho_{\text{тн}} W^2 / 2), \quad (65)$$

де $P_{\text{після}}$ та $P_{\text{до}}$ – значення тисків до та після проходження місцевого опору, Па; $\rho_{\text{тн}}$ – густина теплоносія, кг/м³.

Результати визначення коефіцієнтів місцевих опорів при течії кремнійорганічних (ступеневих) рідин та порівняння з експериментальними даними наведені на рис. 23, 24.

При обробці отриманих експериментальних даних застосовувалися методи регресійного та дисперсійного аналізу, а також критерії перевірки статистичних гіпотез. Розбіжність між теоретичними прогнозами та експериментальними даними оцінювалася методами дисперсійного аналізу з застосуванням критерію Фішера. Обчислені фактичні значення критерію Фішера були більшими ніж теоретичні (критичні) на рівні значущості $\alpha \leq 0,05$ (тобто $P \geq 0,95$), що свідчить про адекватність отриманих математичних моделей реальним умовам.

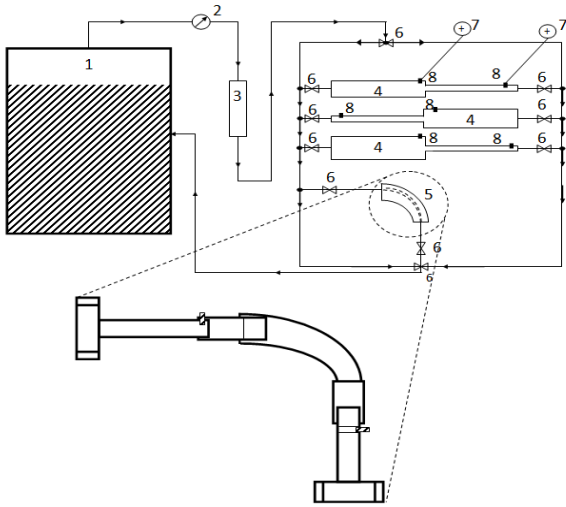


Рис. 22. Пристрій для вимірювання гідравлічних місцевих опорів ступеневих рідин: 1 – живильний циліндр; 2 – насос; 3 – ротаметр; 4 – система труб змінного діаметра; 5 – поворот; 6 – вентиля; 7 – манометри; 8 – пробки для вводу манометричних трубок.

Рис. 23. Залежність коефіцієнта місцевого опору ξ_M від числа Рейнольдса Re_n для ступеневих рідин.

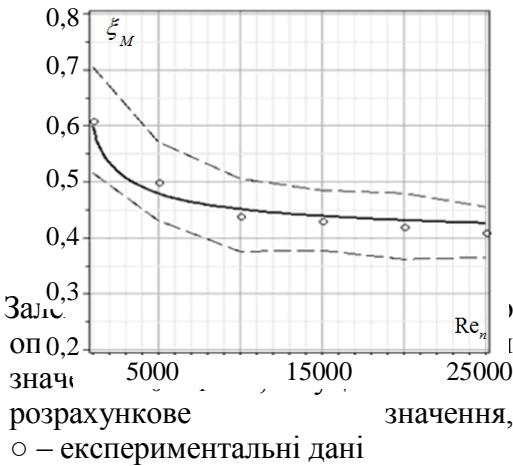


Рис. 23. Залежність коефіцієнта місцевого опору ξ_M від числа Рейнольдса Re_n для ступеневих рідин. \circ – експериментальні дані

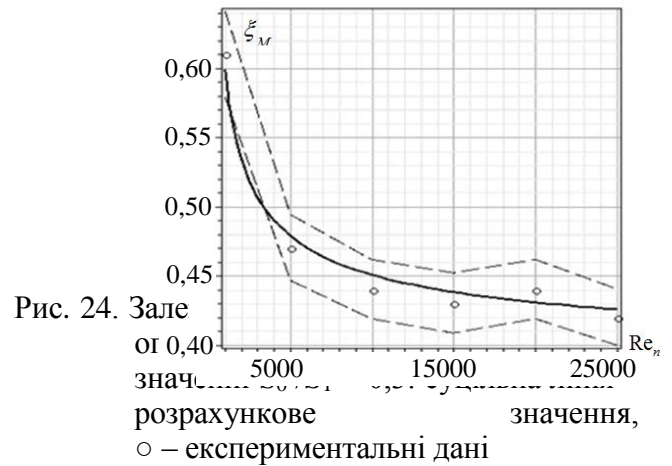


Рис. 24. Залежність коефіцієнта місцевого опору ξ_M від числа Рейнольдса Re_n для ступеневих рідин. \circ – експериментальні дані

У цьому розділі запропоновано методику інженерних розрахунків для різних випадків теплообміну при течії в'язкопластичної, узагальнено-зрушеної та ступеневої рідин. Сформульовано та вирішено рівняння для визначення коефіцієнта теплопередачі при течії в'язкопластичної рідини в плоскому каналі, який занурено в тепловий резервуар:

$$K^{\pm} = \frac{1}{\frac{\delta_e}{\lambda_e} + \frac{1}{\alpha_i^{\pm}} + \frac{1}{\alpha_e^{\pm}}} \text{ – для текучої частини; } K_k^{\pm} = \frac{1}{\frac{\Gamma^{\pm}}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_k^{\pm}}} \text{ – для ядра.} \quad (66)$$

У прямокутному каналі з довільним розподілом швидкостей (67), з заданими температурами стінок каналу коефіцієнти теплопередачі визначалися таким чином:

для текучої частини:

для ядра:

$$K_y^{\pm} = \frac{1}{\frac{\delta_e}{\lambda_e} + \frac{1}{\alpha_{iy}^{\pm}} + \frac{1}{\alpha_{ey}^{\pm}}}, \quad K_x^{\pm} = \frac{1}{\frac{\delta_e}{\lambda_e} + \frac{1}{\alpha_{ix}^{\pm}} + \frac{1}{\alpha_{ex}^{\pm}}}; \quad K_{ky}^{\pm} = \frac{1}{\frac{\Gamma_y^{\pm}}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_{ky}^{\pm}}}, \quad K_{kx}^{\pm} = \frac{1}{\frac{\Gamma_x^{\pm}}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_{kx}^{\pm}}}. \quad (67)$$

Встановлено, що у випадку течії в'язкопластичної рідини в пласкому каналі необхідно задавати шість коефіцієнтів тепловіддачі, а в прямокутному дванадцять.

Визначення коефіцієнта теплопередачі при течії узагальнено-зрушеної рідини в каналі, що занурено в тепловий резервуар описується залежностями:

а) для плаского каналу

б) для прямокутного каналу

$$K_e^{\pm} = \frac{1}{\frac{\delta_{ee}}{\lambda_{ee}} + \frac{1}{\alpha_e^{\pm}} + \frac{1}{\alpha_{ee}^{\pm}}}. \quad (68) \quad K_{ey}^{\pm} = \frac{1}{\frac{\delta_{ee}}{\lambda_{ee}} + \frac{1}{\alpha_{ey}^{\pm}} + \frac{1}{\alpha_{eey}^{\pm}}}, \quad K_{ex}^{\pm} = \frac{1}{\frac{\delta_{ee}}{\lambda_{ee}} + \frac{1}{\alpha_{ex}^{\pm}} + \frac{1}{\alpha_{eex}^{\pm}}}. \quad (69)$$

де δ_{ee} – товщини стінок прямого каналу та теплового резервуара або каналу, що обгортається, відповідно, м; λ_{ee} – коефіцієнти теплопровідності речовини стінок прямого каналу, теплового резервуара або каналу, що обгортає, відповідно, Дж/м⁰С.

При отриманні рішення встановлено, що при течії в пласкому каналі необхідно задавати чотири коефіцієнта тепловіддачі, при течії в прямокутному каналі – вісім коефіцієнтів.

Числа Нуссельта для течії, біля ядра течії і біля стінок каналу визначалися через окремі похідні швидкості в каналах різної геометричної форми формулами (70). Встановлено, що для в'язкопластичної течії біля ядра течії числа Нуссельта залежать від величини числа Пекле в ступені 1/4:

$$Nu = \frac{2^{2/3}}{3} \cdot \frac{(\pm h \mp \Gamma_h^{\pm})}{L^{1/3}} \left(\frac{1}{\chi} \frac{\partial^2 v^{\pm}}{\partial \xi_y^2} \right)^{1/4} \Bigg|_{\xi_y = \Gamma_y^{\pm}} \quad \text{– для стінок;} \quad (70)$$

$$Nu = \frac{2^{2/3}}{3} \frac{(\pm h \mp \Gamma_h^{\pm})}{L^{1/3}} \left[\frac{1}{\chi} \frac{\partial v^{\pm}}{\partial \xi_y} \right]^{1/3} \Bigg|_{\xi_y = \pm h} \quad Nu = \frac{2^{2/3}}{3} \frac{(\pm h \mp \Gamma_a^{\pm})}{L^{1/3}} \left[\frac{1}{\chi} \frac{\partial v^{\pm}}{\partial \xi_x} \right]^{1/3} \Bigg|_{\xi_x = \pm a} \quad \text{– для ядра.}$$

Для течії узагальнено-зрушеної рідини в каналах пласкої геометрії визначення числа Нуссельта відбувається на основі залежності:

$$Nu = \frac{2^{2/3}}{3} \cdot \frac{h}{L^{1/3}} \left(\frac{1}{\chi} \frac{\partial v_{\pm}^{\pm}}{\partial \xi_y} \right)_{\pm h}^{1/3}, \quad \xi_y = y/h; \quad Nu = \frac{2^{2/3}}{3} \cdot \frac{a}{L^{1/3}} \left(\frac{1}{\chi} \frac{\partial v_{\pm}^{\pm}}{\partial \xi_x} \right)_{\pm a}^{1/3}, \quad \xi_x = x/a,$$

(71)

Визначення числа Нуссельта для течії узагальнено-зрушеної рідини для стінок в каналах прямокутної геометрії має такий вигляд:

$$Nu = \frac{2^{2/3}}{3} \cdot \frac{h}{L^{1/3}} \left(\frac{1}{\chi} \frac{\partial v_{zy}^{\pm}}{\partial \xi_y} \right)_{\pm h}^{1/3}; \quad Nu = \frac{2^{2/3}}{3} \cdot \frac{a}{L^{1/3}} \left(\frac{1}{\chi} \frac{\partial v_{zy}^{\pm}}{\partial \xi_x} \right)_{\pm a}^{1/3}. \quad (72)$$

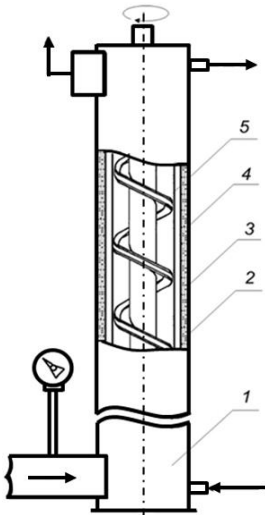


Рис. 25. Шнековий теплообмінник з проміжним кремнійорганічним охолодженням: 1 – корпус; 2 – пустотіла труба; 3 – кремнійорганічний теплоносій; 4 – труба; 5 – шнек.

теплообмінників, що дозволяє підвищити довговічність роботи агрегата та джерела передачі енергії, спростити експлуатацію та обслуговування, підвищити довговічність роботи.

Розроблено систему централізованого тепlopостачання теплових апаратів із застосуванням як проміжного теплоносія високотемпературної кремнійорганічної рідини (рис. 26), що циркулює всередині нагрівальної обо

Слід зазначити, що формули (71) та (72) відповідають випадку суто поздовжньої течії.

На підставі наведених розрахунків та отриманих методик було розроблено блок-схему для проведення гідродинамічних та теплових розрахунків течії в каналі, яка дозволяє за допомогою спеціального програмного забезпечення, визначити основні закономірності макродинамічних та мікрокінетичних параметрів з урахуванням енергоефективності апаратів.

На основі проведених досліджень та наведених інженерних методик розроблено конструкції технологічного обладнання, яке має перспективу практичного застосування на підприємствах харчової та хімічної індустрії.

Розроблено конструкцію шнекового теплообмінника для транспортування бінгамовського матеріалу з застосуванням кремнійорганічних рідин, як проміжного холодоносія (рис. 25). Використання як проміжного холодоносія, кремнійорганічної рідини дозволяє усунути руйнівну дію розчину CaCl_2 на конструктивні елементи шнекових

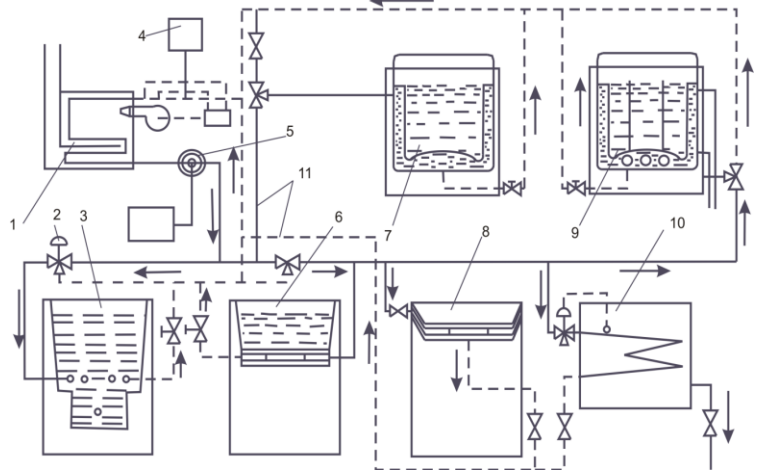


Рис. 26. Система централізованого тепlopостачання теплових апаратів із проміжним кремнійорганічним теплоносієм: 1 – газовий теплогенератор; 2 – вентилі терморегулювальні; 3 – фритюрниця; 4 – розширювальна ємність; 5 – насос; 6 – плита; 7 – стравоварильний котел; 8 – універсальний жарильний пристрій; 9 – марміт; 10 – підігрівач води; 11 – система трубопроводів.

лонки апаратів з температурою 293...573 К за умов тиску в системі в межах 50 кПа. Це дало змогу отримати сучасну енергоекономічну систему централізованого теплопостачання теплових апаратів з проміжним теплоносієм, яка дозволяє проводити теплову обробку у широкому діапазоні температур, усунути небезпеку вибуху проміжного теплоносія, забезпечити надійність та безпечність роботи теплових апаратів. Новизна запропонованих технічних рішень підтверджена патентами України (№ 52068, № 36262, № 23495, № 38821).

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримано науково обґрунтовані та експериментально підтверджені результати вирішення науково-прикладної проблеми, яка полягає в обґрунтуванні адекватних аналітичних моделей реодинаміки та теплообміну ньютонівських рідин у каналах складної геометрії, що приводить до нової якості проектування відповідного технологічного обладнання хімічної та харчової промисловості у напрямку зниження питомих енерговитрат та матеріалоемності.

Отримані науково-практичні результати полягають у наступному:

1. На основі аналізу науково-технічних джерел встановлено, що феноменологічні залежності для опису течії ньютонівських рідин обмежуються вивченням простих одновимірних течій та використовуються в досить вузькому діапазоні й не враховують усі параметри процесу. Обґрунтовано, що розробка тривимірних моделей течії в каналах складної геометрії з урахуванням функціональних зв'язків між основними параметрами процесу, є пріоритетним науковим підґрунтям для визначення оптимальних параметрів течії ньютонівських матеріалів у каналах хіміко-технологічного обладнання.

2. Розвинуто теоретичні методи моделювання течії ньютонівських рідин у трубах і каналах різної геометрії із границями, що рухаються, та різницею тисків на кінцях каналу на підставі методу суперпозиції, який дозволяє звести рішення задачі течії більшої розмірності до рішення задачі меншої розмірності. Обґрунтовано, що поздовжні та поперечні течії зводяться до сукупності однотипних поздовжніх одновимірних течій і дозволяють описувати тривимірні течії в прямокутному каналі та двовимірні – в пласкому каналі з довільною величиною відношення сторін, що дає змогу значно спростити розрахунки для визначення режимних характеристик течії рідини.

3. Обґрунтовано та отримано аналітичне рішення задачі в'язкопластичної течії в пласкому та прямокутному каналах та запропоновано розрахункові формули для визначення макродинамічних та макрокінетичних характеристик течії. Побудовано формули, що описують течію з довільними значеннями швидкості на границях каналу та довільними величинами відношення сторін прямокутника, що знаходиться в перетині каналу.

4. Проаналізовано і узагальнено існуючі різноманітні феноменологічні моделі матеріалів, які мають залежність в'язкості від швидкості зрушення. Використано єдиний алгоритм розрахунків та запропоновано узагальнюючий термін – «узагальнено-зрушені» рідини. Отримано профілі поздовжньої швидкості та визначено характер залежності швидкості та витрати течії від градієнта тиску для напірної поздовжньої течії рідини, в'язкість якої монотонно зростає, зменшується і має особливість при деякому значенні швидкості зрушення. Побудовано поле течії та обчислено зміни тиску

вздовж каналу, витрати і питому енергію дисипації поздовжньої течії в пласкому та прямокутному каналах із границями, що рухаються.

5. Теоретично та експериментально досліджено модель течії ступеневої (кремнійорганічної) рідини в каналах та визначено коефіцієнти місцевих опорів у вигляді єдиних формул для широкого діапазону чисел Рейнольдса.

6. На підставі використання методу аналогій запропоновано модель перехідної течії неньютонівської рідини та визначено коефіцієнти тертя та місцевих опорів, довжини ламінарної та турбулентної релаксації вхідного профілю швидкості потоку ступеневої рідини в каналах хіміко-технологічного обладнання.

7. Розвинуто теоретичні положення теплообміну неньютонівських рідин у складних тривимірних течіях у каналах з довільним розподілом швидкостей. Запропоновано методику розрахунку теплообмінних параметрів для основних випадків теплообміну: а) при заданій температурі стінок каналу; б) канал занурено в тепловий резервуар із заданою температурою; в) канал, який оточений обвідним каналом з теплоносієм. Для цих випадків обчислено коефіцієнти тепловіддачі для течій біля твердої границі каналу і ядра потоку для в'язкопластичної, узагальнено-зрушеної та ступеневої рідин.

Визначено числа Нуссельта та встановлено залежність від градієнта тиску для вказаних неньютонівських рідин у пласкій поздовжній течії. Визначено коефіцієнт теплопередачі на твердій границі в перехідному режимі течії.

8. Розроблено методики обчислення питомої енергії дисипації при течії в'язкопластичної, узагальнено-зрушеної та ступеневої рідин у пласкому та прямокутному каналах хіміко-технологічного обладнання. Наведений алгоритм дозволяє знайти температури рідини в каналі та теплоносія вздовж довжини плаского та прямокутного каналів для різних випадків теплообміну та коефіцієнти тепловіддачі одно-, дво- і тривимірних течій в'язкопластичної, узагальнено-зрушеної та ступеневої рідин із довільним розподілом швидкості на границях каналу (стінках).

9. Створено експериментальні стенди для дослідження макродинамічних та макрокінетичних параметрів течії неньютонівських рідин та підтверджено адекватність отриманих рівнянь реальним умовам проведення процесів хімічних та харчових виробництв.

Запропоновано блок-схему для проведення гідродинамічних та теплових розрахунків течії в каналі, яка дозволяє за допомогою спеціального програмного забезпечення визначити основні макродинамічні та макрокінетичні характеристики течії неньютонівських рідин у каналах хіміко-технологічного обладнання.

10. Розроблено конструкції технологічного обладнання для переробки хімічних, харчових неньютонівських матеріалів із застосуванням ступених (кремнійорганічних) рідин як проміжного теплоносія. Новизна технічного рішення підтверджена деклараційними патентами України.

11. Результати дослідження впроваджено Українським державним науково-дослідним вуглехімічним інститутом (м. Харків); ТОВ «Золочівське хлібоприймальне підприємство» (м. Золочів); ПАТ ХЛФЗ «Червоний хімік» (м. Харків). Розроблені наукові положення використовуються у навчальному процесі під час проведення лекційних та лабораторних занять на факультеті «Інтегровані технології та хімічна техніка» НТУ «ХПІ» та на кафедрі технології харчових виробництв ХТЕІ КНТЕУ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л. Л. Моделювання течій неньютонівських рідин у каналах базової геометрії : монографія / Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – 319 с. *Здобувачем проведено аналіз джерел інформації, розроблено методику моделювання течії в'язких матеріалів у плоских та прямокутних каналах, узагальнено результати досліджень.*
2. Білецький Е. В. Термостатирование готовых блюд на предприятиях питания / Е. В. Білецький // Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічне обґрунтування у підприємствах харчування : зб. наук. пр. у 2-х ч. – Х. : ХДАТОХ, 1998. – Ч.1. – С. 255-257.
3. Білецький Е. В. Применение кремнийорганических жидкостей в качестве промежуточных теплоносителей / Е. В. Білецький // Нові технології та удосконалення процесів харчових виробництв : зб. наук. пр. – Х. : ХДАТОХ, 1999. – С.195-198.
4. Білецький Е. В. Исследование температурного режима тэна в водной среде / Е. В. Білецький // Прогресивні технології та удосконалення процесів харчових виробництв : зб. наук. пр. у 2-х ч. – Х. : ХДАТОХ, 2000. – Ч.1. – С. 38-41.
5. Білецький Е. В. Пути оптимизации технологических процессов пищевых производств / Е. В. Білецький, О. А. Лопухіна // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Х. : НТУ«ХПІ», 2001. – №23. – С. 34-38. *Здобувачем обґрунтовано напрямки досліджень, щодо використання кремнійорганічних рідин, як теплоносія.*
6. Белецкий Э. В. Новый мармит / Э. В. Белецкий // Питание и общество. – 2002. – №5 – С. 25.
7. Білецький Е. В. Кремнійорганічні сполуки: ошадливість, ефективність / Е. В. Білецький, О. В. Петренко // Харчова та переробна промисловість. – 2003. – № 4. – С. 18. *Здобувачем обґрунтовано доцільність застосування кремнійорганічних речовин на різних стадіях технологічних процесів.*
8. Білецький Е. В. Аналіз проблеми удосконалення системи теплопостачання на малих підприємствах харчування / Е. В. Білецький // Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічне обґрунтування у підприємствах харчування : зб. наук. пр. у 2-х ч. – Х. : ХДУХТ, 2003. – Ч.1. – С. 223-227.
9. Білецький Е. В. Методика досліджень поверхневих властивостей кремнійорганічних рідин / Е. В. Білецький, О. В. Петренко // Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічне обґрунтування у підприємствах харчування : зб. наук. пр. у 2-х ч. – Х. : ХДУХТ, 2004. – Ч.1. – С. 367-371. *Здобувач взяв участь у складанні плану експерименту та статистичній обробці отриманих даних.*
10. Білецький Е. В. Метод гідравлічного розрахунку системи теплозабезпечення малих підприємств харчування / Е. В. Білецький // Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічне обґрунтування у підприємствах харчування : зб. наук. пр. у 2-х ч. – Х. : ХДУХТ, 2004. – Ч.2. – С. 271-276.
11. Білецький Е. В. Методика розрахунку системи обігріву устаткування для малих закладів харчування / Е. В. Білецький // Вісник КНТЕУ. – К. : КНТЕУ, 2006. – №6. – С. 91-97.
12. Білецький Е. В. Застосування кремнійорганічного теплоносія в системі обігріву електричної сковороди з проміжним теплоносієм / В. В. Сафонов, О. В. Петренко, Е. В. Білецький // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2007. – Вип. 1(5). – С. 341-346. *Здобувачем встановлено можливість використання кремнійорганічного*

теплоносія в системі обігріву завантажувальної чаши електричної сковороди.

13. Білецький Е. В. Застосування кремнійорганічного теплоносія в системі централізованого обігріву групи теплових апаратів / Е. В. Білецький, О. В. Петренко // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2008. – Вип. 1(7). – С. 208–213. *Здобувачем обґрунтовано можливість використання кремнійорганічного теплоносія в системі обігріву групи теплових апаратів.*

14. Білецький Е. В. Об определении коэффициентов трения и теплоотдачи для некоторых моделей неньютоновских жидкостей / Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський // Інтегровані технології та енергозбереження. – Х. : НТУ «ХП», 2010. – № 1. – С. 3-13. *Здобувачем проведено аналіз впливу теплообмінних параметрів на течію в'язкопластичних матеріалів та сформульовано висновки.*

15. Білецький Е. В. Модель в'язкопластичного бінгамовського плинину в прямокутному каналі / Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський // Обладнання та технології харчових виробництв. – Донецьк : ДонНУЕТ, 2010. – № 24. – С. 45-54. *Здобувачем обґрунтовано постановку задачі та запропоновано теоретичні закономірності моделі течії в каналі з рухомими границями.*

16. Білецький Е. В. Властивості сімейства функцій для опису в'язкопластичної течії і граничних умов течії / Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський // Харчова наука і технологія. – Одеса : ОНАХТ, 2010. – №1(10). – С. 104-105. *Здобувач взяв участь у розробці методики обчислень та узагальнив результати досліджень.*

17. Білецький Е. В. Система функцій для щільного в'язкопластичного плинину / Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2010. – Вип. 1(11). – С. 226-235. *Здобувачем сформульовано постановку задачі досліджень, запропоновано методика обчислень, сформульовано висновки.*

18. Білецький Е. В. Деякі плинні рідини з в'язкістю, що залежить від швидкості зсуву в плоскому каналі / Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський, Д. П. Семенюк // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2010. – Вип. (12). – С. 191-206. *Здобувачем сформульовано постановку задачі досліджень, узагальнено реологічні рівняння стану матеріалів, досліджено залежність в'язкості від швидкості зрушення.*

19. Білецький Е. В. Течія в'язкопластичної рідини в плоскому каналі / Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський, О. В. Петренко // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса : ОНАХТ, 2010. – №37(10). – С.122-126. *Здобувачем виконано теоретичну розробку моделі течії в'язкопластичної рідини в плоскому каналі з довільним розподілом швидкості на границях каналу.*

20. Білецький Е. В. Моделювання реологічних властивостей в'язкопластичних матеріалів у харчових технологіях / Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський // Товари і ринки. – Київ : КНТЕУ, 2010. – №2. – С. 68-77. *Здобувачем розроблено методика визначення макродинамічних показників течії в'язкопластичних матеріалів.*

21. Білецький Е. В. Модель движения сжимаемого бингамовского материала с показателями, зависящими от давления / Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський // Інтегровані технології та енергозбереження. – Х. : НТУ «ХП», 2011. – №1. – С. 67-75. *Здобувачем сформульовано постановку задачі досліджень, запропоновано формули, що описують течію з довільними значеннями швидкості на границях каналу.*

22. Білецький Е. В. Поздовжньо-поперечна течія неньютоновської рідини з

в'язкістю, що залежить від швидкості зрушення у прямокутному каналі шнекової машини / Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський, О. В. Петренко // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2011. – Вип. 1(13). – С.131-151. *Здобувачем одержано залежності в'язкості та напруження зрушення від тиску.*

23. Білецький Е. В. Течение неньютоновской жидкости в щелевом канале шнековой машины / Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський // Обладнання та технології харчових виробництв. – Донецьк : ДонНУЕТ, 2011. – № 26. – С. 3-16. *Здобувачем розроблено методику визначення координат та швидкості руху ядра в пласкому каналі.*

24. Білецький Е. В. Поздовжньо-поперечна течія неньютонівської рідини з в'язкістю, що залежить від швидкості зрушення у щілинному каналі шнекової машини / Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський // Харчова промисловість. – К. : НУХТ, 2011. – №10-11. – С. 258-266. *Здобувачем сформульовано постановку задачі, обчислені характеристики поздовжньої та поперечної складової течії.*

25. Білецький Е. В. Продольное течение жидкости с вязкостью, зависящей от скорости сдвига в прямоугольном канале шнековой машины / Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ : СНУ ім. Даля, 2011р. – №5 (159). – Ч.2 – С. 255-256. *Здобувачем отримано рівняння рівноваги та граничних умов течії рідин з в'язкістю, що залежить від швидкості зрушення в прямокутному каналі.*

26. Biletsky E. Methods of calculating the heat transfer between non-newtonian fluid and the environment / E. Biletsky, D. Semeniuk // Journal of technical university of Moldova and moldovian engineering association. – Chisinau : Meridian engineeresc, 2011. – № 4. – P. 43-48. *Здобувачем сформульовано постановку задачі досліджень, запропоновано спосіб розрахунку поля температур текучої частини рідини.*

27. Білецький Е. В. Обчислення коефіцієнтів тепловіддачі при течії деяких неньютонівських рідин у трубах і каналах / Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – Х. : НТУ «ХПИ», 2012. – №2. – С. 46-58. *Здобувачем досліджено теплообмінні параметри в обвідному каналі та узагальнено результати.*

28. Білецький Е. В. Модель перехідної течії рідини в трубі / Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський // Обладнання та технології харчових виробництв. – Донецьк : ДонНУЕТ, 2012. – № 28. – С. 98-107. *Здобувачем обчислено розмір смуг ламінарного і турбулентного характеру.*

29. Biletsky E. Method of determining of dissipation energy during the movement of bingham fluid / E. Biletsky, D. Semeniuk // Journal of technical university of Moldova and moldovian engineering association. – Chisinau : Meridian engineeresc, 2012. – № 4. – P. 40-44. *Здобувачем сформульовано постановку задачі досліджень, запропоновано формули визначення величини дисипації при течії в'язкопластичної рідини.*

30. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л. Л. Повздовжньо-поперечна течія стискаючої рідини, залежної від швидкості зрушення і тиску вздовж щілинного каналу шнекової машини (Частина 1) / Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – К. : НУХТ, 2012. – № 45. – С. 53-60. *Здобувачем визначено контури поділу поперечного перетину прямокутного каналу, сформульовано висновки.*

31. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л. Л. Деякі аспекти повздовжньо-поперечної течії стисн

еної рідини, що залежить від швидкості зрушення і тиску вздовж щілинного каналу (Частина 2) / Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – К. : НУХТ, 2012. – № 46. – С. 25-31. *Здобувачем сформульовано постановку задачі досліджень, запропоновано методику обчислень зміни тиску вздовж плаского каналу.*

32. Белецкий Э. В. Расчет теплообмена при течении неньютоновских материалов / Э. В. Белецкий, Ю. А. Толчинский // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – Суми : СумДУ, 2012. – № 2. – С. 40-49. *Здобувачем запропоновано методику проведення інженерних розрахунків коефіцієнтів теплообміну.*

33. Белецкий Э. В. Математическая модель вязкопластического течения бингамовской жидкости с поперечной циркуляцией в прямоугольном канале червячной машины / Э. В. Белецкий, Ю. А. Толчинский // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова : научно-теоретический журнал. – Белгород : БГТУ, 2013. – № 2. – С. 85-93. *Здобувачем розроблено методику визначення макродинамічних та макрокінетичних характеристик течії в'язкопластичних матеріалів у прямокутному каналі.*

34. Білецький Е. В. Визначення гідравлічних втрат при течії в'язкої рідини / Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський // Вісник Львівського інституту економіки і туризму. – Львів : ЛІЕТ, 2011. – №6. – С. 143-148. *Здобувачем розроблено методику визначення коефіцієнтів місцевих опорів за умов течії в'язкої рідини при перехідному режимі.*

35. Білецький Е. В. Гідравліка та тепловіддача в умовах перехідної течії рідини в трубі / Е. В. Білецький // Львівський інститут економіки і туризму. – Львів : ЛІЕТ, 2012. – № 7. – С. 332-340. *Здобувачем запропоновано методику визначення основних гідродинамічних та теплообмінних показників течії при перехідному режимі.*

36. Пат. на корисну модель 23495 Україна, МПК А47J 37/10, А47J 37/04. Універсальний жарильний пристрій з непрямым обігрівом / Білецький Е. В., Петренко О. В., Сафонов В. В. ; заявник та патентовласник Харківський торговельно-економічний інститут КНТЕУ. – № u 2007 00555 ; заявл. 19.01.2007 ; опубл. 25.05.2007, Бюл. №7. – 4 с. : іл. *Здобувачем запропоновано модернізацію існуючого пристрою шляхом застосування в ньому як проміжного теплоносія кремнійорганічної рідини.*

37. Пат. на корисну модель 36262 Україна, МПК А47J 27/00, А47J 37/04. Система централізованого теплопостачання теплових апаратів з проміжним кремнійорганічним теплоносієм / Білецький Е. В., Петренко О. В. ; заявники та патентовласники Харківський державний університет харчування та торгівлі, Харківський торговельно-економічний інститут КНТЕУ. – № u 2008 03252 ; заявл. 22.04.2008 ; опубл. 27.10. 2008, Бюл. № 20. – 4 с. : іл. *Здобувачем запропоновано систему централізованого теплопостачання теплових апаратів з проміжним кремнійорганічним теплоносієм.*

38. Пат. на корисну модель 38821 Україна, МПК А47J 37/10, А47J 37/04. Універсальний тепловий апарат з непрямым обігрівом / Білецький Е. В., Петренко О. В.; заявник та патентовласник Харківський торговельно-економічний інститут КНТЕУ. – № u 2008 07522 ; заявл. 02.06.2008 ; опубл. 26.01.2009, Бюл. № 2. – 4 с. : іл. *Здобувачем розроблено конструкцію універсального теплового апарату з непрямым обігрівом.*

39. Пат. на корисну модель 52068, Україна МПК F28D 1/10, F28D 21/10. Шнековий теплообмінник з проміжним кремнієорганічним охолодженням / Білецький Е. В., Петренко О. В. ; заявники та патентовласники Харківський державний університет харчування та торгівлі, Харківський торговельно-економічний інститут КНТЕУ. – № u 2010 02054 ; заявл. 25.02.2010 ; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 15. – 4 с. : іл. *Здобувачем запропоновано модернізацію існуючого пристрою шляхом застосування в ньому як проміжного холодоносія кремнійорганічної рідини вітчизняного виробництва.*

40. Пат. на винахід 96170 Україна, МПК G09B 23/16 (2006.01). Установа для проведення лабораторної роботи з визначення теплових характеристик теплообмінника / Білецький Е. В. Сальников В. П. Павлюк В. А. ; заявник та патентовласник Харківський торговельно-економічний інститут КНТЕУ. – № а 2009 06772 ; заявл. 30.06.2009 ; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19. – 4 с. : іл. *Здобувачем складено заявку на винахід, описано формулу та проведено дослідження теплообмінних показників в'язкопластичної течії.*

41. Пат. на корисну модель 80032, Україна, МПК G05D 16/08 (2006/01), G05D 7/00. Пристрій для вимірювання гідравлічних характеристик кремнійорганічних рідин / Білецький Е. В., Чуйко А. М. ; заявник та патентовласник Харківський торговельно-економічний інститут КНТЕУ. – № u 2012 13477 ; заявл. 26.11.2012 ; опубл. 13.05.2013, Бюл. № 9. – 4 с. : іл. *Здобувачем запропоновано новий пристрій для вимірювання гідравлічних характеристик кремнійорганічних рідин.*

42. Пат. на корисну модель 80031, Україна, МПК G05D 7/00, B01F 3/10 (2006.01). Пристрій для вимірювання реологічних характеристик неньютонівських рідин / Білецький Е. В., Чуйко А. М. ; заявник та патентовласник Харківський торговельно-економічний інститут КНТЕУ. – № u 2012 13476 ; заявл. 26.11.2012 ; опубл. 13.05.2013, Бюл. № 9. – 4 с. : іл. *Здобувачем запропоновано новий пристрій для вимірювання реологічних характеристик неньютонівських рідин.*

43. Пат. на корисну модель 80033 Україна, МПК G05D 7/00, B01F 3/10 (2006.01). Пристрій для вимірювання характеристик течії неньютонівських рідин / Білецький Е. В., Чуйко А. М. ; заявник та патентовласник Харківський торговельно-економічний інститут КНТЕУ. – № u 2012 13479 ; заявл. 26.11.2012 ; опубл. 13.05.2013, Бюл. № 9. – 4 с. : іл. *Здобувачем запропоновано технічну ідею вимірювання характеристик течії неньютонівських рідин.*

44. Білецький Е. В. Применение кремнийорганических соединений в пищевой промышленности / Е. В. Білецький, О. В. Петренко // Научные и практические аспекты переработки мяса и мясопродуктов : междунар. науч.-практ. конф. : тезисы. – Х. : ХГАТОП, 2001. – С. 155-156. *Здобувачем обґрунтовано перспективність використання кремнійорганічних сполук.*

45. Білецький Е. В. Про можливість використання кремнійорганічних рідин у системах обігріву теплових апаратів / Е. В. Білецький // Управлінські та технологічні аспекти розвитку підприємств харчування та торгівлі : міжнар. наук.-практ. конф. : тези. – Х. : ХДАТОХ, 2003. – С. 234-235.

46. Белецкий Э. В. Определение термической стойкости кремнийорганических теплоносителей методом измерения диэлектрической постоянной / Э. В. Белецкий, Е. В. Петренко // Техника и технология пищевых производств : VI междунар. науч.-техн. конф. : тезисы. – Могилёв : УО «МГУП», 2007. – С. 256. *Здобувачем розроблено методику проведення експерименту та проаналізовані отриманні результати.*

47. Білецький Е. В. Система централізованого теплопостачання групи технологічних теплових апаратів / Е. В. Білецький, О. В. Петренко // Стратегія якості в промисловості і освіті : IV міжнарод. конф. : матеріали. – Варна, 2008. – С. 78-81. *Здобувачем обґрунтовано переваги застосування кремнійорганічного теплоносія для централізованого обігріву теплових апаратів.*

48. Білецький Е. В. Сучасні напрямки енергозбереження на підприємствах харчової промисловості / Е. В. Білецький, О. В. Петренко // Стратегічні напрямки розвитку підприємств харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі : міжнар. наук.-практ. конф. : тези доповідей в 2 ч. – Х. : ХДУХТ, 2008. – Ч.1. – С. 323-324. *Здобувачем доведено перспективні шляхи енергозбереження на підприємствах харчової промисловості.*

49. Biletsky E. V. The use of protection coatings in food industry processing equipment / E. V. Biletsky, O. V. Petrenko // Strategy of Quality Industry and Education : V International Conference : proceedings. – Varna, 2009. – P. 663–665. *Здобувачем наведено переваги використання кремнійорганічних сполук в харчовій та хімічній промисловостях.*

50. Белецкий Э. В. Использование кремнийорганических теплоносителей в теплообменном оборудовании / Э. В. Белецкий, Е. А. Дроботенко, В. А. Гапоненко // Naukova mysl informacynjnego wieku – 2009. Chemia i chemiczne technologie : V міжнар. наук.-практ. конф. : матеріали. – Пшемишль, 2009. – С. 7-9. *Здобувачем обґрунтовано доцільність використання кремнійорганічних рідини, як проміжного теплоносія в теплообмінному обладнанні.*

51. Білецький Е. В. Підвищення енергоефективності технологічного обладнання з використанням олігоорганосилоксанових речовин. / Е. В. Білецький, О. В. Петренко // Стратегія якості у промисловості і освіті : VI міжнарод. конф. : матеріали. – Варна, 2010. – С. 43-46. *Здобувачем обґрунтовано шляхи підвищення енергоефективності технологічного обладнання з використанням олігоорганосилоксанових речовин.*

52. Білецький Е. В. Теоретичні дослідження руху матеріалів у каналах шнекової машини / Е. В. Білецький // Сучасні проблеми техніки та технології харчових виробництв, ресторанного бізнесу та торгівлі : Всеукр. наук.-практ. конф. : тези доповідей. – Х. : ХДУХТ, 2010. – С. 20-21.

53. Білецький Е. В. Продольное течение бингамовской жидкости с поперечной циркуляцией в прямоугольном канале червячной машины / Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський // Теория и практика инновационного развития кооперативного образования и науки: междунар. науч.-практ. конф. в 7 ч.: материалы. – Белгород : БУПК, 2010. – Ч.4. – С. 211-226. *Здобувачем запропоновано математичну модель тривимірної течії в прямокутному каналі з довільною величиною відношення сторін.*

54. Білецький Е. В. Методы моделирования продольного течения неньютоновских жидкостей в пищевых технологиях (часть 1) / Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський // Наука и кооперация: проблемы и пути развития : междунар. научно-практ. конф. : материалы. – Белгород : Белгородский университет кооперации, экономики и права, 2011 – Ч.4. – С. 163-173. *Здобувачем обґрунтовано доцільність розробки тривимірних моделей течії на підставі використання методу суперпозиції.*

55. Білецький Е. В. Методы моделирования продольного течения неньютоновских жидкостей в пищевых технологиях (часть 2) / Е. В. Білецький,

Ю. А. Толчинський // Наука и кооперация: проблемы и пути развития : междунар. научно-практ. конф. : материалы. – Белгород : Белгородский университет кооперации, экономики и права, 2011 – Ч.4. – С. 174-179. *Здобувачем запропоновано метод побудови полів течії більшої розмірності з полів меншої розмірності з різними граничними умовами.*

56. Білецький Е. В. Гідродинамічні властивості перехідного режиму течії ньютонівської рідини в трубі / Е. В. Білецький // Готельно-ресторанний, туристичний та виставковий бізнес : інноваційні напрями розвитку : міжнар. наук.-практ. конф. : матеріали. – К. : КНТЕУ, 2011. – С. 288-291.

57. Білецький Е. В. Визначення гідравлічних опорів при течії неньютонівських рідин / Е. В. Білецький // Прогресивна техніка і технології харчових виробництв, готельного, ресторанного господарстві і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг : міжнар. наук.-практ. конф. : тези доповідей у 4 ч. – Х. : ХДУХТ, 2011. – Ч. 1. – С. 36-38.

58. Білецький Е. В. Підвищення експлуатаційних показників шнекових теплообмінників із застосуванням олігорманосилоксанових речовин як проміжного холодоносія / Е. В. Білецький, О. В. Петренко // Прогресивна техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарства і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг : міжнар. наук.-практ. конф. : тези доповідей у 4 ч.. – Х. : ХДУХТ, 2012. – Ч. 1. – С. 309-311. *Здобувачем доведено доцільність використання кремнійорганічних рідин, як проміжного холодоносія, наведено переваги їх застосування.*

АНОТАЦІЯ

Білецький Е.В. Закономірності реодинаміки та теплообміну неньютонівських рідин у каналах хіміко-технологічного обладнання. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут».

Дисертація присвячена дослідженням закономірностей реодинамічних та теплообмінних процесів шляхом створення теоретично обґрунтованих математичних моделей опису течії неньютонівських матеріалів у каналах прямокутної та пласкої форми з рухомими границями та різницею тисків на кінцях каналів.

Вперше теоретично обґрунтовано та вирішено задачу течії у каналах базової геометрії у тривимірному описі. Отримані диференціальні рівняння, які дозволяють обчислювати основні макродинамічні та макрокінетичні характеристики течії в кожній точці каналу.

Науково обґрунтовано модель течії неньютонівської та ступеневої рідин при перехідному режимі, яка дозволяє визначати основні гідродинамічні показники.

Для підтвердження вірогідності отриманих теоретичних рішень розроблені установки, на яких проведено експериментальні дослідження з використанням різних методик.

На підставі проведених досліджень та запропонованих методик були розроблені окремі конструкції технологічного обладнання, яке може знайти практичне застосування на підприємствах хімічної та харчової галузей.

Ключові слова: неньютонівські рідини, феноменологічна модель, математичне

моделювання, реодинамічні процеси, теплообмін у каналах, кремнійорганічний теплоносій, шнековий теплообмінник, енергозбереження.

АННОТАЦІЯ

Белецкий Э.В. Закономерности реодинамики и теплообмена неньютоновских жидкостей в каналах химико-технологического оборудования. На правах рукописи.

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

Диссертация посвящена исследованию закономерностей реодинамических и теплообменных процессов путем создания теоретически обоснованных математических моделей описания течения неньютоновских материалов в каналах прямоугольной и плоской формы с подвижными границами и градиентом давлений на концах канала. Установлено, что исследование трехмерных моделей течения в каналах позволяет учитывать большинство функциональных связей между основными параметрами процесса и тем самым проектировать энергоэффективное оборудование.

Разработаны методы моделирования течений неньютоновских жидкостей, которые позволили решать задачи большой размерности путем решения задач меньшей размерности, таким образом, что для восстановления трехмерного поля течения достаточно решить задачу в одном измерении.

Впервые теоретически обоснована и решена задача течения в каналах базовой геометрии в трехмерном описании. Получены дифференциальные уравнения, которые позволяют вычислять основные макродинамические и макрокинетические характеристики в каждой точке канала при течении жидкостей с зависимостью вязкости от скорости сдвига, степенных вязкопластических жидкостей.

Научно обоснована модель течения неньютоновской и степенной жидкостей при переходном режиме, которая позволяет определять коэффициенты трения и местных сопротивлений в виде единой формулы для всего диапазона числа Рейнольдса в потоке.

Для подтверждения достоверности полученных теоретических решений разработаны установки, на которых проведены экспериментальные исследования с использованием различных методик. На основании проведенных экспериментальных исследований получены зависимости величин расходов и мощности от частоты оборотов червяка при течении разнообразных бингамовских материалов подтверждены их реологические характеристики. Установлены экспериментальные зависимости значений коэффициентов местных сопротивлений от числа Рейнольдса. Полученные результаты подтвердили адекватность полученных математических моделей реальным условиям проведения процессов.

Получены научно-обоснованные методы инженерных расчетов, которые позволяют определить коэффициенты теплопередачи при течении неньютоновских материалов с произвольным распределением граничных скоростей для разных случаев теплообмена. Получена система уравнений для определения коэффициентов теплоотдачи вдоль оси канала и ядра потока при течении жидкостей с зависимостью вязкости от скорости сдвига, степенной и вязкопластической жидкостей. Приведенный алгоритм позволяет определить температуры вязкой жидкости при течении в канале

и теплоносителя в обвертывающем канале. Решена задача определения величины диссипации при течении неньютоновских материалов в канале. Получены уравнения для определения скорости вдоль границы канала для двух- трехмерных течений неньютоновских жидкостей. На основании предложенных инженерных методик разработана блок-схема проведения расчетов гидродинамических и тепловых характеристик вязкопластической, обобщенно-сдвиговой и степенной жидкостей при течении в плоском и прямоугольном каналах при различных случаях теплообмена.

На основании проведенных исследований и предложенных инженерных методик были разработаны отдельные конструкции технологического оборудования, которые могут найти практическое применение на предприятиях химической и пищевой отраслей. Предложенные конструкции тепловых аппаратов отличаются от аналогов повышенными эксплуатационными показателями, уменьшением негативного воздействия на экологию, снижением энергозатрат, улучшением условий труда на производстве.

Ключевые слова: неньютоновские жидкости, феноменологическая модель, математическое моделирование, реодинамические процессы, теплообмен в каналах, кремнийорганический теплоноситель, шнековый теплообменник, энергосбережение.

ANNOTATION

Biletskiy E. V. Behavior of non-Newtonian liquid rheodynamics and heat transfer in chemical engineering equipment channels. Published as a copyright.

The dissertation for the doctoral degree in technology on subject 05.17.08 – Chemical engineering processes and equipment – National technical university «Kharkiv polytechnic institute».

The dissertation is devoted to the study of rheodynamics and heat transfer processes by developing theoretically grounded mathematical models which describe non-Newtonian liquid flows in square and flat channels within rigid walls with pressure difference at the duct ends.

It is for the first time that the task of flow in base geometry channels has been theoretically grounded and solved with three-dimensional description. Differential equations which make it possible to calculate fundamental macrodynamics and macrokinetics tasks for a flow at any point of the channel were obtained.

The model of non-Newtonian and power law fluids at the transient behavior which determines basic hydrodynamic parameters was scientifically grounded.

To validate the obtained theoretical solutions, the plant was made to be used to carry out experimental research using various methods.

Various equipment units, which can be used for practical application in chemical and food industry, were designed using the research results and proposed methods.

Key words: non-Newtonian liquids, phenomenological model, mathematical modeling, rheodynamical processes, heat transfer in channels, organosilicic heat carrier, screw heat exchanger, energy saving.



Підписано до друку 16.09.2013 р. Формат 60x84/16
Папір офсент. Друк – різнографічний. умовн. друк. арк. 1,7
Гарнітура Times New Roman. Тираж 130 прим.

Віддруковано в друкарні ТОВ «Цифра принт»
на цифровому лазерному комплексі Xerox DocuTech 6135.
Адреса: м. Харків, вул. Данилевського, 30.