

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ**

СТЕПАНОВА ОЛЕСЯ ЄВГЕНІВНА



УДК 536.242; 536.4

**ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ
ТЕРМОКОНТАКТНОМУ НАГРІВАННІ ТА ПЛАВЛЕННІ ВУГЛЕВОДНЕВИХ
СУМІШЕЙ**

05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України, місто Київ

Науковий керівник: кандидат технічних наук,
Грабов Леонід Миколайович,
старший науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Горобець Валерій Григорович,
Національний університет біоресурсів і
природокористування України МОН України,
завідувач кафедри теплоенергетики.

кандидат технічних наук,
Степанюк Андрій Романович,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського”,
доцент кафедри машин та апаратів хімічних і
нафтопереробних виробництв.

Захист відбудеться “12” травня 2021 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01 в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України за адресою: 03057, м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту технічної теплофізики НАН України за адресою: 03057, м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а.

Автореферат розісланий “10” квітня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.224.01,
доктор технічних наук



Ж.О. Петрова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Процеси нагрівання і плавлення органічних речовин з низьким коефіцієнтом теплопровідності, насамперед вуглеводнів (вазелін, парафін, церезин, віск, нафтопродукти, тверді жири тощо), а також різного типу полімерних матеріалів та окремих видів харчових продуктів широко розповсюджені в хімічній, нафтопереробній, фармацевтичній, харчовій та інших галузях промисловості. Кожен з таких продуктів є складною сумішшю твердих, рідких та напіврідких вуглеводнів із різною молекулярною масою і тому не має визначеної температури переходу з одного агрегатного стану в інший. Усі ці речовини є неньютонівськими рідинами і характеризуються сильною залежністю в'язкості від температури. Вплив температури на реологічні показники та на агрегатний стан таких продуктів відіграє важливу роль при їх транспортуванні та експлуатації, що робить промислові процеси нагрівання та плавлення занадто трудомісткими та енерговитратними.

Продукти перегонки нафти, що складаються в основному із суміші вуглеводнів, широко застосовуються в якості вуглеводневих основ у виробництві м'яких лікарських форм зовнішньої дії – кремів, мазей тощо. На підприємствах фармацевтичної промисловості для нагрівання та плавлення основ для виготовлення косметичних і лікарських препаратів застосовують теплообмінні апарати періодичної дії з мішалками. Передача теплоти в цих апаратах здійснюється в нестационарному режимі з великим перепадом температур, що призводить до небажаних змін властивостей кінцевого продукту і самих речовин. При роботі на такому обладнанні неможливо домогтися рівномірного прогрівання всієї маси речовини, а отже, і якісної теплової обробки.

Переважно обладнання закуповується за кордоном, на придбання якого витрачаються великі кошти. Застарілі технології та здебільшого використання імпортного дорогого обладнання для здійснення процесів нагрівання та плавлення є актуальною проблемою в нашій країні. Отже, розробка та впровадження вітчизняних інноваційних технологій і обладнання для здійснення процесів нагрівання та плавлення на сьогоднішній день є актуальною задачею.

Дисертаційна робота присвячена проблемам інтенсифікації теплообмінних процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей при використанні термоконттактного методу плавлення для усунення недоліків існуючих методів і створення вітчизняного інноваційного обладнання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є результатом досліджень проведених відповідно до тематик науково-дослідних робіт: “Розробка способів інтенсифікації процесів гідратації, гідролізу і екстракції на основі використання механізмів дискретно-імпульсного вводу енергії” (номер держреєстрації 0112U004699), “Дослідження процесів трансформації енергії в рідких гетерогенних середовищах при використанні метода дискретно-імпульсного введення енергії” (номер держреєстрації 0117U000949), господарським договором № 3259 від 18.10.2013 р. “Установка для нагрівання та плавлення в'язких та низькотеплопровідних субстанцій (Термобат-М)”.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є встановлення та теплофізичне обґрунтування кінетичних закономірностей перебігу процесів термоконттактного

нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей, інтенсифікація теплообміну і розробка промислової енергозберігаючої технології та обладнання.

Для досягнення мети були поставлені та вирішені наступні завдання:

- провести аналіз технологій та обладнання для проведення процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей;
- створити експериментальне обладнання для проведення досліджень теплообміну при нагрівання та плавленні вуглеводневих сумішей;
- експериментально дослідити вплив теплофізичних параметрів на кінетику процесів нагрівання та плавлення, визначити динаміку зміни агрегатного стану речовини;
- провести експериментальні дослідження по визначенню теплоємності, теплоти фазового перетворення та термостійкості вуглеводневих сумішей;
- побудувати математичну модель теплопереносу та фазового перетворення;
- на основі проведених досліджень запропонувати нові технології та обладнання для проведення процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей.

Об'єкт дослідження – процеси нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей.

Предмет дослідження – інтенсифікація теплообміну при термоконтатному нагріванні та плавленні вуглеводневих сумішей.

Модельні середовища – вуглеводневі суміші.

Методи дослідження – експериментальні методи з використанням вимірювальних засобів на лабораторних стендах з комп'ютерною реєстрацією і обробкою даних; методи фізичного та математичного моделювання гідродинаміки та теплопереносу. Збір, обробка експериментальних даних та розрахунки виконувались із застосуванням сучасних комп'ютерних програм “Derivatograph”, “Water 4” і “Thermcap” та Excel. Для побудови схем використовувались Компас 3D V10 та CorelDRAW Graphic.

Наукова новизна отриманих результатів.

- вперше застосовано метод локального термоконтатного нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей;
- вперше на основі експериментальних та теоретичних випробувань досліджено вплив режимних параметрів (температура нагрівача, тиск на поверхню речовини, початкова температура вуглеводневої суміші) на швидкість перебігу процесів нагрівання і плавлення для визначення оптимальних параметрів;
- вперше проведені дослідження по визначенню в'язкості, теплоємності, теплоти фазового перетворення та термостійкості вуглеводневих сумішей;
- вперше запропоновано модель описання процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей з примусовим видаленням розплаву (модель течії розплаву в кільцевому зазорі під дією перепаду тиску і руху стінки та течії розплаву в дисковому зазорі під нагрівачем).

Практичне значення отриманих результатів:

- у результаті експериментальних досліджень визначено вплив теплофізичних параметрів на перебіг процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей;
- визначені теплофізичні властивості речовин в роботі за допомогою розробленої математичної моделі дають можливість проводити розрахунки параметрів процесу нагрівання та плавлення для інших вуглеводневих сумішей;

- розроблено комплект технічної документації та комплект документації, необхідної для валідації по GMP на установку “Термобат-М” для її впровадження;
- результати дисертаційної роботи застосовані при розробці установки для нагрівання та плавлення в’язких і низькотеплопровідних субстанцій “Термобат-М”.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи підтверджується двома патентами (“Установка для розігріву та плавлення в’язких речовин” № 69860 та “Установка для розігріву та плавлення в’язких систем” № 77487).

Результатом роботи є впроваджена установка для нагрівання та плавлення в’язких і низькотеплопровідних субстанцій “Термобат-М” на фармацевтичній фабриці ТОВ “Тернофарм”, м. Тернопіль (акт впровадження від 9 липня 2014 р.).

Особистий внесок здобувача в опублікованих разом зі співавторами наукових працях складається в постановці завдання; аналізі наявних даних про об’єкти дослідження; створенні експериментального стенда для дослідження процесів локального термоконтактного нагрівання та плавлення речовин; розробці експериментальних методик досліджень і статистичної обробки отриманих результатів; вивченні властивостей вуглеводневих сумішей; узагальненні даних і видачі рекомендацій; участі у впровадженні й патентуванні розробок; підготовці й опублікуванні результатів досліджень.

Внесок Степанової О.Є. у роботи, що написані в співавторстві, вказано в списку публікацій.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на наукових конференціях різного рівня, в яких здобувачка брала участь: на Міжнародних конференціях “Проблеми промислової теплотехники”, м. Київ (2011, 2013, 2015 рр.); Міжнародних конференціях “Проблеми теплофізики та теплоенергетики”, м. Київ (2017, 2019 рр.); Міжнародних наукових конференціях “Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв”, м. Одеса (2012, 2014, 2018 рр.); III Міжнародному медичному конгресі “Впровадження сучасних досягнень медичної науки в практику охорони здоров’я України” на круглому столі “Актуальні питання впровадження і зас-тосування наукових розробок установ НАН України в сфері медицини”, м. Київ (2014 р.); Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених “Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання”, м. Київ (2016, 2018 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції “Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості”, НУХТ, м. Київ (2016 рік); International Scientific Conference “Chemical Technology and Engineering”, м. Львів (2017, 2019 рр.); Регіональній науково-практичній конференції “Енергія. Бізнес. Комфорт.”, ОНАХТ, м. Одеса (2018 р.); VII Міжнародній науково-практичній конференції “Інноваційні енерготехнології”, ОНАХТ, м. Одеса (2019 р.); IX Міжнародній науково-практичній конференції “Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції”, НУХТ, м. Київ (2020 р.); Міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми сучасної теплоенергетики”, присвяченої 100-річчю професора Драганова Б.Х., м. Київ (2020 р.).

Публікації. Зміст дисертаційної роботи відображено в 24 публікаціях, в т.ч. у 1 колективній монографії, 12 статтях у фахових виданнях, 1 з яких входить до наукометричних баз даних, 9 тезах та матеріалах доповідей на міжнародних наукових конференціях, у 2-х патентах України на корисну модель.

Структура роботи. Робота складається з вступу, п'ятих розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Обсяг основного тексту дисертаційної роботи становить 179 сторінок, включаючи 65 рисунків, 21 таблиць та 4 додатки. Список використаних джерел містить 112 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень, наведено наукову новизну та практичну цінність одержаних в роботі результатів, визначено зв'язок роботи з науковими програмами, темами, вказано особистий внесок здобувача, надано відомості про апробацію результатів дисертації, вказано структуру й обсяг дисертації.

У **першому розділі** наведено аналітичний огляд літературних джерел та сучасного стану науки і техніки у сфері досліджень процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей. Необхідність розробки й впровадження інноваційного теплообмінного устаткування й технологій, в основі яких лежать процеси нагрівання і плавлення та інтенсифікація фізико-хімічних і теплообмінних процесів, обумовлена потребами сьогодення: розширення й створення нових виробничих потужностей; реконструкція й переоснащення існуючих виробничих потужностей; розширення асортименту і якості продукції; скорочення об'ємів імпорту технологічного устаткування і продукції.

Описано обладнання для здійснення процесів нагрівання і плавлення та існуючі технології для отримання продукції у різних галузях промисловості (фармацевтична, харчова, нафтопереробна та ін.), виявлено недоліки при використанні таких способів та обладнання для нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей. Основні недоліки існуючих технологій та обладнання: передача тепла в нестаціонарному режимі з великим перепадом температур; нерівномірне нагрівання всього об'єму речовини; контамінаційна небезпечність; енергоємність; енергозатратність.

Пошук нових конструктивних і технологічних рішень розробки обладнання для проведення процесів нагрівання та плавлення, спрямованих на підвищення ефективності роботи апаратів і інтенсифікацію теплообміну, вимагає проведення комплексних теоретичних і експериментальних досліджень по вивченню кінетичних закономірностей перебігу процесів нагрівання та плавлення.

На основі літературного огляду сформульовано завдання дослідження з метою інтенсифікації теплообміну при нагріванні та плавленні вуглеводневих сумішей для розробки інноваційної технології та обладнання і отримання якісного продукту.

У **другому розділі** наведено опис експериментальних стендів, приладів і методик проведення досліджень та обробки даних, що були отримані для визначення теплофізичних властивостей вуглеводневих сумішей та параметрів перебігу процесів нагрівання і плавлення.

В ІТТФ НАНУ було розроблено спосіб плавлення вуглеводневих сумішей за рахунок контактного та конвективного переносу тепла із примусовим видаленням розплаву і створено експериментальний стенд для визначення раціональної конструкції установки та оптимальних режимів її роботи (рис. 1). Стенд складається з наступних елементів: ємність для досліджуваної вуглеводневої основи 1, дисковий нагрівач 2, платформа для додаткової наважки 4, пульт керування 3.

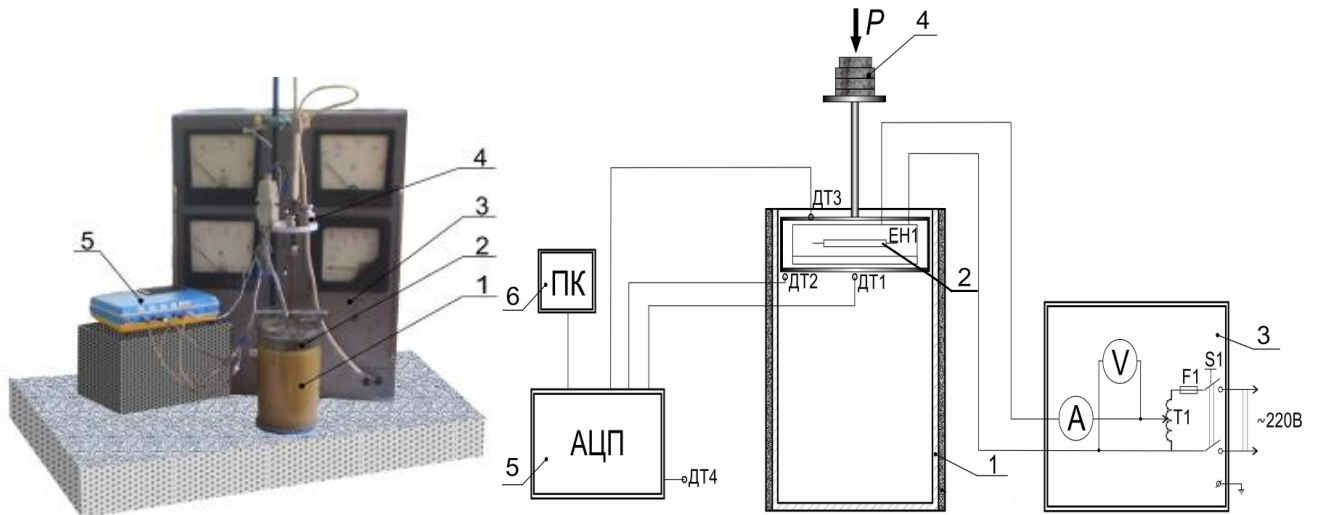


Рис. 1. Загальний вигляд стенда для експериментального дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей:

- 1 – ємність з речовиною; 2 – електричний нагрівач; 3 – пульт керування;
4 – платформа для додаткової наважки; 5 – аналогово-цифровий перетворювач;
6 – персональний комп'ютер; ДТ1...ДТ4 – термопар.

Спосіб плавлення твердої вуглеводневої суміші полягає у підведенні теплоти безпосередньо до фронту фазового перетворення за допомогою дискового нагрівача, який контактує із зовнішньою границею нерозплавленої речовини, що поступово переміщується в ній під дією сили тяжіння та перетікання розплавленої суміші через зазори між боковими поверхнями нагрівача та стінкою ємності. При цьому температура дискового нагрівача в зоні контакту з речовиною підтримується нижче температури її деструкції. В товщі розплаву підтримання температури плавлення відбувається за рахунок конвективної теплопередачі від верхньої поверхні нагрівача.

Для проведення досліджень на експериментальному стенді ємність заповнюється досліджуваною вуглеводневою сумішшю. На поверхню речовини опускається дисковий нагрівач. Якщо за програмою дослідження передбачається необхідність додаткового підвищення тиску на поверхню речовини, на платформу встановлюється додаткова наважка. На електричну спіраль нагрівача подається необхідна електрична напруга для забезпечення заданої підведеної потужності. Під час проведення дослідження за допомогою комп'ютера записуються показання термопар та реєструється швидкість занурення нагрівача у речовину, що досліджується.

На стенді для експериментального дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей досліджено вплив теплофізичних параметрів

(температура нагрівача, тиск на поверхню речовини, початкова температура вуглеводневої суміші) на швидкість перебігу процесів нагрівання і плавлення для визначення оптимальних параметрів.

Для визначення термостійкості застосовано дериватографічний метод, для дослідження питомої теплоємності та питомої теплоти плавлення – метод диференціальної сканувальної калориметрії, для визначення в'язкості – ротаційний віскозиметр DV-E фірми “Brookfield”.

Для обробки отриманих результатів експериментальних досліджень використано статистичні та математичні методи.

У **третьому розділі** наведено результати експериментальних досліджень впливу теплофізичних параметрів на кінетику процесів нагрівання та плавлення і досліджень по визначенню теплоємності, теплоти фазового перетворення та термостійкості вазеліну та парафіну, що були обрані модельними середовищами.

Завданням досліджень на стенді для проведення процесів нагрівання та плавлення було знаходження оптимальних параметрів їх перебігу шляхом зміни температури нагрівача та величини тиску на поверхню речовини.

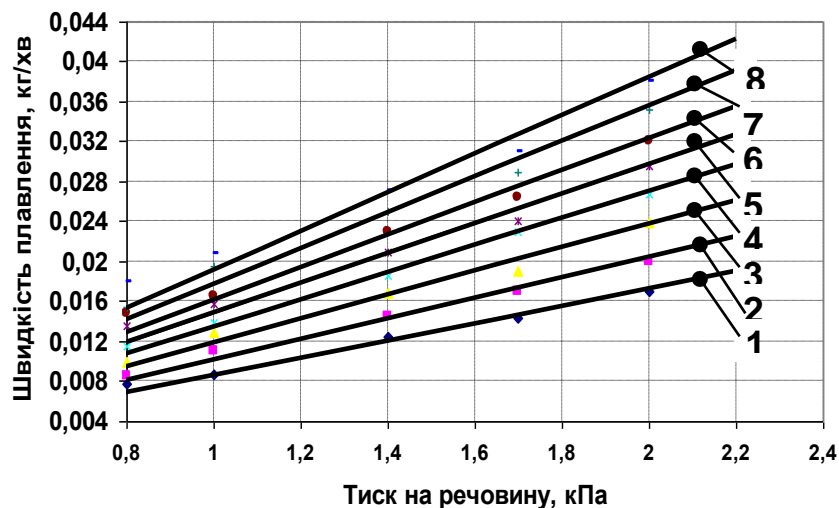


Рис. 2. Залежність швидкості плавлення вазеліну від тиску на його поверхню при різних температурах нагрівача:

1 – $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 – $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 – $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 – $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$,
5 – $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 6 – $T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$, 7 – $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$, 8 – $T = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Отримано залежність швидкості плавлення вазеліну від тиску на його поверхню при різних температурах нагрівача (рис. 2). Як видно з рисунку, за рахунок підвищення тиску на поверхню речовини та температури нагрівача можна домогтися інтенсифікації процесу.

Проведено дослідження і отримано залежність температури розплаву під нагрівачем в залежності від температури нагрівача при різних значеннях тиску (рис. 3). Вкрай важливо, щоб речовина під нагрівачем встигала розплавлятися і утворювалась плівка розплавленої речовини. Якщо нагрівач буде видавлювати речовину, вона не встигатиме до кінця розплавитись або буде перегріватись. З урахуванням того, що температура плавлення вазеліну лежить в інтервалі від 37 до $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, було визначено оптимальну область температур і режимні параметри,

необхідну для того, щоб вуглеводнева суміш під нагрівачем встигала розплавлятися, але не перегрівалась.

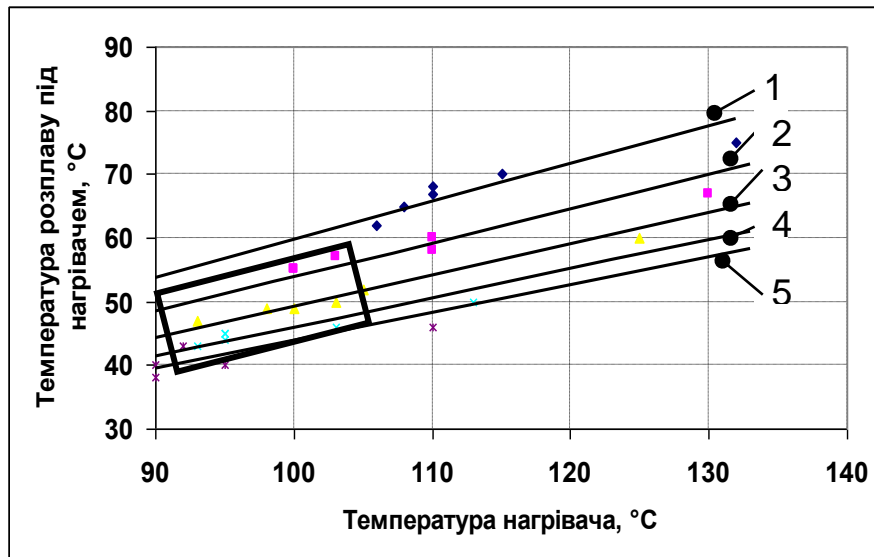


Рис. 3. Зміна температури розплаву вазеліну під нагрівачем в залежності від температури нагрівача при різних тисках на поверхню речовини:
1 – $P=0,8$ кПа; 2 – $P=1$ кПа; 3 – $P=1,4$ кПа; 4 – $P=1,7$ кПа; 5 – $P=2$ кПа.

Для підтримання температури плавлення вазеліну в інтервалі від 37 до 55 °C із застосуванням нагрівача, нагрітого до 90-100 °C, достатньо встановити величину тиску від 0,8 до 1,7 кПа.

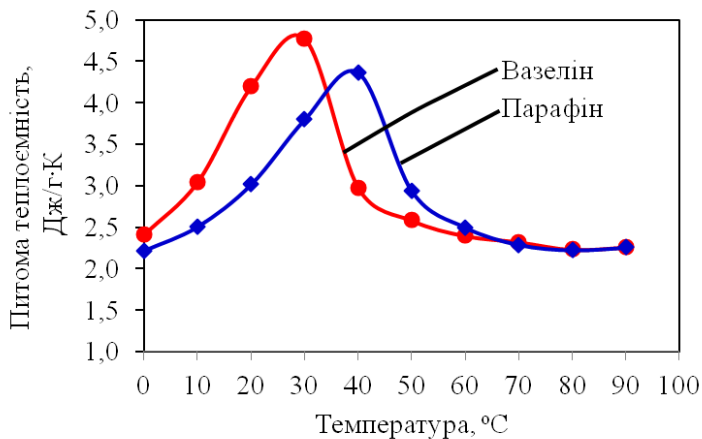


Рис. 3. Залежність питомої теплоємності від температури

Точне експериментальне визначення питомої теплоємності вуглеводневих сумішей має важливе практичне значення. Величина питомої теплоємності поряд з іншими фізичними величинами необхідна в інженерних розрахунках теплових процесів і апаратів для нагрівання та плавлення. При цьому точність визначення цього параметру в значній мірі визначає раціональність обраних конструкцій, розмірів, режимів роботи і, в

кінцевому рахунку, ефективність розробки в цілому.

Як відомо, теплоємність вазеліну, парафіну та інших вуглеводневих сумішей, не суттєво змінюється з температурою. Але в залежності від марки, призначення та інших параметрів може різнитися. Для знаходження залежності теплоємності модельних об'єктів від температури було проведено вимірювання їх питомої теплоємності методом диференціальної сканувальної калориметрії (ДСК) (рис. 3).

В процесі нагрівання вазелін (або інші вуглеводні) у міру підвищення температури поступово плавиться. Оскільки вазелін (як і всі інші речовини цього

типу) є сумішшю вуглеводнів різної молекулярної маси (число атомів вуглецю у яких змінюється від 7 до 36), при низьких температурах плавляться низькомолекулярні фракції, а при більш високих – високомолекулярні фракції. При цьому у кожній фракції своя теплота плавлення.

На диференціальному сканувальному мікрокалориметрі ДСМ-2М було проведено вимірювання питомої теплоємності вазеліну і парафіну та отримано ДСК-криві їх плавлення (рис. 4). ДСК-криві фактично відображують кількість теплоти, що витрачається на нагрівання речовини на величину ΔT з урахуванням витрати захищеної теплоти плавлення.

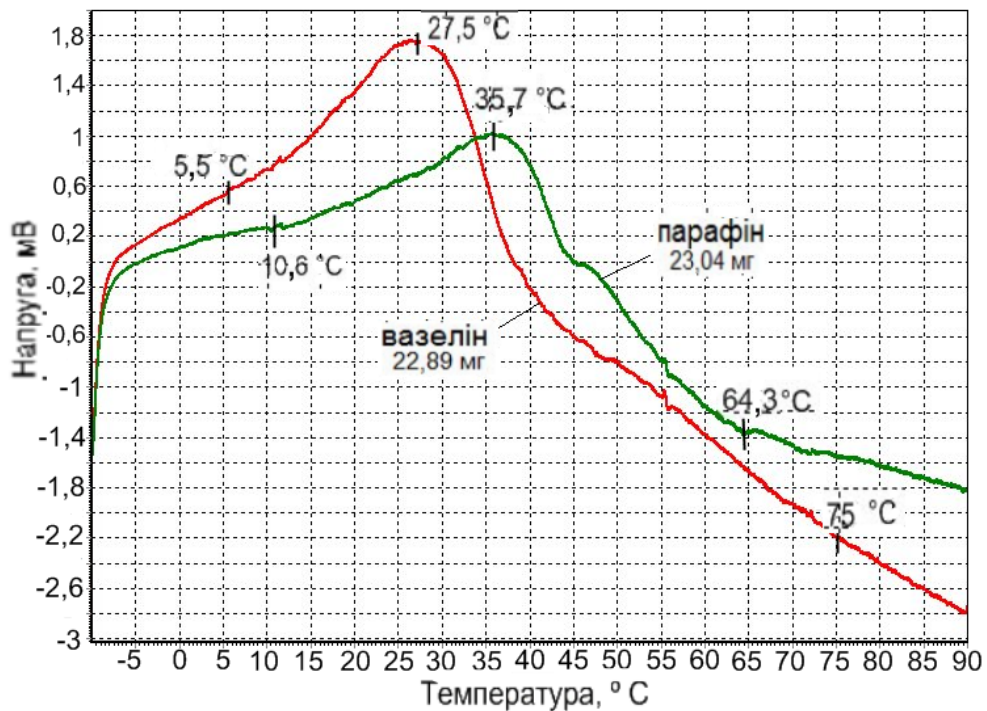


Рис. 4. ДСК-криві плавлення вазеліну та парафіну

З отриманих ДСК-кривих плавлення була визначена питома ефективна теплота плавлення в інтервалах плавлення для вазеліну 5,5...75,0 °C та для парафіну 10,6...64,3 °C, яка становить, відповідно, для вазеліну – 68,95 кДж/кг, а для парафіну – 50,73 кДж/кг. Ці дані використані для розрахунків теплообміну та моделювання процесів нагрівання та плавлення.

Вазелін та парафін – органічні термолабільні речовини. Термоконтактний спосіб нагрівання та плавлення пов'язаний з безпосереднім контактом нагрівача і речовиною, яку необхідно розплавити. Підвищуючи температуру нагрівача, можна інтенсифікувати процес розплавлення. Для того щоб уникнути деструкції при нагріванні та плавленні вазеліну і парафіну проведені дослідження їх термостійкості, що характеризує верхню межу робочих температур, до якої їх можна нагрівати без змін структурно-механічних властивостей та перегріву.

Оскільки термостійкість визначається максимальною температурою при якій матеріал протягом тривалого часу не зазнає руйнівних змін, то головними характеристиками для її визначення є температура та маса зразка.

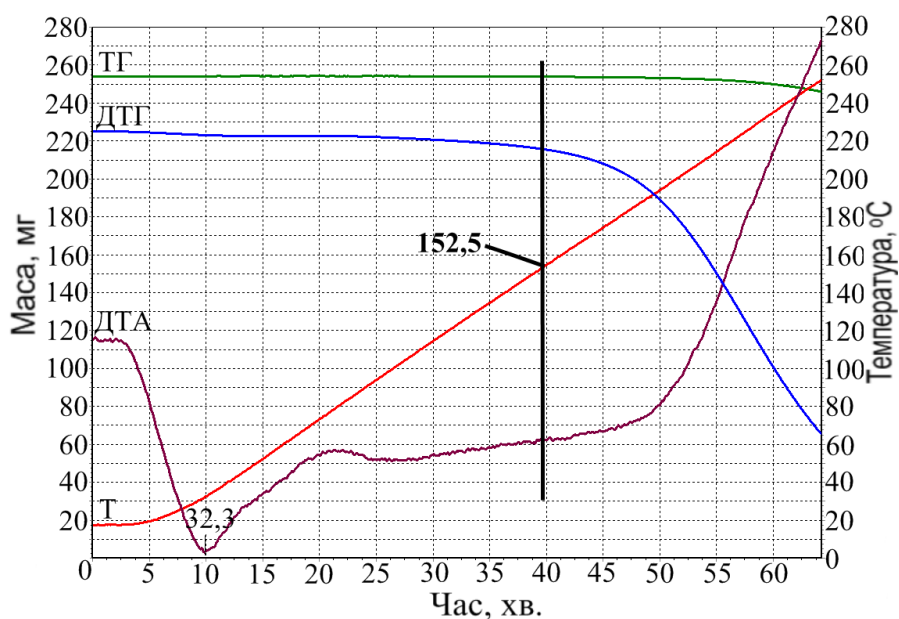


Рис. 5. Дериватограма вазеліну. Маса зразка 253,9 мг
 Реєстрація: Т – температура зразка; ТГ – маса зразка; ДТГ – швидкість зміни маси; ДТА – зміна диференціальної температури (тепловий ефект).

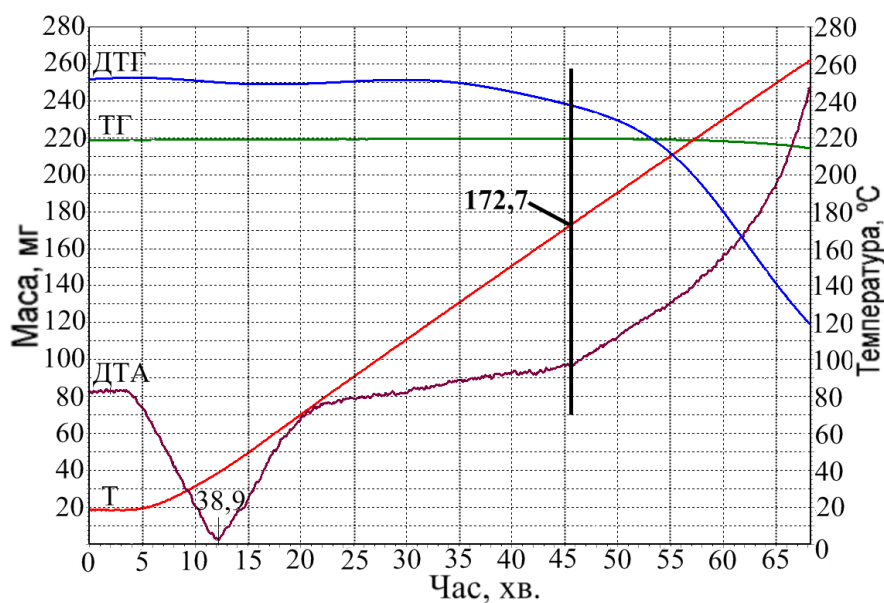


Рис. 6. Дериватограма парафіну. Маса зразка 218,7 мг

Дослідження термостійкості вазеліну та парафіну на дериватографі Q-1000 дали можливість за кривою зміни диференціальної температури ДТА (різниця температур між зразком та інертною речовиною) визначити температуру початку термічного розкладання: для вазеліну – 152,5 °C, для парафіну – 172,7 °C, після якої починаються процеси, зв'язані з деструкцією матеріалу (рис. 5, 6).

За даними результатів дослідження фазових переходів при нагріванні розраховано залежність зміни ентальпії від температури в об'ємі вазеліну, що дозволяє визначити кількість теплоти, яка витрачається на заданому інтервалі температур та визначити теплоту, яка витрачається окремо на плавлення і нагрівання (рис. 7).

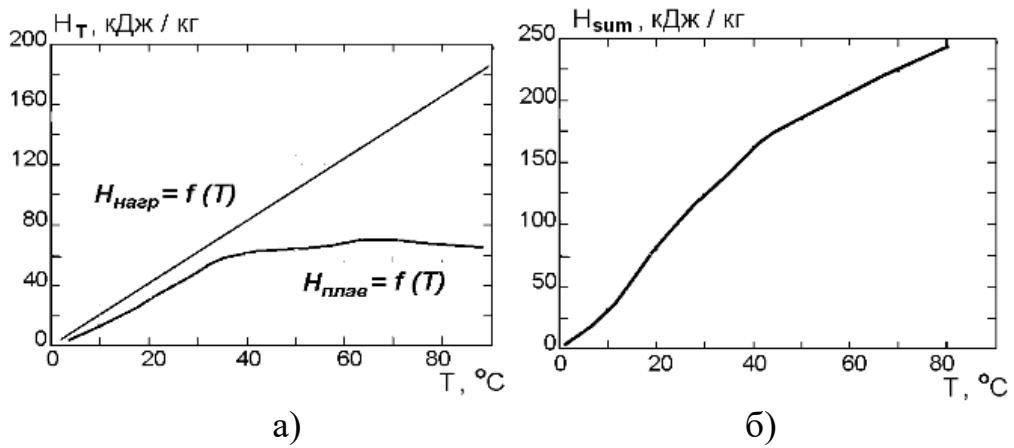


Рис. 7. Зміна ентальпії з температурою в об'ємі вазеліну внаслідок нагрівання $H_{нагр}(T)$ і плавлення $H_{плав}(T)$ (а) та сумарна зміна ентальпії внаслідок нагрівання та плавлення $H_{sum}(T)$ (б)

У четвертому розділі наведено моделювання течії розплаву в кільцевому зазорі, що описує ламінарну течію під дією перепаду тиску і швидкістю руху стінки ємності відносно нагрівача, та течії розплаву під нагрівачем.

Експериментальні дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводнів проводилися на лабораторному стенді, схематично представленому на рисунку 8. Для аналізу результатів експерименту створено математичну модель, яка описує особливості гідродинаміки, тепло- та масообміну в процесі нагрівання та плавлення.

Математична модель базується на таких припущеннях: стаціонарність процесу нагрівання та плавлення; розплав – в'язка нестислива ньютонівська або неньютонівська рідина; теплофізичні властивості розплаву постійні; рух розплаву в зазорах – ламінарний ($Re < 1$); на стінках відсутнє прослизання.

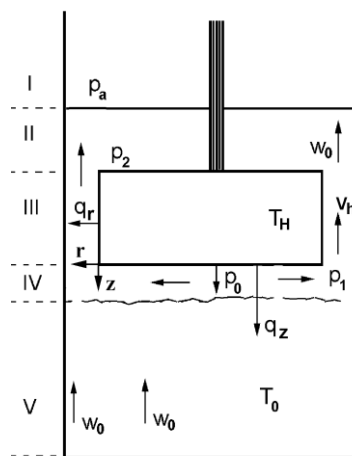


Рис. 8. Схема до моделі процесів нагрівання та плавлення з примусовим видалення розплаву: I – повітря; II – розплав над нагрівачем; III – нагрівання та доплавлення у кільцевому зазорі; IV – нагрівання і плавлення в дисковому зазорі; V – тверда речовина.

Модель представлена базовими рівняннями теплопровідності, нерозривності та збереження кількості руху (1)-(5).

Рівняння теплопровідності в осьовому (1) та в радіальному напрямі (2)

$$\frac{\lambda}{\rho \tilde{N}_p} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + w_0 \frac{\partial T}{\partial z} = 0; \quad (1)$$

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \quad (2)$$

Рівняння нерозривності

$$G_m = \rho S v = \text{const}. \quad (3)$$

Рівняння збереження кількості руху

$$\rho v_z \frac{dv_z}{dz} = -\frac{dp}{dz} + \mu(T) \frac{d^2 v_z}{dr^2} + \rho g. \quad (4)$$

Рівняння нагрівання та плавлення речовини

$$Q = \frac{d(m C_p T)}{d\tau} + \frac{dm}{d\tau} \cdot L_{melt}. \quad (5)$$

Із застосуванням цих базових рівнянь розглядається течія розплаву в кільцевому зазорі під дією перепаду тиску і руху стінки та в дисковому зазорі під нагрівачем.

В'язка рідина тече у вузькому кільцевому каналі між двома співвісними циліндрами під дією перепаду тиску на кінцях каналу з урахуванням сили тяжіння. В прийнятій системі координат стінка зовнішнього циліндра рухається зі швидкістю нагрівача w_0 , в напрямку протилежному градієнту тиску, а внутрішній циліндр (нагрівач) є нерухомим (рис. 9, а). Задача полягає у визначенні розподілів напруження зсуву і швидкості потоку по ширині зазору, а також середньої швидкості потоку.

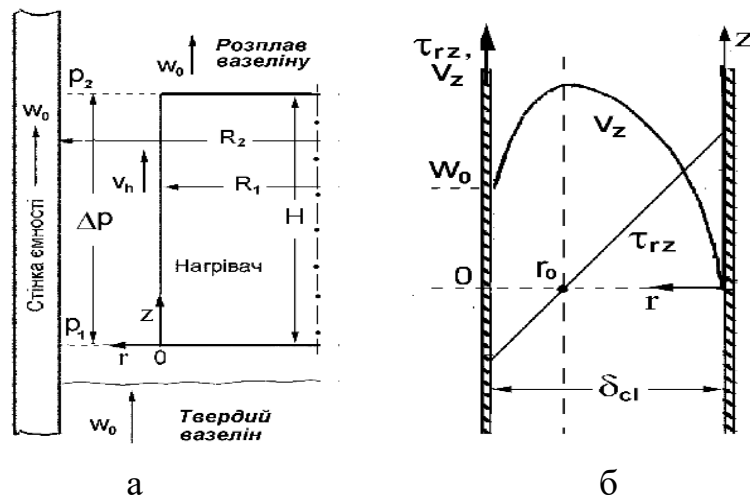


Рис. 9. Схема течії розплаву в кільцевому зазорі (а) та розподіл швидкості $v_{vz}(\delta)$ і зсувних напружень $\tau_{rz}(\delta)$ по ширині зазору (б)

Модель описує ламінарну течію в зазорі під дією перепаду тиску $p_1 - p_2$, а також під дією руху стінки ємності відносно нагрівача із швидкістю w_0 .

Для вирішення задачі, треба визначити розподіл напруження тиску по ширині зазору $d\tau_{rz}/dr$. В задачах течії рідини в циліндричних трубах і кільцевих зазорах рівняння руху записується у вигляді

$$\frac{d(r\tau_{rz})}{dr} = -\frac{dp}{dz} = \frac{p_1 - p_2}{H}. \quad (6)$$

Залежність напруження тиску від радіусу завжди пряма лінія (рис. 9, б), а тому похідна $d\tau_{rz}/dr$ є постійною, але невідомою величиною. Система рівнянь течії в трубах або зазорах має включати рівняння в'язкості для ньютонівської або неньютонівської рідини (7), яке при заданій в'язкості μ пов'язує напруження зсуву τ_{rz} на будь-якій відстані r із швидкістю потоку $v_z(r)$ в цій точці (рис. 3, б).

Для ньютонівської рідини рівняння в'язкості має вигляд

$$\tau_{rz}(r) = -\mu \frac{dv_z}{dr}. \quad (7)$$

Напруження зсуву визначається з рівняння

$$\tau_{rz}(r) = \frac{\Delta p}{H_h} (r - r_0). \quad (8)$$

В рівнянні (8) для $\tau_{rz} = f(r)$ міститься невідомий параметр r_0 (рис. 9, б), визначення якого необхідно для вирішення даної задачі.

Інтегруючи рівняння (7) з урахуванням (8), одержимо рівняння (9, а, б) для швидкості потоку в будь-якій точці r зазору, які також містять невизначений параметр r_0 .

$$v_z(r) = \frac{\Delta p}{\mu H_h} \left(r_0 r - \frac{r^2}{2} \right) \text{ при } r \leq r_0; \quad (9a)$$

$$v_z(r) = w_0 - \frac{\Delta p}{\mu H_h} \cdot \left(r_0 (\delta - r) - \frac{\delta^2 - r^2}{2} \right) \text{ при } r_0 \leq r \leq \delta. \quad (9b)$$

Рівняння (9а) описує ліву гілку параболи (зліва від r_0), а рівняння (9б) – праву гілку (рис. 9, б). Обидва ці рівняння містять невідомий параметр r_0 . Зрозуміло, що в точці $r = r_0$ значення швидкості з рівнянь (9а) і (9б) будуть однаковими. Тому прирівнюючи швидкості в обох рівняннях знаходимо r_0 і далі вирішуємо задачу.

$$r_0 = \frac{\delta \cdot c_l}{2} + \frac{\mu H}{\Delta p \cdot \delta \cdot c_l} w_0. \quad (10)$$

Розраховуємо середню швидкість розплаву в зазорі

$$\bar{v}_z = v_{cl} = w_0 \frac{(\delta - r_0)}{\delta} + \frac{(p_1 - p_2)}{\mu H_h} \left[\frac{\delta^2}{3} - (\delta - r_0) \cdot r_0 \right]. \quad (11)$$

В рівняннях цієї моделі невизначеним залишаються тиск p_1 на вході в зазор, відносні швидкість руху стінки w_0 і в'язкість розплаву μ .

Для знаходження цих величин модель кільцевого зазору треба зв'язати з моделлю течії під нагрівачем і з моделлю плавлення, які і складають загальну модель апарата.

Моделювання течії розплаву в дисковому зазорі (рис. 10, а) прямо пов'язано із моделюванням течії розплаву для кільцевого зазору, бо розплав безпосередньо переходить із дискового в кільцевий зазор як одна нерозривна течія. Це необхідно для визначення невідомого тиску p_1 , без якого не можливо було розглядати ці течії. Загальне переміщення розплаву в апараті відбувається внаслідок дії відомого тиску з боку нагрівача на вході і атмосферного тиску на виході.

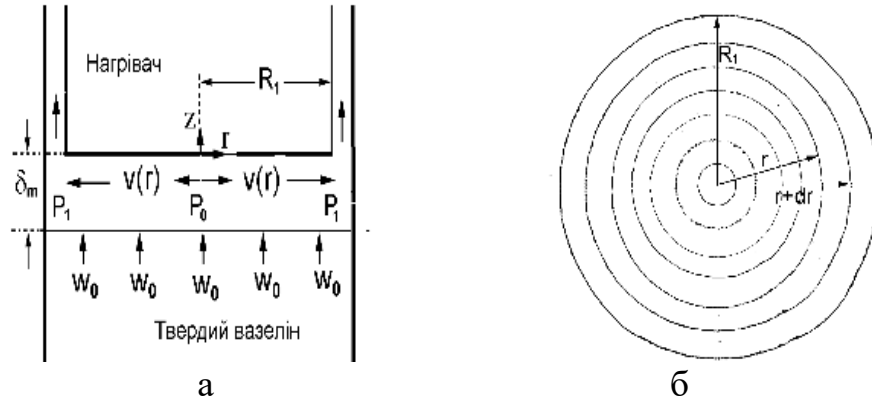


Рис. 10. Схема течії розплаву в дисковому зазорі під нагрівачем (а) та схема розбиття дискового зазору на елементарні зони (б)

Записується стаціонарне рівняння руху розплаву в дисковому зазорі під нагрівачем у вигляді рівняння Бернуллі для стаціонарних потоків. Ширина зазору δ_m приймається постійною. Це відстань між нижньою поверхнею нагрівача і поверхнею твердого вазеліну. Тому вважається, що розплав витікає із-під зазору в напрямі r між двома твердими поверхнями. При витіканні розплаву із зазору δ_m на його місце з поверхні твердого вазеліну надходить нова порція розплавлено вазеліну із швидкістю w_0 , тобто з постійною швидкістю опускання нагрівача. Згідно рівнянню нерозривності кількість вазеліну, що надходить в зазор в одиницю часу, дорівнює кількості вазеліну, яка виходить із зазору. Враховується також втрата напору в течії у зазорі внаслідок тертя на верхній та нижній поверхні зазору.

Рівняння руху течії на ділянці між r та $r+dr$ (рис. 10, б)

$$\rho \frac{v^2(r)}{2} + p(r) = \rho \frac{v^2(r+dr)}{2} + p(r+dr) + dW_{fr}. \quad (12)$$

Витрата енергії на в'язке тертя на цій ділянці

$$dW_{fr} = \mu \frac{v(r)}{\delta_m} \cdot \frac{dS_z}{dS_r} = \mu \frac{w_0 r}{2\delta_m^3} dr. \quad (13)$$

Швидкість течії в зазорі

$$v(r) = \frac{w_0 r}{2\delta_m}. \quad (14)$$

З урахуванням (13) та (14) рівняння руху має вигляд

$$-\frac{dp}{dr} dr = \rho \cdot \frac{w_0^2 \cdot \pi r \cdot dr}{4\delta_m^2} + \mu \frac{w_0 r}{2\delta_m^3} dr. \quad (15)$$

Після інтегрування в межах від 0 до r одержимо

$$p_0 - p(r) = \rho \cdot \frac{w_0^2 \cdot \pi r^2}{8\delta_m^2} + \mu \frac{w_0 r^2}{4\delta_m^3} = \frac{w_0 r^2}{4\delta_m^2} \left(\frac{\pi \rho w_0}{2} + \frac{\mu}{4\delta_m} \right). \quad (16)$$

Підставляючи в (15) $r = R_1$, знаходимо тиск p_1 на виході із-під нагрівача

$$p_1 = p_0 - \rho \cdot \frac{w_0^2 \cdot \pi R_1^2}{8\delta_m^2} - \mu \frac{w_0 R_1^2}{4\delta_m^3} = p_0 - \frac{w_0 R_1^2}{4\delta_m^2} \left(\frac{\pi \rho w_0}{2} + \frac{\mu}{4\delta_m} \right). \quad (17)$$

Приймається що в центрі дискового зазору ($r=0$) на розплав діє тиск p_0 (вага нагрівача), а на виході – невідомий тиск $p_1 < p_0$. Течія може відбуватися лише при перепаді тиску $\Delta p = p_0 - p_1$. Але, тиск p_1 – це тиск на вході в кільцевий зазор між стінкою ємності і нагрівачем, який присутній в рівняннях моделі для кільцевого зазору. В результаті вирішення рівнянь течії в дисковому зазорі (12)-(17) з останнього рівняння (17) остаточно визначаємо тиск p_1 , який входить в систему рівнянь моделі.

У п'ятому розділі представлено практичне застосування результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

Традиційна технологія виготовлення м'яких лікарських форм складається з наступних стадій: підготовка основи, підготовка лікарських речовин, введення їх в основу та отримання готової продукції.

На стадії підготовки основи здійснюються процеси нагрівання та плавлення, що досліджуються у даній роботі. Вона складається з наступних етапів (рис. 12): транспортування зі складу в тарі заводу-виробника, завантаження в пристрій для плавлення, процес плавлення, вивантаження з пристрою, дозування, транспортування рідкої речовини.

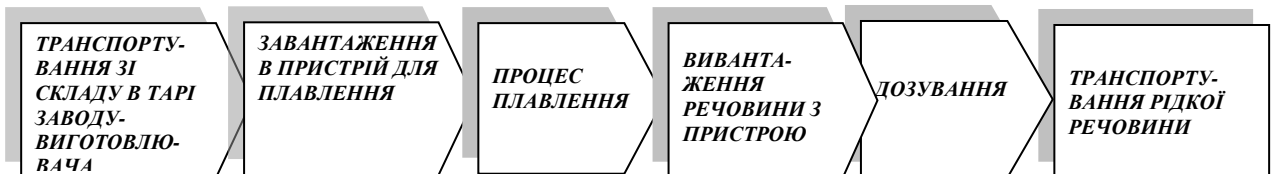


Рис. 12. Традиційна технологічна схема нагрівання та плавлення на стадії підготовки вуглеводневої основи

В Інституті технічної теплофізики розроблено технологію та установку прискореного нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей з низьким коефіцієнтом теп-лопровідності за рахунок контактного та конвективного переносу тепла, що дозволяє інтенсифікувати процес і призводить до зменшення енерговитрат завдяки поєднанню процесів завантаження, плавлення, дозування, вивантаження та транспортування розплавленої речовини у одному технологічному циклі (рис. 13).



Рис. 13. Технологічна схема прискороного нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей

Розроблено та виготовлено установку “Термобат-М”, в якій застосовано спосіб термоконтального нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей. Установка для плавлення речовин “Термобат-М” складається з наступних вузлів (рис. 15): корпус 1 з вантажопідйомним механізмом і упором 5 для центрування бочки з продуктом; щит управління 2; електронагрівальний апарат 8.

В корпусі 1 встановлений вантажопідйомний механізм для підйому та опускання електронагрівального апарату 8.

Вантажопідйомний механізм містить лебідку з ручкою 4 і перемикачем підйому/опускання 3 і тросом, з’єднаних через блоки з нижньою кареткою, над якою розташована верхня каретка. Каретки переміщуються по напрямних. На верхній каретці закріплений нагрівальний апарат 8.

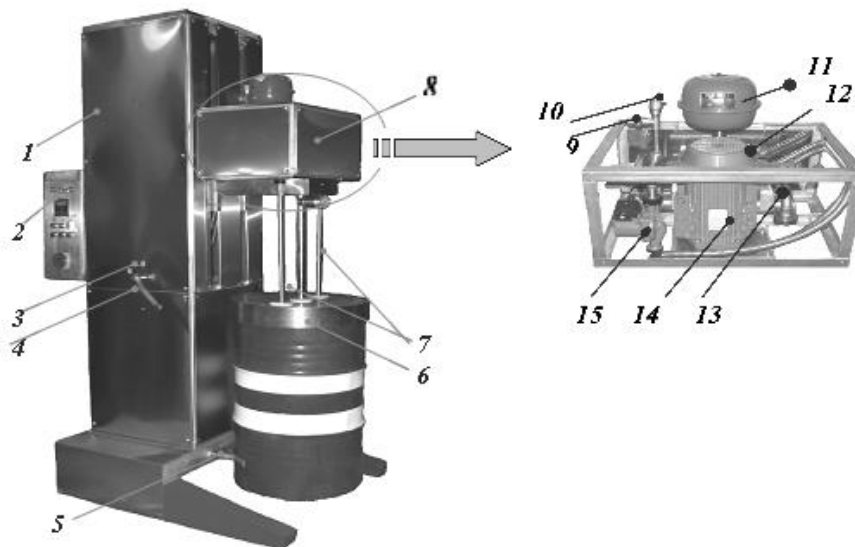


Рис. 15. Установка “Термобат-М”:

- 1 – корпус з вантажопідйомним механізмом; 2 – щит управління;
- 3 – перемикач вантажопідйомного механізму; 4 – ручка лебідки; 5 – упор;
- 6 – термоконтантний нагрівач з кришкою; 7 – трубопровід теплоносія;
- 8 – електронагрівальний апарат; 9 – штуцер для заливу теплоносія;
- 10 – повітревідвідник; 11 – розширювальний бачок; 12 – штуцер контролю переливу теплоносія; 13 – електроркотел; 14 – гвинтовий насос;
- 15 – циркуляційний насос.

Нагрівальний апарат 8 призначений для нагріву термоконтактного нагрівача 6 і плавлення речовини, а також відбору розплаву із зони контакту. Термоконтактний нагрівач 6 апарату 8 занурюється в речовину при її плавленні на задану глибину. Температура на поверхні розплаву підтримується вище температури плавлення речовини за рахунок конвективних потоків в розплаві.

Нагрівальний апарат 8 (рис. 15) містить: електричний проточний котел 13 з трубчастим електронагрівачем, розширювальним бачком 11 і циркуляційним насосом 15; термоконтактний нагрівач 6, виконаний у вигляді теплообмінника, з'єднаного двома паралельними трубами 7 з електричним котлом 13; кришка установки, адаптована до бочки з продуктом і має можливість переміщатись уздовж труб 7 підведення і відведення теплоносія; продуктивний насос 14 для відводу розплаву, при цьому вихідна труба виконана у вигляді гнучкого шланга закріплюється на штуцер. Продуктивний насос має режим реверсу. Насос відповідає вимогам GMP і має продуктивність при 750 об/хв. – 23 л/хв.

З використанням тепловізора марки Ti-160 проведені дослідження, в результаті яких вдалося зафіксувати рух нагрівача по довжині ємності, а також розподілення температур на поверхні термоконтактного нагрівача та всередині металевих ємностей. Термограми показують рівномірний прогрів термоконтактного нагрівача та всього об'єму розплаву при його русі до низу ємності і плавлення речовини. Завдяки низькому коефіцієнту теплопровідності речовина знаходиться у початковому в'язкому стані, а нагрівається та плавиться при контакті з нагрівачем. В кінці процесу спостерігаються конвективні потоки, що сприяє підтриманню температури розплаву на заданому рівні.

Результати досліджень термоконтактного нагрівання та плавлення вазеліну на промисловому зразку в Інституті технічної теплофізики НАНУ при температурі нагрівача 70...90 °С та температурі оточуючого середовища 16...20 °С показали, що при температурі нагрівача 70...80 °С процес плавлення є довготривалим, а інтенсифікувати процес можливо за рахунок підвищення температури до 85...90 °С. З урахуванням цього випробовування установки на території замовника в процесі впровадження проводились при температурі 90 °С.

Проведено монтаж і пуско-налагоджувальні роботи установки “Термобат-М” на ТОВ “Тернофарм”, м. Тернопіль, випробування на території фабрики та отримано акт впровадження. Також підготовлено і передано повний комплект документації, в який входить комплект документів, необхідний для валідації по GMP.

Заводські випробування установки “Термобат-М” проводились на ТОВ “Тернофарм”, м. Тернопіль при початковій температурі вазеліну 30 °С та 13 °С (температура теплоносія 90 °С, температура оточуючого середовища 30 °С). Випробування установки для нагрівання та плавлення на території замовника при різних початкових температурах речовини показали високу ефективність роботи установки, тому що, у порівнянні з існуючими, вдалося розплавити 200 л вазеліну за 2,5...3 години та отримати якісний рівномірно розплавлений вазелін у ємності.

За традиційною технологією речовину з ємності вивантажують у ванну з гріючою оболонкою та зміювиками або розміщують у нагрівальну камеру і витримують до повного розплавлення всього об'єму речовини. Через низький коефіцієнт теплопровідності вуглеводневих сумішей процес нагрівання та

плавлення йде дуже по-вільно і займає 12...24 години. В таких плавильних установках за години плавлення велика кількість теплової енергії безповоротно втрачається в оточуючому середовищі і сумарні енерговитрати можуть складати 0,25...0,37 кВт·год. на 1 кг речовини, що у 1,5...2 рази більше теоретичної величини теплоти плавлення. В розробленій установці тепла енергія підводиться безпосередньо до зони плавлення і розплавлена речовина одразу відводиться, що запобігає перегріванню розплаву. Завдяки цьому енерговитрати складають 0,2 кВт·год., а це лише на 8 % більше значення теплоти плавлення.

Таблиця 5.1

Порівняння енерговитрат при розплавленні 200 кг речовини
на різному обладнанні

	Обладнання	Час плавлення 200 кг, год.	Питомі енерговитрати, кВт·год./кг
1	Нагрівальна камера	24	0,37
2	Ванна	12	0,25
3	Установка “Термобат-М”	3	0,2

Отже, при застосуванні термоконтактного способу нагрівання та плавлення за допомогою заглибного нагрівача можливо отримати необхідну кількість розплавленого продукту, скоротити час отримання розплаву і зменшити енерговитрати.

Запропонований термоконтактний спосіб та установка “Термобат-М” для нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей, розроблена та виготовлена в ІТТФ НАН України, успішно пройшли дослідно-промислові випробування. Установку та повний комплект технічної документації передано у промислову експлуатацію на ТОВ “Тернофарм” (м. Тернопіль).

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз існуючих технологій та обладнання здійснення процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей показав, що ці технології є тривалими, трудомісткими та енергоємними.

2. Створені експериментальні стенди та розроблені методики проведення досліджень дозволили визначити кінетичні закономірності перебігу процесів нагрівання та плавлення.

3. Проведені експериментальні дослідження дозволили отримати залежність швидкості плавлення від температури нагрівача та тиску на поверхню речовини, отримано залежності в'язкості, теплоємності та питомої теплоти плавлення модельних середовищ в залежності від температури для розробки моделі.

4. Проведено моделювання процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей з примусовим видаленням розплаву (модель течії розплаву в кільцевому зазорі під дією перепаду тиску і руху стінки та модель течії розплаву в дисковому зазорі під нагрівачем).

5. В установці об'єднано декілька технологічних операцій, що дозволяє інтенсифікувати процес плавлення та зменшити витрати енергії.

6. В результаті проведених досліджень встановлено, що використання запропонованого методу та установки дозволяє в 1,2...1,7 разів скоротити витрати енергії у порівнянні з іншими методами.

7. На основі проведених досліджень розроблена та виготовлена установка для нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей "Термобат-М". Підготовлена технічна документація та кваліфікаційні документи для валідації за GMP.

8. Установка "Термобат-М" впроваджена на ТОВ "Тернофарм" в м. Тернопіль (акт впровадження від 9 липня 2014 року).

Позначення: C_p – питома теплоємність; G_m – масова витрата; Q, L_{melt} – тепловий потік; p – тиск; R – радіус; S – площа поперечного перерізу; T – температура; W_{fr} – витрата енергії на в'язке тертя; δ – ширина зазору; λ – коефіцієнт теплопровідності; μ – в'язкість; v_z – швидкість; ρ – густина; τ – час; τ_{rz} – напруження зсуву; w_0 – швидкість руху стінки; z, r – циліндричні координати; H – ентальпія.

Індекси: δ – розплав; cl – переріз зазору; h – нагрівач; m – масова; vs – вазелін; z – зазор.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Obodovych O.M., Stepanova O.E. An innovative method of thermal contact heating and melting of hydrocarbon mixtures to obtain soft dosage forms. Integration of traditional and innovative scientific researches: global trends and regional aspect: Collective monograph / edited by authors. 2nd ed. Riga, Latvia: "Baltija Publishing", 2020. P. 150-171. – ISBN: 978-9934-26-001-8. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-001-8-20>.

2. Шматок О.І., Степанова О.Є., Сильнягіна Н.Б. Инновационная технология и оборудование для получения суппозиторийев. Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. 2019. випуск 1, Т. 83. С. 57-61. [міжнародні наукометричні бази: Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus International, EBSCOhost, Scilit, WorldCat, CrossRef та ін.]. DOI: 10.15673/swonaft.v83i11418. (Авторкою виконано аналіз літературних джерел з виготовлення супозиторіїв, розробка інноваційної технології, написання та редагування тексту статті).

3. Грабов Л.М., Базєєв Р.Є., Степанова О.Є. Експериментальні дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих систем. Промышленная теплотехника. 2013. Т. 35, № 3. С. 13-21. [фахове видання]. (Авторкою проведено експериментальні дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих систем, обробку експериментальних даних).

4. Долінський А.А., Грабов Л.М., Степанова О.Є. Теплообмін при нагріванні і плавленні основ для виготовлення косметичних та фармацевтичних препаратів. Промышленная теплотехника. 2011. Т. 33, № 3. С. 12-19. [фахове видання]. *(Авторкою виконано аналіз існуючих методів та установок для нагрівання і плавлення вуглеводневих сумішей, написання та редагування тексту статті).*

5. Грабов Л.М., Посунько Д.В., Базєєв Р.Є., Степанова О.Є. Енергозбереження при термоконтактному плавленні жирів. Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. 2012. випуск 41, Т. 2. С. 50-55. [фахове видання]. *(Авторкою виконано аналіз існуючих методів та установок для нагрівання і плавлення твердих жирів, виявлено недоліки та запропоновано технологію і установку для інтенсифікації процесу плавлення).*

6. Грабов Л.М., Посунько Д.В., Степанова О.Є. Використання методів термоконтактного нагрівання та дискретно-імпульсного введення енергії в технології одержання супозиторіїв. Промышленная теплотехника. 2016. Т. 38, № 1. С. 31-40. [фахове видання]. *(Авторкою проведено аналіз традиційної технології отримання супозиторних лікарських форм, виявлено недоліки та запропоновано технологію і установку для інтенсифікації процесу на стадії плавлення основ).*

7. Грабов Л.Н., Посунько Д.В., Степанова О.Е. Методы разогрева тяжелых нефтепродуктов при транспортировке в железнодорожных цистернах. Энергетика та електрифікація. 2013. № 5. С. 2-6. [фахове видання]. *(Авторкою проведено аналіз методів перевезення та операцій зливу-наливу нафтопродуктів в цистернах, запропоновано установку для інтенсифікації розігрівання та плавлення нафтопродуктів).*

8. Грабов Л.Н., Степанова О.Е. Обработка вязких углеводородных систем с использованием метода ДИВЭ. Промышленная теплотехника. 2013. Т. 35, № 7. С. 182-187. [фахове видання]. *(Авторкою виконано аналіз літературних джерел процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей, обговорення результатів, запропоновано новий спосіб та обладнання).*

9. Долінський А.А., Грабова Т.Л., Степанова О.Є. Створення та впровадження ефективних технологій та устаткування для виробництва лікарських засобів. Частина 1. Промышленная теплотехника. – 2015. – Т. 37, № 4. – С. 31-43. [фахове видання]. *(Авторкою представлено аналіз установок “Термобат” для нагрівання та плавлення вуглеводневих основ, редагування статті).*

10. Грабов Л.Н., Степанова О.Е. Использование метода ДИВЭ для нагревания и сбора разлитой нефти. Наукові праці ОНАХТ. 2014. Т. 3, Вип. 45. С. 152-155. [фахове видання]. *(Авторкою проведено аналіз способів збору амбарної нафти, виявлено недоліки та запропоновано новий спосіб та обладнання для нагрівання нафтопродуктів).*

11. Долінський А.А., Грабов Л.М., Посунько Д.В., Степанова О.Є. Стан енергетики України та перспективи її розвитку. Энергетика та електрифікація. 2011. № 3. С. 3-6. [фахове видання]. *(Авторкою проведено аналіз стану енергетики України та перспективи її розвитку, обговорення результатів, написання та редагування тексту статті).*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

12. Грабов Л.Н., Степанова О.Е. Проблема нагревания нефтепродуктов в железнодорожных цистернах. Промышленная теплотехника. 2011. Т. 33, № 7. С. 69-70.
13. Грабов Л.Н., Степанова О.Е. Использование методов термоконтального нагревания и дискретно-импульсного ввода энергии в технологии получения суппозиторийев. Промышленная теплотехника. 2015. Т. 37, № 7. С. 137-138.
14. Степанова О.Е. Теплообмін при нагріванні та плавленні вуглеводневих сумішей. Збірник тез доповідей ІХ міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених “Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання” / Укладач Я.М. Корнієнко. К.: НТУУ “КПІ”, 2016. С. 68-69.
15. Степанова О.Є. Інтенсифікація теплообмінних процесів при термоконтальному методі плавлення вуглеводневих сумішей. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції “Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості”. К.: НУХТ, 2016. С. 56-57.
16. Степанова О.Є. Спосіб термоконтального нагрівання та плавлення основ для м'яких лікарських форм. Chemical Technology and Engineering (Хімічна технологія та інженерія): збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції (26-30 червня). Львів: Видавництво Львівської політехніки. 2017. С. 208-209.
17. Грабова Т.Л., Шматок О.І., Посулько Д.В., Сильнягіна Н.Б., Степанова О.Є. Инновационное тепломассообменное оборудование для фармацевтических технологий. Збірник праць XVII Міжнародної наукової конференції “Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв” (3-8 вересня). ОНАХТ, 2018. С. 199-204. *(Авторкою виконано підбір матеріалів та редагування тексту статті).*
18. Oleksii Shmatok, Stepanova Olesya, Rostislav Bazeev Innovative method and installation for heating and melting bases for the production of suppositories. Proceedings of the 2nd International Scientific Conference “Chemical Technology and Engineering – 2” JUNE 24-28TH, LVIV. 2019. P. 160-163. DOI: <https://doi.org/10.23939/cte2019.01.160>. ISSN 2664-1275 (Online). *(Авторкою представлено дослідження за допомогою тепловізора, запропоновано технологію і установку для інтенсифікації процесу на стадії плавлення основ при виготовленні супозиторіїв).*
19. Степанова О.Є., Посулько Д.В., Базєєв Р.Є. Энергоэффективный способ та установка для підготовки основи при одержанні супозиторіїв. Збірник тез Регіональної науково-практичної конференції “Енергія. Бізнес. Комфорт.”, 21 грудня 2018 р., м. Одеса, ОНАХТ. 2019. С. 14-16.
20. Шматок О.І., Степанова О.Є., Сильнягіна Н.Б. Инновационная технология для получения суппозиторийев. Збірник наукових праць VII міжнародної науково-практичної конференції “Інноваційні енерготехнології”, 9-13 вересня 2019. С. 54-59.
21. Недбайло О.М., Степанова О.Є. Энергоэффективный способ та установка для підготовки основи при одержанні супозиторіїв. ІХ Міжнародна науково-технічна конференція “Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції”, 10-11 листопада 2020 р. К.: НУХТ, 2020 р. С. 39-40.

22. Ободович О.М., Сильнягіна Н.Б., Переяславцева О.О., Степанова О.Є. Енергоефективний спосіб та установка для підготовки основи при одержанні супозиторіїв. Міжнародна науково-практична конференція “Проблеми сучасної теплоенергетики”, 10-11 грудня 2020 р. К.: НУБіП. С. 66-67.

Наукові праці, що додатково відображають наукові результати дисертації:

23. Установка для розігріву та плавлення в'язких речовин: пат. № 69860 Україна: МПК (2012.01) В 01 J 6/00. № U201114338; заявл. 05.12.2011; опубл. 10.05.2012. Бюл. № 9.

24. Установка для розігріву та плавлення в'язких систем: пат. № 77487 Україна: МПК (2013.01) В 01 J 6/00. № U201211634; заявл. 08.10.2012; опубл. 11.02.2013. Бюл. № 3.

АНОТАЦІЇ

Степанова О.Є. Інтенсифікація теплообмінних процесів при термоконтактному нагріванні та плавленні вуглеводневих сумішей. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 “Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика”. – Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена проблемам інтенсифікації теплообмінних процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей при використанні термоконтактного методу плавлення для усунення недоліків існуючих методів і створення вітчизняного інноваційного обладнання.

З метою інтенсифікації процесів нагрівання та плавлення розроблено спосіб плавлення вуглеводневих сумішей за рахунок контактного та конвективного переносу тепла із примусовим видаленням розплаву. На розробленому та виготовленому стенді досліджено вплив теплофізичних параметрів (температура нагрівача, тиск на поверхню речовини, початкова температура вуглеводневої суміші) на швидкість перебігу процесів нагрівання і плавлення для визначення оптимальних параметрів.

Досліджено термостійкість модельних середовищ (вазеліну та парафіну), що дали можливість визначити температуру початку термічного розкладання: для вазеліну – 152,5 °С, для парафіну – 172,7 °С, після якої починаються процеси, зв'язані з деструкцією матеріалу. Проведені дослідження теплоємності та теплоти плавлення методом диференціальної скандувальної калориметрії (ДСК) дозволили отримати залежність питомої теплоємності від температури та ДСК-криві плавлення вазеліну і парафіну, по яким була визначена питома теплота плавлення для вазеліну та парафіну.

Для оптимізації та розрахунків параметрів процесів нагрівання та плавлення розроблена математична модель процесів нагрівання та плавлення з примусовим видаленням розплаву, що дає можливість провести розрахунки для різноманітних вуглеводневих сумішей.

На основі проведених досліджень розроблена та виготовлена установка для нагрівання та плавлення в'язких і низькотеплопровідних субстанцій “Термобат-М”. При застосуванні термоконтактного методу нагріву за допомогою заглибного

нагрівача можливо отримати необхідну кількість продукту, що плавиться, скоротити час отримання розплаву і зменшити енерговитрати. Проведені випробування на промисловому зразку і заводські випробування на території ТОВ “Тернофарм” показали високу ефективність роботи установки, тому що вдалося розплавити 200 кг вазеліну за 2,5...3 години. По результатах заводських випробувань установка “Термобат-М” передана в експлуатацію на ТОВ “Тернофарм” в м. Тернопіль.

Ключові слова: вуглеводневі суміші, теплообмінні процеси, нагрівальний пристрій, нагрівання та плавлення, термоконтактний спосіб, дисковий зазор, кільцевий зазор, фазовий перехід, інтенсифікація.

Stepanova O.E. “Intensification of heat exchange processes during thermal contact heating and melting of hydrocarbon mixtures”. – Qualification scientific work as the manuscript.

Thesis for a Candidate of Technical Science degree by specialty 05.14.06 “Engineering thermophysics and industrial heat power engineering”. – Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the problems of intensification heat exchange processes of heating and melting hydrocarbon mixtures when using the thermal contact melting method to eliminate the shortcomings of existing methods and create domestic innovative equipment.

In order to intensify the heating and melting processes, a method of melting hydrocarbon mixtures due to contact and convective heat transfer with forced melt removal has been developed. The influence of thermophysical parameters on the rate of heating and melting processes to determine the optimal parameters was investigated on the developed and manufactured stand.

Research has been carried out to determine the viscosity, heat capacity, heat of phase transformation and thermal stability of hydrocarbon mixtures. To optimize and calculate the parameters of heating and melting processes, a mathematical model of heating and melting processes with forced removal of the melt has been developed, which allows calculations for various hydrocarbon mixtures.

On the basis of the research carried out, a device for heating and melting viscous and low-heat-conducting substances Termobat-M has been developed and manufactured. When using the thermal contact heating method with the help of an immersion heater, it is possible to obtain the required amount of the product that melts, reduce the time for obtaining the melt and reduce energy consumption. The tests carried out on an industrial model and factory tests on the territory of Ternopharm LLC showed a high efficiency of the installation, since it was possible to melt 200 kg of petroleum jelly in 2,5...3 hours. Based on the results of factory tests, the Ternopat-M unit was commissioned at Ternopharm LLC in Ternopil.

Keywords: hydrocarbon mixtures, heat exchange processes, heating device, heating and melting, thermocontact method, disk gap, ring gap, phase transition, intensification.