

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СТЕПАНОВА ОЛЕСЯ ЄВГЕНІЇВНА

УДК 536.242; 536.4

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

05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів та текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ О.Є. Степанова

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

АНОТАЦІЯ

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.

Технічно плавлення речовини здійснюється за допомогою підведення теплової енергії ззовні зразка (зовнішній нагрів, наприклад, в термічній печі) або безпосередньо у всьому його обсязі (внутрішній нагрів, наприклад, резистивний нагрів при пропущенні струму через зразок, або індукційний нагрів в високочастотному електромагнітному полі). Спосіб плавлення не впливає на основні характеристики процесу – температуру і приховану теплоту плавлення, але може впливати на якість кінцевого продукту, швидкість проведення процесу.

Традиційним і широко застосовуваним способом нагрівання вуглеводневих сумішей є їх нагрівання через поверхню теплообміну. Поверхнею теплообміну при цьому може служити стінка ємності з продуктом або поверхня зануреного всередину нагрівального елемента довільної конструкції. Варіантом здійснення цього способу може бути примусова циркуляція продукту через нагрівальний пристрій, що також має теплообмінні поверхні. Недолік цього способу в тому, що при обробці продуктів конвективний теплообмін ускладнений внаслідок їх високої в'язкості або наявності в продукті нетекучих компонентів, що різко призводить до перегріву продукту з погіршенням його якості і можливим утворенням нагару.

Відомий спосіб плавлення, при якому нагрівання здійснюється шляхом подачі гострого водяної пари безпосередньо в продукт. Технічні труднощі в

застосуванні цього способу при тепловій обробці харчових продуктів полягає в необхідності забезпечення належної чистоти пари, що подається всередину, яка широко застосовуваними парогенераторами не забезпечується.

Теплообмінні процеси нагрівання та плавлення мають велике значення для здійснення технологічних операцій у багатьох галузях, зокрема у фармацевтичній, харчовій та нафтопереробній промисловостях, де необхідно перевести в'язкі речовини або вуглеводневі суміші (вазелін, парафін, ланолін, мазут, жири та ін.) з твердого стану до достатньо плинного, щоб забезпечити їх подальше транспортування до наступних стадій виробництва. Ці вуглеводневі суміші мають низькі коефіцієнти теплопровідності, що ускладнює та уповільнює здійснення цих процесів. Часто ємності з такими вуглеводневими сумішами містяться в неопалюваних або погано опалюваних приміщеннях (складах, цехах і т.д.). Аналіз літературних джерел показав, що традиційні способи їх розплавлення енерговитратні, потребують значних затрат часу та контамінаційно небезпечні.

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 вітчизняною проблемою. Враховуючи все це, розробка і впровадження вітчизняних інноваційних технологій та обладнання для здійснення процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей є актуальною задачею.

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

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.

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.

На стенді для експериментального дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей досліджено вплив теплофізичних параметрів (температура нагрівача, тиск на дисковий нагрівач, початкова температура вуглеводневої суміші) на швидкість перебігу процесів нагрівання і плавлення для визначення оптимальних параметрів.

Модельними середовищами в даній роботі обрано вазелін та парафін. Вони є складними багатокомпонентними вуглеводневими сумішами, склад яких та властивості можуть варіюватися в залежності від марок, галузей промисловостей їх застосування, за ступенем очищення та від інших багатьох параметрів.

Дослідження термостійкості вазеліну та парафіну дали можливість по кривій зміні диференціальної температури ДТА (різниця температур між зразком та інертною речовиною) 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), що дозволили отримати залежність питомої теплоємності від температури та ДСК-криві плавлення вазеліну і парафіну, по яким була визначена питома теплота плавлення в інтервалах плавлення для вазеліну 5,5...75,0 °С та для парафіну 10,6...64,3 °С, 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.

Розрахована залежність зміни ентальпії від температури в об'ємі вазеліну дає можливість визначити кількість теплоти, що витрачається на будь-якому заданому інтервалі температур, та визначити теплоту, що витрачено окремо на плавлення і нагрівання.

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. Розроблене моделювання течії розплаву в кільцевому зазорі, що описує ламінарну течію під дією перепаду тиску і швидкістю руху стінки ємності відносно нагрівача дало можливість розрахувати середню швидкість розплаву через зазор. В результаті моделювання течії розплаву під нагрівачем, що безпосередньо пов'язане з моделюванням течії розплаву через кільцевий зазор, бо розплав переходить із дискового в кільцевий зазор як одна нерозривна течія, було визначено тиск на вході в кільцевий зазор між стінкою і нагрівачем.

На основі проведених досліджень розроблена та виготовлена установка для нагрівання та плавлення в'язких і низькотеплопровідних субстанцій "Термобат-М". Підготовлена технічна документація та кваліфікаційні документи для валідації по GMP (з англ. Good manufacturing practice – Надлежащая производственная практика). 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 в ІТТФ НАНУ і заводські випробування на території ТОВ "Тернофарм" показують, що вдалося досягнути високої продуктивності установки (в залежності від температури нагріву становить 52...83 л/год.). По результатам заводських випробувань установка "Термобат-М" передана в експлуатацію на ТОВ "Тернофарм" в м. Тернопіль (акт впровадження наведено у Додатку Д).

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

ABSTRACT

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.

Technically, the substance is melted by supplying thermal energy from the outside of the sample (external heating, for example, in a thermal furnace) or directly in its entirety (internal heating, such as resistive heating by passing current through the sample, or induction heating in a high-frequency electromagnetic field). The method of melting does not affect the main characteristics of the process – temperature and latent heat of fusion, but can affect the quality of the final product, the speed of the process.

The traditional and widely used method of heating hydrocarbon mixtures is to heat them through the heat exchange surface. The surface of heat exchange can be the wall of the container with the product or the surface of the immersed inside the heating element of any design. An embodiment of this method may be the forced circulation of the product through a heating device that also has heat exchange surfaces. The disadvantage of this method is that in the processing of dense products convective heat transfer is complicated due to high viscosity or the presence of non-flowing components in the product, which dramatically leads to overheating of the product with deteriorating quality and possible formation of scale.

There is a method of melting, in which heating is carried out by supplying hot water vapor directly to the product. The technical difficulties in applying this method in the heat treatment of food products is the need to ensure proper purity of the steam supplied inside, which is not provided by widely used steam generators. Heat exchange processes of heating and melting are of great importance for technological operations in many industries, in particular in the pharmaceutical, food and oil refining industries, where it is necessary to transfer viscous substances or hydrocarbon mixtures (vaseline, paraffin, lanolin, fuel oil, fats, etc.). solid state to sufficiently fluid to ensure their further transportation to the next stages of production. These hydrocarbon mixtures have low thermal conductivity, which complicates and slows down the implementation of these processes. Often tanks with such hydrocarbon mixtures are contained in unheated or poorly heated rooms (warehouses, shops, etc.). Analysis of the literature has shown that traditional methods of melting them are energy consuming, time consuming and contaminating.

Mostly equipment is purchased abroad, for the purchase of which a lot of money is spent. Outdated technologies and mostly the use of imported expensive equipment for heating and melting processes are a domestic problem. Given all this, the development and implementation of domestic innovative technologies and equipment for the processes of heating and melting of hydrocarbon mixtures is an urgent task.

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

A method for melting hydrocarbon mixtures due to contact and convective heat transfer with forced removal of the melt has been developed and an experimental stand has been created to determine the rational design of the plant and the optimal modes of its operation.

The method of melting a solid hydrocarbon mixture is to supply heat directly to the front of the phase transformation by means of a disk heater, which is in contact with the outer boundary of the molten substance, which gradually moves in it under gravity, and flowing the molten mixture through the gaps between the side surfaces of the heater and the wall of the tank.

The influence of thermophysical parameters (heater temperature, pressure on the disk heater, initial temperature of the hydrocarbon mixture) on the speed of heating and melting processes to determine the optimal parameters was investigated on the stand for experimental study of heating and melting processes of hydrocarbon mixtures.

Vaseline and paraffin were chosen as model media in this work. They are complex multicomponent hydrocarbon mixtures, the composition and properties of which may vary depending on the brands, industries in which they are used, the degree of purification and many other parameters.

Studies of the heat resistance of vaseline and paraffin made it possible to determine the temperature of the beginning of thermal decomposition from the curve of differential temperature DTA (temperature difference between the sample and the inert substance): for vaseline – 152.5 °C, for paraffin – 172.7 °C, after which begin the processes associated with the destruction of the material.

Studies of heat capacity and heat of fusion by method of differential scanning calorimetry (DSC) were performed, which allowed to obtain the dependence of specific heat on temperature and DSC curves of melting of vaseline and paraffin, which determined the specific heat of fusion in melting intervals for vaseline 5.5... 75 °C and for paraffin 10.6... 64.3 °C, which is, respectively, for vaseline – 68.95 kJ/kg, and for paraffin – 50.73 kJ/kg. These data are used to calculate heat transfer and modeling heating and melting processes.

The calculated dependence of the enthalpy change on the temperature in the volume of vaseline makes it possible to determine the amount of heat consumed at any given temperature range and to determine the heat consumed separately for melting and heating.

To optimize and calculate the parameters of the heating and melting processes, a mathematical model of the heating and melting processes with forced removal of the melt has been developed, which makes it possible to perform calculations for various hydrocarbon mixtures. The developed simulation of the melt flow in the annular gap, describing the laminar flow under the action of the pressure drop and the velocity of the tank wall relative to the heater made it possible to calculate the average melt velocity through the gap. As a result of simulating the flow of melt under the heater, which is directly related to modeling the flow of melt through the annular gap, because the melt passes from the disk to the annular gap as a single continuous flow, the pressure at the entrance to the annular gap between wall and heater.

On the basis of the conducted researches the installation for heating and melting of viscous and low-heat-conducting substances “Termobat-M” is developed and made. Technical documentation and qualification documents for GMP (Good Manufacturing Practice) validation have been prepared. When using the thermal contact method of heating with a submersible heater, it is possible to obtain the required amount of molten product, reduce the time of production of the melt and reduce energy consumption. Tests conducted at the IET NASU and factory tests on the territory of LLC “Ternopharm” show that it was possible to achieve high productivity of the installation (depending on the heating temperature is 52... 83 l/h). According to the results of factory tests, the “Termobat-M” installation was put into operation at LLC “Ternopharm” in Ternopil city (Act of implementation is presented in Attachment D).

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

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.

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.

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.

5. Грабов Л.М., Посунько Д.В., Базєєв Р.Є., Степанова О.Є. Энергобереження при термоконтактному плавленні жирів. Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. 2012. випуск 41, Т. 2. С. 50-55.

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.

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.

8. Грабов Л.Н., Степанова О.Е. Обработка вязких углеводородных систем с использованием метода ДИВЭ. Промышленная теплотехника. 2013. Т. 35, № 7. С. 182-187.

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.

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.

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.

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 термодетактного нагревания и дискретно-импульсного ввода энергии в технологии получения суппозиторий. 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 термоконтактному 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 термоконтактного 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., Посунько 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.

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.

19. Степанова О.Є., Посунько Д.В., Базеев Р.Є. Энергоеффективный 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 суппозиторияев. Збірник наукових праць VII міжнародної науково-практичної конференції “Інноваційні енерготехнології”, 9-13 вересня 2019. С. 54-59.

21. Недбайло О.М., Степанова О.Є. Энергоеффективный способ та установка для підготовки основи при одержанні супозиторіїв. IX Міжнародна

науково-технічна конференція “Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції”, 10-11 листопада 2020 р., м. Київ. К.: НУХТ, 2020 С. 39-40.
<https://drive.google.com/file/d/17Q3vnjSIpLXnF8jvF1Cf7dsZoN3fi5B0/view>.

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.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	17
ВСТУП	19
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ НАГРІВАННЯ ТА ПЛАВЛЕННЯ ВУГЛЕВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ	26
1.1 Фармацевтична промисловість	28
1.2 Харчова промисловість	42
1.3. Хімічна промисловість	44
1.4. Нафтопереробна промисловість	47
Висновки до першого розділу, мета і завдання дослідження	60
РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	62
2.1 Стенд для експериментального дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей	62
2.2 Прилад для визначення термостійкості	66
2.3 Методика проведення дослідження термостійкості	68
2.4 Дослідження фазових переходів при нагріванні	69
2.4.1 Прилад для дослідження фазових переходів	69
2.4.2 Методика проведення досліджень фазових переходів	72
2.5 Прилад і методика визначення теплоємності	74
2.4 Прилад для визначення в'язкості вазеліну	77
Висновки до розділу 2	78
РОЗДІЛ 3. КОМПЛЕКС ПРОВЕДЕНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ УСТАНОВКАХ	79
3.1 Вуглеводневі суміші та їх властивості. Обрані модельні середовища	79

3.2 Дослідження впливу теплофізичних параметрів на кінетику процесів нагрівання та плавлення	91
3.3 Дослідження теплоємності та теплоти плавлення	94
3.4 Дослідження термостійкості	97
3.5 Зміна ентальпії внаслідок нагрівання та плавлення	98
3.6 Дослідження в'язкості	104
Висновки до розділу 3	105

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ НАГРІВАННЯ ТА ПЛАВЛЕННЯ ВУГЛЕВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ З ПРИМУСОВИМ ВИДАЛЕННЯМ РОЗПЛАВУ	107
4.1 Моделювання течії розплаву через зазор	107
4.2 Течія розплаву в кільцевому зазорі під дією перепаду тиску і руху стінки	111
4.3 Розрахунок середньої швидкості та об'ємної витрати через зазор	121
4.4 Течія розплаву в дисковому зазорі під нагрівачем	125
4.5 Процеси теплообміну в кільцевому та дисковому зазорі під нагрівачем	127
Висновки до розділу 4	132

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ІННОВАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТА УСТАНОВКИ ДЛЯ НАГРІВАННЯ ТА ПЛАВЛЕННЯ ВУГЛЕВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ	133
5.1 Енергоефективна технологія для термоконтного нагрівання та плавлення	133
5.2 Виготовлена та впроваджена установка для термоконтного нагрівання та плавлення	136
Висновки до розділу 5	149

	16
ВИСНОВКИ	150
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	151
ДОДАТКИ	163

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

C_p – теплоємність, кДж/кг·К;

G_m – масова витрата, кг/с;

G_v – об'ємна витрата, м³/с;

Q, L_{melt} – тепловий потік, кДж/кг;

$H, \Delta H$ – ентальпія (питома теплота), Дж/кг;

p – тиск, Па;

R – радіус, м;

S – площа поперечного перерізу, м²;

T – температура, °С;

W_{fr} – витрата енергії на в'язке тертя;

δ – ширина зазору, м;

ρ – густина, кг/м³;

λ – коефіцієнт теплопровідності, кВт/м²·К;

μ – в'язкість, Па·с;

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²·К;

Nu – критерій Нуссельта;

v_z – швидкість, м/с;

τ – час, с, год.;

τ_{rz} – напруження зсуву;

w_0 – швидкість руху стінки, м/с;

g – прискорення вільного падіння (9,8 м/с²);

m – маса зразка, кг;

V – об'єм, м³;

Індекси:

δ – розплав;

теор – теоретичне значення;

cl – переріз зазору;

h – нагрівач;

m – масова;

v_s – вазелін;

z – зазор;

exp – експериментальне значення.

Скорочення:

ДСК – диференціальна сканувальна калориметрія;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

МЛФ – м'яка лікарська форма;

НТД – нормативно-технічна документація;

GMP – good manufacturing practice;

ТУ У – технічні умови України.

ВСТУП

Процеси нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей (вазелін, парафін, ланолін, жири, нафтопродукти) особливо великого значення набули у багатьох галузях промисловості, зокрема у фармацевтичній при виготовленні м'яких лікарських форм, нафтопереробній при зливанні нафтопродуктів з цистерн, харчовій при плавленні у жиротопках та ін.

Процеси нагрівання та плавлення є трудомісткими та енергозатратними, тому що необхідно перевести речовини або суміші з твердого стану до достатньо плинного, щоб забезпечити їх подальше транспортування до наступних стадій виробництва.

Традиційно для проведення процесів нагрівання та плавлення використовуються реактори, ванни, електротканинні нагрівачі, камери нагріву тощо. Такі методи є тривалими та енергоємними, спостерігаються великі градієнти температур, що найчастіше призводить до перегріву однієї частини речовини та недогріву іншої. Крім того, проблематичним і контамінаційно небезпечним є процес завантаження сумішей в котли та наступне їх вивантаження. Часто ємності з такими речовинами містяться в неопалюваних або погано опалюваних приміщеннях (складах, цехах і т.д.) та є надто в'язкими для їх вивантаження з тари і транспортування на наступні стадії виробництва, що ускладнює та уповільнює їх розплавлення. Тому, постає проблема інтенсифікації здійснення процесів нагрівання та плавлення та створення високоенергоєфективного обладнання.

Обґрунтування вибору теми дослідження. Аналіз літературних джерел щодо способів та обладнання для проведення процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей показав, що, враховуючи також теплофізичні властивості вуглеводневих сумішей (високу в'язкість та низький коефіцієнт теплопровідності), вони є енергозатратними, тривалими, енергоємними та контамінаційно небезпечними. 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 вітчизняною проблемою. Враховуючи все це, розробка і впровадження вітчизняних інноваційних технологій та обладнання для здійснення процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей є актуальною задачею.

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 кінетичних закономірностей перебігу процесів термоконтактного нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей, інтенсифікація теплообміну і розробка 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 термоконтактному нагріванні та плавленні вуглеводневих сумішей.

Методи дослідження – експериментальні методи з використанням вимірювальних засобів на лабораторних стендах з комп'ютерною реєстрацією і обробкою даних; методи фізичного та математичного моделювання 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.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, які захищаються.

Результати експериментів одержані з використанням сучасних автоматизованих приладів вимірювання, системами збору та обробки інформації. Використані стандартні апробовані раніше методики, які добре себе зарекомендували.

Достовірність результатів підтверджується задовільним узгодженням результатів досліджень представлених в дисертації з результатами, наведеними у літературі для подібних матеріалів.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше застосовано метод локального термоконтактного нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей.

- вперше на основі експериментальних та теоретичних випробувань досліджено вплив теплофізичних параметрів (температура нагрівача, тиск на дисковий нагрівач, початкова температура вуглеводневої суміші) на

швидкість перебігу процесів нагрівання і плавлення для визначення оптимальних параметрів.

- вперше проведені дослідження по визначенню теплоємності, теплоти фазового перетворення та термостійкості вуглеводневих сумішей.

- 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 одержаних результатів:

- у результаті експериментальних досліджень визначений 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”, що була впроваджена на ТОВ “Тернофарм”, м. Тернопіль (2014 р.).

Практичне значення результатів дисертаційної роботи підтверджується 2 патентами (“Установка для розігріву та плавлення в'язких речовин”, № 69860 та “Установка для розігріву та плавлення в'язких систем”, № 77487).

Результатом роботи є розроблена установка для нагрівання та плавлення в'язких і низькотеплопровідних субстанцій “Термобат-М” та

впроваджена на ТОВ “Тернофарм”, м. Тернопіль (Акт впровадження від 9 липня 2014 р.).

Особистий внесок здобувача. Основні результати роботи одержані та проаналізовані авторкою. Здійснено аналіз існуючих теплотехнологій і обладнання при нагріванні та плавленні вуглеводневих сумішей, виявлено недоліки способів та обладнання для проведення цих процесів. На підставі цього визначено напрямки та завдання досліджень. Виконано комплекс експериментальних досліджень по впливу теплофізичних параметрів на швидкість перебігу процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей з метою визначення оптимальних параметрів. Проведено обробку та узагальнення результатів досліджень при нагріванні та плавленні вазеліну та парафіну, представлено математичне моделювання для розрахунку перебігу цих процесів для обраної вуглеводневої суміші, сформульовано висновки і пропозиції. Розроблено та впроваджено енергоефективну теплотехнологію та установку для нагрівання та плавлення низькотеплопровідних речовин.

Особистий внесок Степанової О.Є. у роботи [2-11], [17-18] полягає в наступному. В роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: [2, 6, 8] – виконано аналіз літературних джерел з виготовлення супозиторіїв, аналіз традиційної технології отримання супозиторних лікарських форм, недоліки та запропоновано технологію і установку для інтенсифікації процесу на стадії плавлення основ, написання та редагування тексту статті; [3] – проведено експериментальні дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих систем, обробку експериментальних даних; [4] – виконано аналіз існуючих методів та установок для нагрівання і плавлення вуглеводневих сумішей, написання та редагування тексту статті; [5] – виконано аналіз існуючих методів та установок для нагрівання і плавлення твердих жирів, виявлено недоліки та запропоновано технологію і установку для інтенсифікації процесу плавлення; [7] – проведено аналіз методів перевезення та операцій зливу-наливу нафтопродуктів в цистернах, запропоновано установку для

інтенсифікації розігрівання та плавлення нафтопродуктів; [9] – представлено аналіз установок “Термобат” для нагрівання та плавлення вуглеводневих основ; [10] – проведено аналіз способів збору амбарної нафти, виявлено недоліки та запропоновано новий спосіб та обладнання для нагрівання нафтопродуктів; [11] – проведено аналіз стану енергетики України та перспективи її розвитку, обговорення результатів, написання та редагування тексту статті; [17] – виконано підбір матеріалів та редагування тексту статті; [18] – представлено дослідження за допомогою тепловізора, запропоновано технологію і установку для інтенсифікації процесу на стадії плавлення основ при виготовленні супузиторіїв.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і 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. Основний зміст роботи викладений 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 матеріалів доповідей на міжнародних наукових конференціях. За результатами роботи одержано 2 патенти України на корисну модель.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ НАГРІВАННЯ ТА ПЛАВЛЕННЯ ВУГЛЕВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ

Технічно плавлення речовини здійснюється за допомогою підведення теплової енергії ззовні зразка (зовнішній нагрів, наприклад, в термічній печі) або безпосередньо у всьому його обсязі (внутрішній нагрів, наприклад, резистивний нагрів при пропусканні струму через зразок, або індукційний нагрів в високочастотному електромагнітному полі). Спосіб плавлення не впливає на основні характеристики процесу – температуру і приховану теплоту плавлення, але може впливати на якість кінцевого продукту, швидкість проведення процесу.

Традиційним і широко застосовуваним способом нагрівання вуглеводневих сумішей є їх нагрівання через поверхню теплообміну. Поверхнею теплообміну при цьому може служити стінка ємності з продуктом або поверхня зануреного всередину нагрівального елемента довільної конструкції. Варіантом здійснення цього способу може бути примусова циркуляція продукту через нагрівальний пристрій, що також має теплообмінні поверхні.

Недолік цього способу в тому, що при обробці густих продуктів конвективний теплообмін ускладнений внаслідок високої в'язкості або наявності в продукті нетекучих компонентів, що різко призводить до перегріву продукту з погіршенням його якості і можливим утворенням нагару.

Відомий спосіб плавлення, при якому нагрівання здійснюється шляхом подачі гострого водяної пари безпосередньо в продукт. Технічні труднощі в застосуванні цього способу при тепловій обробці харчових продуктів полягає в необхідності забезпечення належної чистоти пари, що подається всередину, яка широко застосовуваними парогенераторами не забезпечується. Крім того,

цей спосіб не застосовується для обробки безводних продуктів через неминучу конденсацію вологи в продукті.

Теплообмінні процеси нагрівання та плавлення мають велике значення для здійснення технологічних операцій у багатьох галузях, зокрема у фармацевтичній, харчовій та нафтопереробній промисловостях, де необхідно перевести в'язкі речовини або вуглеводневі суміші (вазелін, парафін, ланолін, мазут, жири та ін.) з твердого стану до достатньо плинного, щоб забезпечити їх подальше транспортування до наступних стадій виробництва. Ці вуглеводневі суміші мають низькі коефіцієнти теплопровідності, що ускладнює та уповільнює здійснення цих процесів. Часто ємності з такими вуглеводневими сумішами містяться в неопалюваних або погано опалюваних приміщеннях (складах, цехах і т.д.). Аналіз літературних джерел показав, що традиційні способи їх розплавлення енерговитратні, потребують значних затрат часу та контамінаційно небезпечні. Отже, актуальною проблемою постає інтенсифікація технологічних процесів для обробки в'язких вуглеводневих сумішей.

У фармацевтичній промисловості відомі підприємства, що використовують сучасне, дороге, імпортне обладнання, витрачають декілька дів і більше на розплавлення вуглеводневих систем для виготовлення багатокомпонентних фармацевтичних препаратів (БФП). Подібні проблеми виникають і в харчовій промисловості при розплавленні жирів та олій. Основи для виготовлення БФП отримують після переробки нафти, яку перевозять у залізничних цистернах. Аналіз літературних джерел свідчить, що у нафтопереробній промисловості є також проблеми, пов'язані з обігрівом цистерн та розплавленням і зливом нафтопродуктів.

На рис. 1.1 показано технологічні схеми виробництва багатокомпонентних фармацевтичних препаратів та продуктів харчової промисловості, в яких на стадії підготовки основи застосовуються процеси нагрівання та плавлення.

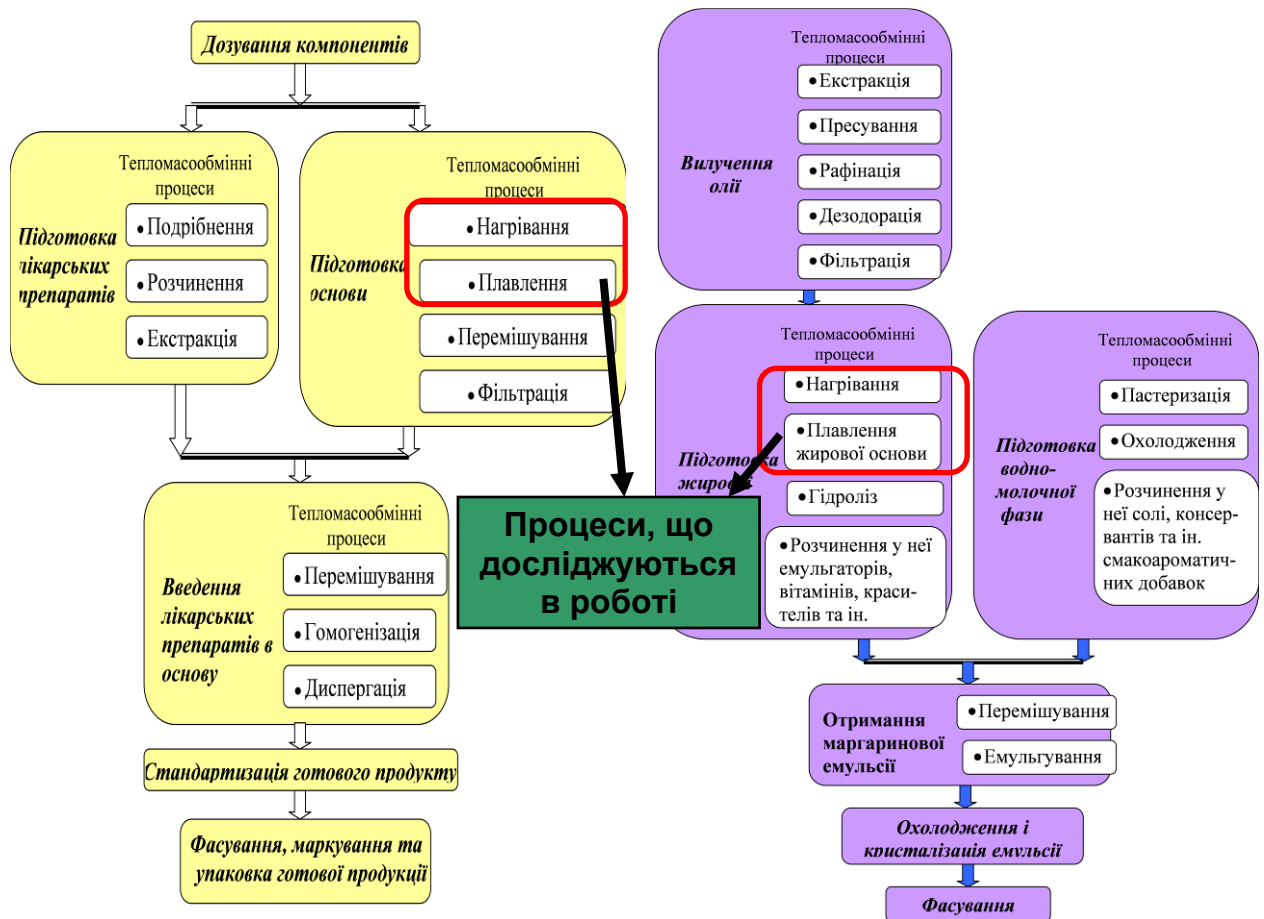


Рис. 1.1. Схема виробництва багатокомпонентних фармацевтичних препаратів та продуктів харчової промисловості [1-2]

Завданням даної роботи є розробка способу нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей, який дозволяє гарантувати його фізико-хімічні властивості і забезпечити високу швидкість здійснення процесу без небезпеки погіршення якості продукту.

1.1 Фармацевтична промисловість

У фармацевтичному виробництві частіше доводиться готувати комбіновані м'які лікарські форми (МЛФ), які містять компоненти, розчинні або нерозчинні в основі або у воді. Все це обумовлює технологію отримання мазей і застосовану апаратуру. Відмінними особливостями виробництва МЛФ в заводських умовах є те, що їх готують у спеціальних цехах із застосуванням складного устаткування за технологіями, які забезпечують їх стабільність не менше двох років, відповідно до розробленої та затвердженої нормативно-технічної документації НТД.

Виробництво МЛФ сконцентровано на фармацевтичних фабриках або великих хіміко-фармацевтичних заводах. У заводському виробництві м'яких лікарських форм використовується широкий асортимент основ і складне спеціальне обладнання. У технології МЛФ важливими є такі фактори: ступінь дисперсності лікарських речовин, вибір сплавлених компонентів основи, спосіб введення лікарських речовин в основу, час, швидкість та порядок змішування компонентів, температурний режим та інші параметри. Вони впливають на консистенцію, реологічні властивості, однорідність, стабільність при зберіганні та фармакотерапевтичну ефективність мазей [3].

Технологічний процес виробництва МЛФ на хіміко-фармацевтичних підприємствах складається із таких основних стадій: санітарна обробка виробництва; підготовка сировини і матеріалів (лікарських речовин, основи, упаковки тощо); введення лікарських речовин в основу; гомогенізація мазей; стандартизація готового продукту; фасування, маркування та упаковка готової продукції.

Важливою стадією в технології отримання м'яких лікарських форм є підготовка основи, тобто розплавлення компонентів вуглеводневої суміші основи. В залежності від фармакологічної дії МЛФ застосовуються гідрофобні, гідрофільні основи та їх суміші. Значення і роль основ в технології виробництва МЛФ важливі і різноманітні. Основи забезпечують необхідну масу мазей і відповідно належну концентрацію лікарських речовин, м'яку консистенцію, істотно впливають на їх стабільність. Ступінь вивільнення лікарських речовин з мазей, швидкість і повнота їх всмоктування багато в чому залежать від природи, складу і властивостей основи.

Для плавлення компонентів вуглеводневої суміші використовують різноманітні реактори з обігрівом оболонки.

Один з таких реакторів об'ємом 125 л, що призначений для проведення різних технологічних процесів (змішування, нагрівання, охолодження,

гомогенізація), застосовуваних у фармацевтичній і косметичній промисловості, представлено на рис. 1.2.



Рис. 1.2 – Повне покриття ємності нагрівальним елементом

Таблиця 1.1

Технічні характеристики реактора [4]

Параметр	Значення
Робочий тиск, бар:	
корпус	-0,7...+0,7
рубашка	
Мінімальна допустима робоча температура, °С:	
корпус, рубашка	+10
Максимальна допустима робоча температура, °С:	
корпус	+95
рубашка	+99
Частота обертів, об/хв:	
якірна мішалка	30...60
ротор гомогенізатора	1500...2940
Встановлена електрична потужність, кВт	11
Матеріал виготовлених частин	сталь 304, 316 L
Матеріал ущільнення (силоксанова)	гума силіконова

Також застосовуються реактори-плавители, що призначені для плавлення твердофазних жирів (отримання рідкої фази), в косметичній промисловості з подальшим їх підігрівом і зберіганням при заданій температурі (рис. 1.3).



Рис. 1.3 – Реактор-плавитель для плавлення твердофазних жирів

Таблиця 1.2

Технічні характеристики реактора [5]

Параметр	Значення
Об'єм корпуса, л:	
номінальний	50
робочий	40
мінімальний	10
Об'єм оболонки, л	28
Робоче середовище в оболонці	вода
Мінімальна допустима робоча температура, °С:	
корпус, оболонка	+10
Максимальна допустима робоча температура, °С:	
корпус	+90
оболонка	+90
ротор гомогенізатора	1500...2940
Встановлена електрична потужність ТЕНів, кВт	3
Габаритні розміри, мм	сталь 304, 316 L
довжина	810
ширина	590
висота	1050
Маса, кг	48

Реактори для змішування і плавлення вуглеводневих сумішей, призначений для плавлення і змішування компонентів вуглеводневих сумішей. Плавлення здійснюється електричними нагрівальними елементами (ТЕНами). Теплоізоляція реакторів виконана у вигляді сорочки. Процес змішування здійснюється конвекційним і механічним способами. Реактори обладнані мішалками та забезпечені системою вентиляції.

Але при роботі на такому обладнанні неможливо домогтися рівномірного прогріву всієї маси речовини, а отже, і якісної теплової обробки. Тому подібне обладнання проблематично використовувати для теплової обробки речовин з високою в'язкістю і з низьким коефіцієнтом теплопровідності.

Установки (рис. 1.4), що представляють собою ванну, в якій знаходиться змійовик для пара, решітка з соплами, продуктивний насос та механізм для перекидання бочки. Частина речовини вручну завантажується у ванну, в якій плавиться за допомогою перегрітого пару у змійовику. Ємність з речовиною за допомогою механізму для перекидання перевертається та ставиться на сопла. Продуктивним насосом в сопла подається розплав речовини і розмиває її у ємності.

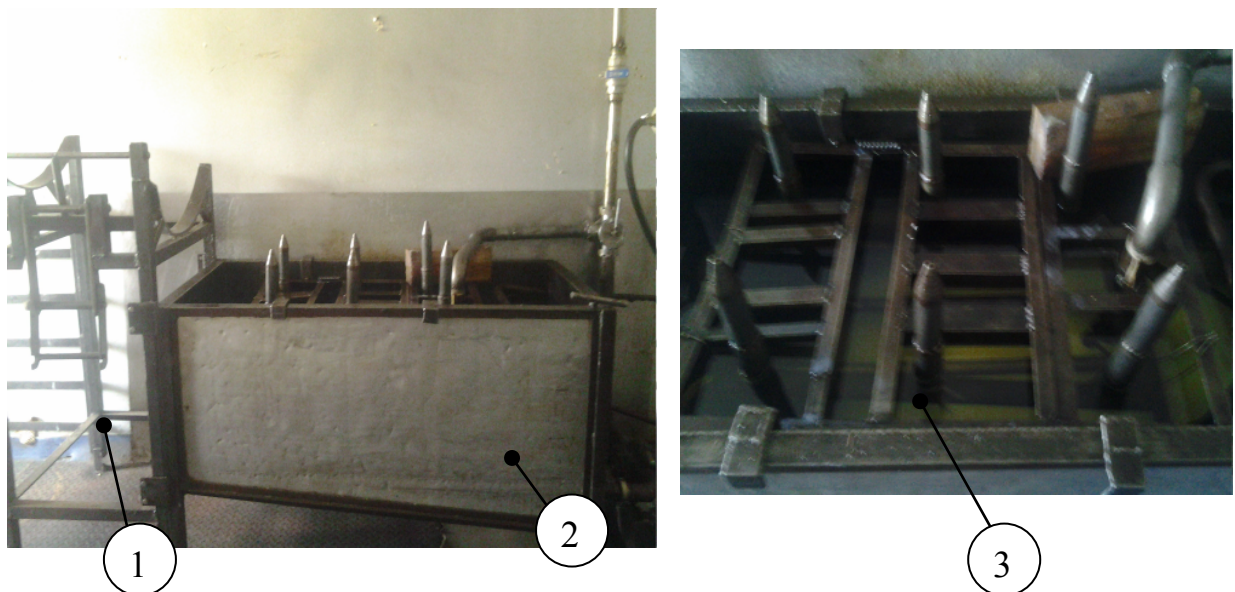


Рис. 1.4. Вітчизняна установка для нагрівання і плавлення:

1 – механізм для перекидання ємності; 2 – змійовик для пара; 3 – решітка з соплами.

Суттєвими недоліками такої установки є не відповідність вимогам до правил належної практики виробництва (GMP) для фармацевтичної промисловості, нерівномірний прогрів всієї маси вуглеводневої суміші, трудомісткий, бо потребує ручного завантаження речовини та контамінаційна небезпечність.

Реактори та ванни на даний час витісняються плоскими силіконовими, міканітовими (слюдяними) нагрівачами та обігрівачами у вигляді оболонки, яка повністю або частково покриває ємність [6], що знайшли широке застосування на підприємствах, що займаються виготовленням кремів, косметики для розплавлення воску, вазеліну, жирів і інших речовин. Ці способи зараз є найбільш простим рішенням для нагріву речовин, що зберігаються в металевих або пластикових бочках.

Також у промисловості для проведення цих процесів застосовується нагрівальний елемент з скловолоконним силіконовим покриттям, що розроблений американської фірмою “BRISKHEAT” [7] (рис. 1.5, 1.6). Нагрівальний елемент розташовується на зовнішній поверхні ємності.



Рис. 1.5. Повне покриття ємності нагрівальним елементом

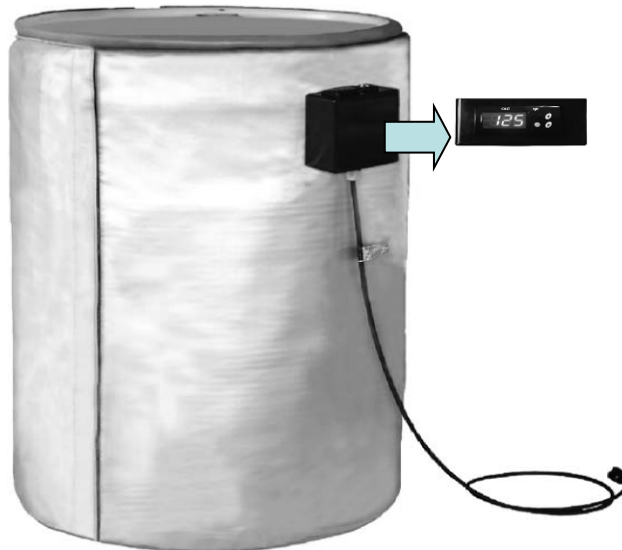


Рис. 1.6. Загальний вигляд повного покриття ємності нагрівальним елементом

Оболонка нагрівача – поліуретан-нейлон і поліестерова ізоляція забезпечують повну герметичність нагрівача, що роблять його стійким до потрапляння масел та інших рідин, він легко очищається і може бути використаний в умовах попадання опадів. Два ланцюга струму дозволяють використовувати нагрівальні сорочки не на повну потужність, що особливо актуально при неповному заповненні ємності. Наявність кріпильних елементів робить сорочку готовою до використання, дозволяє щільно закріпити її на контейнері, забезпечуючи щільний контакт для кращої теплопередачі. Обігрівачі для бочок у вигляді сорочки зроблені з легких, але міцних матеріалів і забезпечені регульованими пряжками-застібками для простого і швидкого монтажу. Температура регулюється за допомогою вбудованого термостата, з температурою шкалою від 0 до 90 °C (для пластикових і металевих бочок) і від 0 до 220 °C для металевих бочок, для розігріву речовин з більш високими реологічними властивостями. Циліндричний нагрівач розташовується на чисту, суху поверхню ємності. Відкривається з'єднувальна застезка-липучка на нагрівачі і розміщується на зовнішній поверхні ємності з регульованим термовимикачем у верхній третині нагрівача. Нагрівач повинен бути розташований на ємності, щоб він охоплював її від підлоги до верхньої її частини. Далі з'єднувальна застезка-

липучка закріплюється, таким чином обігрівач впритул буде обв'язаний без провисання.

Таблиця 1.3

Технічні характеристики нагрівального елемента з скловолоконним
силіконовим покриттям

№ п/п	Найменування параметру	Значення параметру
1.	Цифровий контролер, °C (°F): для FGDH серії для FGPDH серії	Регульований On/Off 10...232 (50...450) 10...71 (50...160)
2.	Довжина мережевого шнура, м	2
3.	Максимальна температура на поверхні нагрівання, °C (°F)	232 (450)
4.	Площа нагрівання для серії FGDH Площа нагрівання для FGPDH серії	нижня третина нижньої 2/3
5.	Напруга, В	моделі 120 або 240
6.	Електрична міцність, В	більше 2000

Але його застосування призведе до того, що речовина буде розплавлятися спочатку біля стінок ємності, а в середині залишатися не розплавленою.

В ІТТФ НАН У була створена експериментальна установка для плавлення основ багатьох МЛФ [8, 9], наприклад, вазеліну, яка складається з циліндричної ємності та комплекту стрічкових електротканних нагрівачів, розташованих на зовнішній поверхні ємності (рис. 1.7).

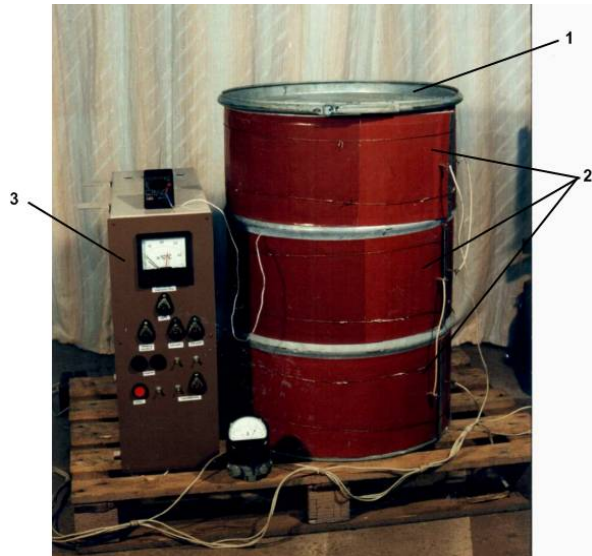


Рис. 1.7. Експериментальна установка для нагрівання і плавлення з використанням стрічкових електронагрівачів:

1 – циліндрична ємність; 2 – комплект стрічкових; 3 – шафа керування.

При використанні такого обладнання кількість тепла, яка необхідна для розігрівання ємності до заданої температури, визначається як:

$$Q_1 = C_1 \rho_1 (T_2 - T_1) (\pi d h \delta + \pi d^2 \delta / 2) \quad (1.1)$$

Кількість тепла, яка необхідна для розігрівання вазеліну до заданої температури, та переведення вазеліну в рідкий стан розраховуються відповідно за формулами:

$$Q_2 = C_2 \rho_2 V (T_2 - T_1) \quad (1.2)$$

та

$$Q_3 = R \rho_2 V \quad (1.3)$$

Загальна кількість тепла для розігріву речовини в циліндричній ємності буде складатися з суми цих значень та втрат тепла в оточуюче середовище.

Дія комплекту електронагрівачів базується на кондуктивному розігріві ємності та вазеліну. Використання нагрівачів з поверхневорозподіленим тепловиділенням дозволяє отримати тепловий потік на великій площі, що сприяє покращенню умов тепловіддачі. Збільшення площі тепловиділення порівняно з традиційними методами обігріву в теплових камерах призводить

до суттєвого зниження температури на нагрівальних елементах, що також зменшує ризик локального перегріву речовини.

Такі електронагрівачі виготовляються з ізоляційних і струмопровідних ниток. Тканина електронагрівача при цьому складається з двох систем ниток, розміщених взаємно перпендикулярно та переплетених між собою. Одна з систем струмопровідних ниток слугує нагрівальним елементом. В електронагрівачі застосовується стрічка типу ЛТН-1-40-340-1803 шириною 40 мм з опором одного метру 340 Ом. Стрічки зібрані в три секції. Резистивним елементом в кожній секції служить вуглеграфітова тканина УУТ-2 розміром 1750Ч230 мм. Він розміщувався в ізолюючій оболонці з силіконової гуми радіаційного отвердіння, дубльованій склотканиною (РЕТСАР) товщиною 0,2 мм з пробійною напругою 20 кВ/мм. З'єднання резистивного елемента з ізоляцією здійснювалось за допомогою кремній-органічного компаунда КЛТ-30. Тепловою ізоляцією нагрівачів слугували мати з базальтового супертонкого волокна. Електрична ізоляція стрічкового електронагрівача виконана трьома шарами гнучкого жаростійкого слюдопласту марки ИФ Г-КАХВ по ТУ 21-25-263-82. Його середня електрична міцність при температурі 20 °С становила 25,2 кВ/мм. Кожна секція ізолювалась зі сторони обігріваної поверхні двома шарами слюдопласту товщиною по 0,3 мм і одним шаром зі сторони теплоізоляції, виконаної войлоком з ультратонкого базальтового волокна виробництва Біличанського заводу "Теплозвукоізоляція". Електричні з'єднання секцій між собою і до джерел живлення струмом виконані термостійким проводом марки ПВЛТТ-1 по ТУ-16 505.911-76. Кріплення секцій стрічкового електронагрівача до обігріваної ємності здійснювалось бандажами із склотканини.



Рис. 1.8 – Процес плавлення вазеліну в ємності з використанням стрічкових електронагрівачів

Але при такому плавленні через стінки металевої ємності швидкість переміщення фронту плавлення в об'ємі мала завдяки низькій теплопровідності середовища (рис. 1.8). З наведеного фото видно, що вазелін розплавився біля стінок циліндричної ємності, а в середині залишився нерозплавленим.

Для приготування розплавів жирових компонентів медичних мас та мазей безпосередньо в первинній упаковці (металеві бочки) за допомогою термоелектронагрівачів (ТЕНів) в цеху з виробництва м'яких лікарських засобів (МЛФ) використовується мобільний радіатор [10], виробником якого є компанія Fabtech Technologies International Pvt. Ltd. (Індія). Нагрівник має двійний корпус з товстолистової сталі, в якій змонтовані гріючі елементи (ТЕНи), що розташовані по всій внутрішній поверхні мобільного радіатора. На індикаторі температури нагріву виставляється температура і час плавлення жирового компоненту. В залежності від розміру бочки включаються нагрівальні елементи мобільного радіатора (рис. 1.9). Після закінчення процесу плавлення мобільний радіатор разом з бочкою транспортується до системи приготування медичних мас і мазей.



Рис. 1.9. Установа для нагріву та плавлення з покриттям ємності нагрівальним елементом (виробник – Fabtech Technologies International Pvt. Ltd., Індія): 1 – верхній і середній нагрівальні елементи; 2 – нижній нагрівальний елемент; 3 – температурний датчик.

Для проведення процесів нагрівання та плавлення можуть також використовуватись нагрівальні камери [11-13]. Нагрівальна камера (рис. 1.10) призначена для підігріву сумішей і розчинів в бочках, кубових контейнерах та інших ємностях, а також для підтримки потрібного температурного режиму рідин, підготовки сировини для введення в технологічний процес. Камера призначена для використання всередині виробничих приміщень і являє собою міцну сталеву рамну конструкцію, обшиту зовнішніми панелями, що складаються з негорючих мінеральних плит, облицьованих з обох сторін оцинкованими сталевими листами (герметична конструкція). Конструкція має дві 2-х стулчасті двері із замками, що герметично закриваються, 2 полки завантаження, зі знімними завантажувальними ґратами, сталеві піддони (для збору сировини, в разі розливу), опорні плити. Нагрівальна система складається з теплообмінника і вентилятора, і системи управління, розташованої зовні з торцевого боку камери. Теплообмінник виготовлений з нержавіючих оребрених стрижнів. Для рівномірного

розподілу (циркуляції) нагрітого повітря застосовується відцентровий вентилятор. Колесо вентилятора і теплообмінника встановлені в оцинкованому повітряному коробі. Для припливу (або виходу) повітря у внутрішню частину камери є отвір, що захищений решіткою.



Рис. 1.10. Нагрівальна камера для ємностей з в'язкими вуглеводневими сумішами [11]

Принцип дії: в нагрівальну камеру на завантажувальні решітки встановлюється сировина в бочках/ємностях. Двері камери щільно закриваються, встановлюється режим розігріву. Радіальний вентилятор забирає повітря у верхній частині камери і направляє його по воздуховоду в теплообмінник для нагріву. Гаряче повітря (максимальна температура 130 °С) розподіляється рівномірно через канали в нижній частині камери, що дозволяє забезпечити вільну циркуляцію потоків повітря, що сприяє швидкому і рівномірному нагріванню розміщених всередині камери тарних місць з сировиною. Система управління контролює роботу нагрівачів теплообмінника, вентилятора, температуру і час розігріву сировини. Система управління складається з електричної шафи, що включає вузол контролю і дисплей. До складу камери входять: обмежувач аварійної температури, датчик температури, вентилятор обдування та контактні датчики дверці.

Технічні характеристики нагрівальної камери

Параметр	Значення
Технічні параметри системи нагріву:	
Циркуляція оборотного повітря, м/ч	8000
Потужність нагрівачів теплообмінника, кВт	15
Загальна потужність камери близько, кВт	20
Напруга, В	380...400
Розміри камери:	
зовнішні, мм	6900x1940x3900
внутрішні, мм	2x2700x1340
полки, мм	2x1500
товщина стінки, мм	100
об'єм піддону, л	1000
Максимальне навантаження, кг	1250
Місткість:	
бочки (200 л), шт.	32
кубові контейнери (1050x1210 мм), шт.	8
європіддони (800x1200 мм), шт.	12
хімічні піддони (1200x1200 мм), шт.	8
Вага камери в порожньому стані, кг	4300

Звичайно, вирішити проблему нагріву до технологічних температур речовин, що знаходяться в ємностях, можна було б, просто забезпечивши нормальне опалення приміщень, де стоять ці ємності. Однак це, очевидно, в більшості випадків нераціонально – вимагає багато зусиль і коштів. Інший спосіб – використовувати спеціальні камери розігріву. Але це спричинить за собою проблеми з вантаженням в камери і вивантаженням з них ємностей. До того ж, камери розігріву займають чимало місця, зменшуючи корисну площу приміщень, та мають дуже високу вартість. Недоліком є й те, що після

вилучення ємності з камери нагріта речовина придатна для використання лише дуже обмежений час, поки знову не охолоне.

1.2 Харчова промисловість

В харчовій промисловості процеси нагріву і плавлення використовуються для розплавлення високов'язких речовин з низьким коефіцієнтом теплопровідності, таких як жири та олії. Об'єктом плавлення можуть бути різні речовини як рослинного і тваринного, так і мінерального походження. Відомо, що кінетика процесу нагріву та плавлення залежить не тільки від властивостей речовини, а й від застосовуваного методу плавлення. Структурні і морфологічні зміни речовин, які відбуваються при цих процесах, мають велике значення, тому що визначають якість одержуваного продукту. Все це обумовлює різні вимоги до процесу плавлення кожної речовини, а отже, до режиму його проведення і вимагає розробки відповідного обладнання [14].

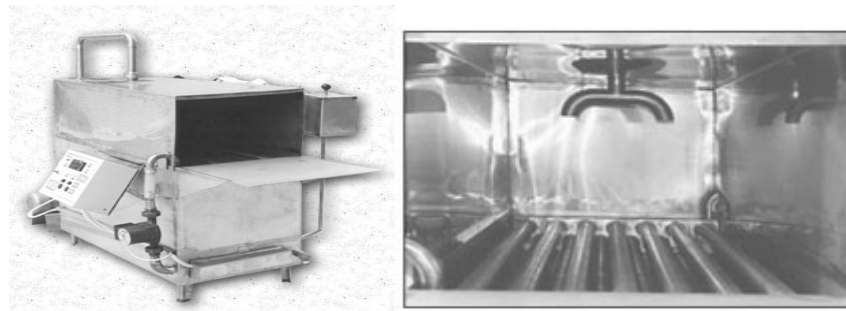
Вимоги до обладнання для нагріву та плавлення високов'язких речовин з низьким коефіцієнтом теплопровідності визначаються не тільки такими загальними вимогами як економічність, простота, зручність обслуговування, а й специфічними вимогами, які є визначальними – збереження початкових властивостей продукту: зовнішнього вигляду, кольору, смаку, запаху, біохімічних та харчових властивостей і якості, збільшення терміну зберігання, забезпечення відповідних бактеріальних норм.

Тому ні параметри теплового впливу на речовину, ні тривалість цього не можуть бути обрані довільно, а повинні встановлюватися для кожної конкретної речовини на основі досліджень процесів тепломасообміну, які відбуваються в ньому. Багато олій і жирів є термолабільними речовинами. Вони не витримують високих температур та тривалого нагрівання.

В харчовій промисловості використовуються жироплавители для плавлення жирів (рис. 1.11) [15-17], які представляють собою двохстінний резервуар, встановлений вертикально на опорах. Внутрішня ванна укладена в теплову сорочку з вбудованими ТЕНами. Для зручної експлуатації і

підвищення продуктивності теплопередавальні трубки розташовані під нахилом, що сприяє просуванню і обливанню речовини розплавленою масою продукту. Також передбачений кожух – кришка над теплопередавальною трубою, рециркуляційний трубопровід з насосом. В такій установці продукти для плавлення встановлюються на трубну решітку, в яку подається гаряча вода. За мірою розплавлення продукт стікає на похиле дно, де доплавляється за рахунок нагрітої сорочки. Температуру теплоносія можливо регулювати в межах від 0 до 150 °С в залежності від технології та продукту плавлення. Жироплавитель оснащений пультом керування, який включає в себе двоканальний вимірювач-регулятор температури теплоносія та насоса для поливу твердого продукту розплавом.

Такі жироплавители (жиротопки) використовуються в масложировій, кондитерській, косметичній та інших промисловостях [15].



а)

б)



в)

Рис. 1.11. Установки для нагрівання і плавлення жирів:
а – загальний вид установки з торцевою загрузкою; б – трубна решітка, по якій циркулює гарячий теплоносій; в – загальний вид установки відкритого типу.

Технічна характеристика установок з торцевою загрузкою наведена в табл. 1.5, а установок відкритого типу в табл. 1.6 [15].

Таблиця 1.5

Технічна характеристика установки з торцевою загрузкою

Найменування	Об'єм, л	Потужність, кВт	Маса, кг, не більше
УРЖ-НП-0,1	100	12,7	60
УРЖ-НП-0,3	300	21,1	150
УРЖ-НП-0,4	400	25,1	200
УРЖ-НП-0,6	600	33,5	300
УРЖ-НП-1,0	1000	46,5	500
УРЖ-НП-1,6	1600	-	650

Таблиця 1.6

Технічна характеристика установки відкритого типу

Найменування	Потужність, кВт	Об'єм, л
АРЖ-МИ-0,1	12	100
АРЖ-МИ-0,3	20	300
АРЖ-МИ-0,4	24	400
АРЖ-МИ-0,6	32	600
АРЖ-МИ-1,0	45	1000
АРЖ-МИ-1,6	61,5	1600

1.3 Хімічна промисловість

У хімічній промисловості процеси нагрівання та плавлення використовуються при прядінні капронового шовку [18]. Прядінням капронового шовку називається процес формування та намотування безперервної капронової нитки, що складається з одного або декількох елементарних волокон. У виробництві нитку формують з розплаву полікапроаміду, який безперервно подають спеціальними насосами на філь'єру і продавлюють через наявні в ній калібровані отвори. Проходячи через отвори, розплав у вигляді тонких струменів застигає в повітрі, утворюючи тонкі безперервні волокна, які рівномірно намотують на шпулю.

Технологічна схема процесу прядіння капронового шовку показана на рис. 1.12. Суху крихту полікапроаміду засипають у бункер, який за допомогою крана 2, компенсатора 3 і акумуляторного патрубку 4, з'єднаний з плавильною чашею 5. Кран 2 при завантаженні крихти закритий. Бункер і всю систему до плавильної чаші ретельно продувають азотом, потім відкривають кран і крихта надходить у плавильну чашу. Плавильна чаша є частиною прядильної головки, що представляє собою змінюваний прядильний блок, поміщений в обігрівану сорочку 6. Цей блок складається з наступних частин: плавильної чаші 5, усередині якої є обігрівана плавильна решітка 7 у вигляді плоскої спіралі, і насосного блоку 10, сполученого з плавильною чашею. У насосний блок входять два насоси – напірний 9 і дозуючий 8, а також філь'єрний комплект 11 з філь'єрою 12. Сорочка 6 і плавильна решітка 7 обігрівуються парами дінілу і мають температуру 260...290 °С.

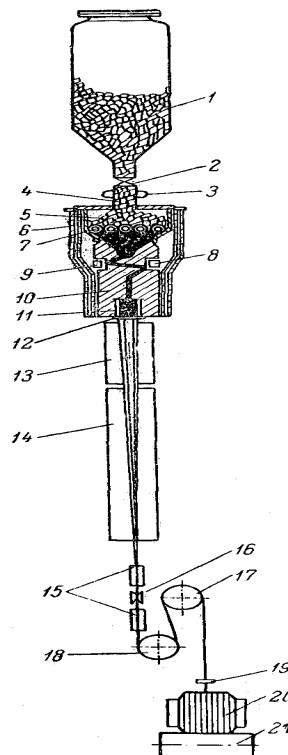


Рис. 1.12. Технологічна схема прядіння капронового шовку [18]:

- 1 – бункер; 2 – кран; 3 – компенсатор; 4 – акумуляторний патрубков;
 5 – плавильна чаша; 6 – парова сорочка; 7 – плавильна решітка; 8 – дозуючий насос; 9 – напірний насос; 10 – насосний блок; 11 – філь'єрний комплект;

12 – філь'єра; 13 – обдувна шахта; 14 – прядильна шахта; 15 – препаративні шайби; 16 – притискні ролики; 17, 18 – прядильні диски; 19 – нитководій; 20 – шпуля; 21 – фрикційний циліндр.

Рівномірна і необхідна тонкість нитки забезпечується постійним співвідношенням між кількістю розплавленої маси, що подається через отвори філь'єри в одиницю часу, і швидкістю намотування нитки (у розрахунку на ту ж одиницю часу).

Крихта плавиться, поступаючи на гарячу плавильну решітку, й утворюється розплав, що стікає між витками спіралі у плавильну чашу, звідки по каналу надходить до напірного насоса і т.д.

Продуктивність насоса повинна бути менше або дорівнювати кількості розплаву, що утворюється за той же час. Зазвичай швидкість відбору розплаву підтримують менше швидкості плавлення. У цьому випадку розплав накопичується в чаші і рівень його досягає решітки. Коли більша частина решітки зануриться в розплав, процес плавлення сповільнюється і рівень розплаву знижується. При цьому знову відкривається поверхня решітки, плавлення крихти прискорюється і т.д. Таким чином здійснюється саморегулювання процесу плавлення на плавильній решітці.

Якщо швидкість плавлення дорівнює швидкості відбору, то рівень розплаву у плавильній чаші можна підтримувати нижче решітки. Однак практично, здійснити це важко. Продуктивність плавильної решітки залежить від величини її поверхні, температури, розмірів зазорів між витками і розмірів крихти. Чим більше поверхня решітки, тим вище її продуктивність. Для збільшення продуктивності застосовують змійовики, трубки яких мають овальне або трикутний перетин. Таким чином збільшують активну поверхню решітки, не змінюючи діаметра плавильної чаші. З підвищенням температури поверхні решітки продуктивність її також збільшується. Однак її температура не повинна бути вище 290...295 °С. При більш високій температурі різко прискорюється процес термічної деструкції (розкладання) полікапроаміду.

Практично процес плавлення проводять при температурі 260...280 °С. Зазори між витками зміювика повинні бути не менше 2...3 мм, тобто достатніми для протікання розплаву. Якщо величина їх менше, продуктивність решітки знижується. При великих зазорах крихта провалюється, не розплавляючись, і потрапляє на сітку, встановлену перед насосом, що дуже небажано, а при збільшенні розмірів крихти зменшується поверхня зіткнення її з решіткою і знижується швидкість розплавлення, що також небажано.

Процес плавлення крихти на решітці і подальше перебування розплаву в чаші і каналах прядильного блоку супроводжується якісними змінами полікапроаміду. Як відомо, рівновага залежить від температурних умов. При плавленні крихти, що містить 1...3 % низькомолекулярних з'єднань, кількість останніх зростає і досягає рівноважного при даній температурі. Дослідним шляхом встановлено, що для досягнення рівноважного стану при температурі 260 °С потрібно близько 6 годин.

1.4 Нафтопереробна промисловість

У нафтопереробній промисловості за допомогою обігріву цистерн з продуктом вирішується одне з найбільш складних і трудомістких завдань, яке пов'язано з операціями зливу-наливання нафтопродуктів з низьким коефіцієнтом теплопровідності. Ці операції зв'язані із значними матеріальними і енергетичними витратами, а також тривалим простоем ємностей і цистерн, що знаходяться під завантаженням. Сукупно ці проблеми, що пов'язані з загальноприйнятою технологією транспортування, зливу у сховища, зберігання і подачі на спалювання мазутного палива, призводять до величезних масштабів непрямих втрат.

Географічне положення України, розвинена транспортна мережа, наявність незамерзаючих портів повинні сприяти тому, щоб обсяги транзитних вантажопотоків через її територію збільшувалися. Для України розвиток транзитних перевезень означає суттєве збільшення надходжень до бюджету, є одним з реальних джерел фінансування транспорту [19].

На сьогоднішній день вантажну основу українського транзиту складають енергетичні матеріали, нафта та нафтопродукти – 47,3 %, при цьому транзит російської нафти через Україну хоч і зменшується, але все ще становить досить вагомі 14...15 % від загального потоку [20].

Незважаючи на розширення системи трубопроводів, залізничне перевезення палива не втрачає своєї актуальності ні в Україні, ні в країнах СНД. Спостерігається стійке зростання попиту на транспортування залізницею всіх видів нафтопродуктів. Майже 95 % транзитних потоків входить в Україну через залізничні переходи. Згідно з даними інформаційного агентства Reuters, в Україні за період першого і другого кварталів 2011 перевезення бензину, мазуту та стисненого газу зросла на 2,2 % порівняно з аналогічними показниками попереднього року [21]. За 2012 рік в країну було ввезено 7,615 млн. тонн нафтопродуктів і нафти (з Білорусії, Росії, Литви), а на експорт Україна торік поставила 1,62 млн. тонн нафтопродуктів і нафти.

Технологічні потужності національної транспортної інфраструктури дозволяють щорічно перевозити залізницями, внутрішнім водним та автомобільним транспортом і переробляти в портах понад 60...70 млн. т і доставляти трубопроводами до 200 млн. т товарів. Однак фактичні обсяги транзиту становлять лише 200 млн. т, тобто наявний транзитний потенціал України використовується на 70 %, а транспорт загального користування (без трубопроводів) – лише на 50 %.

Згідно з прогнозами, озвученими на Другій Щорічній Конференції “Ринок залізничних перевезень нафти та нафтопродуктів” (Москва), протягом декількох років транспортування нафтопродуктів по залізницях значно зросте. А якщо врахувати поживлення в інвестуванні деяких українських нафтопереробних комбінатів, очікується черговий сплеск попиту на залізничну доставку нафти-сирцю та вивезення готового палива. Позитивним є ще й той факт, що Україна володіє достатньою кількістю цистерн для забезпечення перевезень нафти, палива і газу.

В'язкі нафтопродукти доставляються до місця зливу в спеціальних цистернах (рис. 1.13, 1.14), обладнаних нагрівачами і тепловою ізоляцією, що дозволяє в процесі транспортування зберігати тепло, яке мав продукт при наливанні в цистерну, або в нафтопродукт при завантаженні в цистерну вносять дорогі присадки, які знижують в'язкість і температуру його застигання. Налив і, особливо, злив високов'язких нафтопродуктів (мазуту, бітуму, важкої нафти та ін.) вимагає їх попереднього розігрівання, застосування зливно-наливної спеціального обладнання, а також оснащення цистерн і ємностей засобами розігріву. Відсутність коштів розігріву призводить до збільшення часу обробки цистерн та ємностей і неповного зливу з них нафтопродуктів. Частина цих залишків безповоротно втрачається через неможливість утилізації. Значна кількість нафтопродуктів залишається на стінках транспортних ємностей, зменшуючи їх вантажомісткість і погіршуючи якість продукту, який знову завантажується.

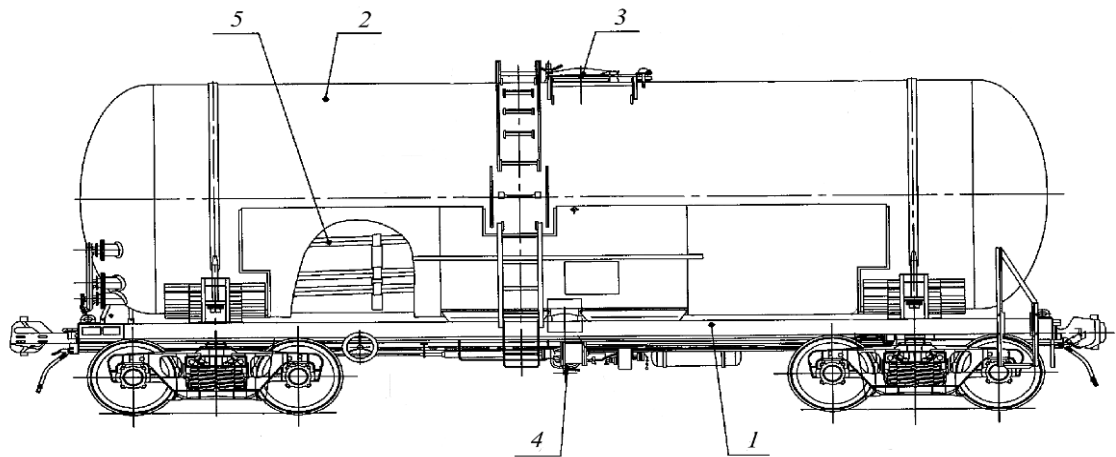


Рис. 1.13. Схема залізничної цистерни для нафтопродуктів [22]:

- 1 – платформа, 2 – цистерна, 3 – завантажувальний пристрій,
4 – зливний пристрій, 5 – підігрівальні трубки.

На рис. 1.14 представлено загальний вигляд вагона-цистерни для перевезення нафтопродуктів по залізниці, до складу якої входять: нагрівачі, зливний пристрій, оболонка та пристрій для завантаження.



Рис. 1.14. Вагон-цистерна [22]

Відомі такі методи розігріву нафтопродуктів з низьким коефіцієнтом теплопровідності в залізничних цистернах [23, 24]: підігрівом відкритим паром; цистерни з паровою сорочкою; високочастотний нагрів нафтопродукту; циркуляційний підігрів; розігрів цистерн у закритих тепляках.

Високочастотний нагрів нафтопродукту при зливі з цистерн є недоцільним, тому що його застосування пов'язано з великими витратами енергії.

Розігрівання цистерн з нафтопродуктом гострою паром, що подається безпосередньо в продукт є одним з найпоширеніших способів. Але він призводить до обводнення нафтопродукту, що зливається з цистерни, до декількох десятків відсотків, що, у свою чергу, після зливу продукту з цистерн вимагає час на його відстій і вживання дорогих деемульгаторів для видалення води, що знижує його споживчі якості. У холодну погоду під час розігрівання залізничних цистерн гострою паром, вміст води в мазуті може досягати 10...15 %. Під час подальшого зберігання мазут додатково обводнюється атмосферною вологою. Аналізи якості мазуту показують, що вміст води в пробах, відібраних на рівні 4...5 м від днища, досягає 5 %, а в придонних шарах 12 %. При недостатньому підігріванні відстоювання води у високов'язкому мазуті, що має високу густину, стає практично неможливим і з великою вірогідністю можна вважати, що до споживачів поступає надмірно обводнений мазут. Якість мазуту може погіршати і при змішуванні його в

ємностях нафтобаз з мазутом, в якому унаслідок тривалого зберігання якісні характеристики не відповідають стандартним вимогам. Змішування ж вуглеводнів різного природного походження, що мають несумісну структурну будову молекул, може привести до швидкої втрати стабільності палива. Тому кожна операція по змішуванню палива несе в собі невизначеність за якістю кінцевого продукту.

Недиспергований мазут з обводненістю 50 % непридатний до спалювання. В той же час, після ефективної диспергації такий мазут, хоч і з деякою втратою ККД, можливо спалити і передати теплоносію усю теплоту згоряння водомазутної емульсії і, таким чином повернути в господарський оборот “непридатне” паливо.

Зневоднення в основному виконується шляхом відстоювання. Це вимагає наявності додаткових сховищ великої ємності, які необхідно підігрівати, на що також витрачається енергія. Із-за близькості густин мазуту і води, це тривалий процес, в результаті якого виникає інша проблема – утилізації або очищення підтоварних вод.

Відомо, що ефективність очисних споруд становить 78,5...94,3 %. Тобто від 5,7 до 21,5 % мазуту викидається в каналізацію разом з водою. Таким чином, прямі втрати мазуту при утилізації мазутних стоків складають сотні тонн на рік на одну котельню, не кажучи вже про витрати на його утилізацію та екологічну шкоду [25].

Розігрів в тепляках здійснюється підігрітим повітрям, яке нагрівається в тепляках випромінюванням трубчастих екранів, які обігріваються парою. Цей спосіб хоч і має ряд переваг у порівнянні з розігрівом відкритим паром (зменшення часу розігріву, відсутність обводнення, зменшення забруднення території мазутозливу), але є енергоємним.

Цистерни з паровою сорочкою, в яких пара під тиском підводиться до штуцера сорочки, заповнює її по всій довжині цистерни та розігріває нафтопродукт. У таких цистернах нафтопродукт може бути злитий у 2,2...4,2 рази швидше без обводнення, ніж з цистерн звичайної конструкції, але

конструкція цистерни з паровою сорочкою призводить до збільшення маси цистерн приблизно на 5 %.

У останнє десятиріччя на деяких нафтобазах при зливі нафтопродуктів з залізничних цистерн почали застосовувати системи циркуляційного розігріву, які виключають обводнення.

Всі реалізовані в даний час системи циркуляційного розігріву мають замкнутий контур, в якому виконуються наступні операції [26]:

- відбір холодного продукту з цистерни в контур циркуляційного розігріву;
- прокачування цього продукту насосом через зовнішній теплообмінник;
- повернення розігрітого продукту у місце відбору продукту з цистерни в контур циркуляційного розігріву.

Відбір холодного продукту з цистерни і повернення розігрітого продукту в цистерну може виконуватися як через нижній зливний клапан, так і через пристрій, який занурюється в цистерну через верхній люк.

Необхідність в організації контуру циркуляції, як через нижній зливний клапан, так і через верхній люк цистерни зв'язана з тим, що в числі поступаючи під вивантаження цистерн іноді трапляються цистерни з несправним донним клапаном, який не відкривається. В даному випадку розігрів продукту в цистерні можна виконати тільки за допомогою циркуляційного розігріву, який організовується через верхній люк цистерни.

Також існують індивідуальні схеми циркуляційного розігріву, розраховані на розігрів кожної цистерни окремо, а також централізовані системи циркуляційного розігріву, розраховані на розігрів декількох цистерн в одному контурі.

Широко поширені централізовані системи циркуляційного розігріву мають істотні недоліки [26]:

- можливість проливу розігріваємого продукту через верхній люк цистерни із-за складності організації на кожній цистерні балансу кількості підведеного і відведеного продукту;

- наявність довгих колекторів з гарячим продуктом під високим тиском з великою кількістю відборів, що створює ймовірність проливу гарячого продукту в оточуюче середовище;

- складність оптимізації процесів тепло- та масообміну всередині кожної цистерни;

- необхідність резервування дорогого насосного та теплообмінного обладнання.

Незважаючи на велику різноманітність реалізованих схем циркуляційного розігріву, усі вони погано працюють при розігріві в'язких і застигаючих нафтопродуктів. Це пов'язано з помилковою концепцією тепло- та масообміну, що лежить в основі усіх застосовуваних схем.

За пропозицією розробників цих систем, розігріти холодний продукт у цистерні можливо, подаючи в нього високо напірні струмені гарячого продукту, який змішується з холодним і віддає йому свою теплову енергію, яку придбав в зовнішньому теплообміннику з спеціально організованими каналами протікання і при високому температурному напорі зі сторони теплоносія.

Однак, як показала практика, ця пропозиція не відповідає дійсності.

Для реалізації вказаної пропозиції необхідно всередині цистерни створити такі ж ефективні умови теплопередачі, як і у зовнішньому теплообміннику, але в цьому і полягає суть проблеми, що розглядається.

Високонапірні струмені гарячого продукту, що подаються у застиглий продукт, входять в нього без помітного перемішування і, в результаті, гарячий продукт, що подається в цистерну, або пробиває товщу холодного продукту в цистерні і збирається на його поверхні, або утворює в об'ємі холодного продукту, поблизу місця підведення гарячого продукту, замкнуті порожнини з гарячим продуктом.

Обидва результати несприятливі з точки зору ефективності роботи системи, тому що в першому випадку в контур циркуляційного розігріву буде надходити погано текучий продукт, який неможливо перекачати по контуру розігріву, а в другому випадку в контур буде подаватися вже розігрітий продукт, який далі розігрівати не можна.

Відомі пристрої розігріву в'язких середовищ "КВАРК" марки УРВС [27], що призначені для високоефективного енергозберігаючого розігріву і перемішування в'язких середовищ в цистернах, баках, ємностях за допомогою теплової та кінетичної енергії гострого пара, парогазової суміші, гарячого газу, гарячого повітря або самого розігрітого середовища.

Застосування різних видів УРВС:

- заглибні УРВС(З) застосовуються для прискореного зливу нафти, мазуту, гудрону, бітуму, їдкого натру, синтетичних кислот, лугів, патоки, мила, жирів, масел, інших подібних речовин, що знаходяться у в'язкому і рідкому стані; пропарювання цистерн, баків, ємностей різного об'єму і конфігурації;

- дискові УРВС(Д) – для розігріву середовищ, що знаходяться у в'язкому і твердому стані; пропарювання цистерн, баків, ємностей різного об'єму і конфігурації;

- напірні УРВС(Н) – для відкачування і перекачування розігрітих в'язких середовищ; розігріву та відкачування в'язких донних відкладень; відкачування нафтопродуктів з поверхні води;

- гомогенізуючі УРВС(Г) – для гомогенізації нафти, нафтопродуктів, сумішей в'язких середовищ; гомогенізації в'язких середовищ в сховищах для запобігання розшарування і появи донних відкладень; гомогенізації нафти і сумішей в'язких середовищ перед технологічними процесами;

- паливні УРВС(П) – для підготовки дрібнодисперсних водопаливних емульсій перед спалюванням палива в опалювальних або промислових котлах, печах, парогенераторах, пальниках технологічного обладнання.

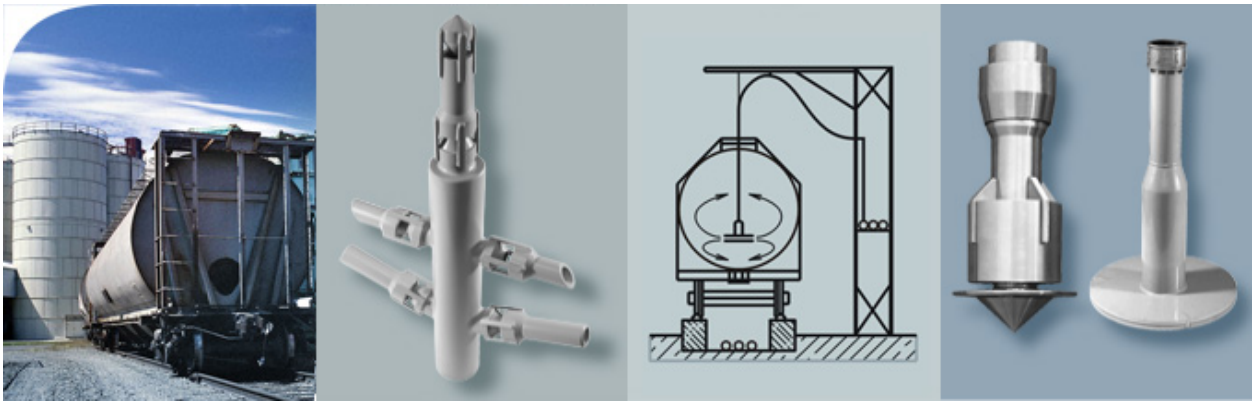


Рис. 1.15. Пристрої розігріву в'язких середовищ “КВАРК”

Принцип дії УРВС:

Апарат занурюється в об'єм, що потрібно розігріти, або розміщується на поверхню цього об'єму. Активне середовище (гостра пара, парогазова суміш, гарячий газ, гаряче повітря, саме розігріте середовище) через підвідний колектор подається на робочі сопла. Стікаючи з сопел з високою швидкістю, активне середовище інжектуює розігріване середовище. Далі в камері змішування апарату відбувається нагрівання і (або) диспергування і гомогенізація в'язкого середовища. Отримана гаряча (гомогенізована) суміш викидається в розігріваний об'єм або направляється споживачеві. Пристрій розігріву в'язких середовищ має малу вагу і габарити. Конструкція УРВС не містить обертових, тертьових, різбових і вальцювальних з'єднань і являє собою пристрій в зборі з виходом для приєднання до магістралі активного середовища через фланцеве або муфтове з'єднання. Приєднувальні розміри уніфіковані для застосування в діючих системах. За рахунок ефективної обробки гарячими струменями застійних придонних і пристінкових областей УРВС забезпечує високий ступінь очищення ємності від особливо в'язких відкладень і забезпечує повний злив розігрітої рідини. УРВС зводить втрати робочого часу на злив продукту з ємності до технологічного мінімуму, забезпечуючи необхідну циклічність виробництва. При використанні УРВС не відбувається викидів пари в атмосферу, звичайних при використанні традиційних пристроїв.

Технічні характеристики УРВС (З, Д)* [27]

Характеристика	УРВС-1	УРВС-2	УРВС-3	УРВС-4	УРВС-5
Номінальна теплова потужність, кВт (Гкал/год)	625 (0,54)	835 (0,72)	1250 (1,08)	1670 (1,44)	2500 (2,15)
Час розігріву цистерни 60 м ³ , хв**	240	180	120	90	60
Витрата пара (P=0,3 МПа), т/год	0,82	1,1	1,65	2,2	3,3
Приєднувальний діаметр, Ду, мм	50	65	80	100	125
Маса, кг	8	10	12,5	16	20

*Апарати модифікацій УРВС (Н, Г, П) проектуються індивідуально під реальні умови конкретного об'єкта.

** Час розігріву за допомогою гарячого газу (повітря) перевищує час розігріву за допомогою пара і залежить від температури даного газу (повітря).

У промисловості також використовується установка для розігріву нафтопродуктів з твердим залишком, який представляє собою застиглий у торцях цистерни нафтопродукт, і зливу їх із залізничних цистерн [28]. Установка (рис. 1.16) складається з пристрою нижнього зливу 1 з телескопічним гідромонітором з форсунками 2, з'єднане зі зливним колектором 3, насосом 4 і теплообмінником 5, нижній напірний трубопровід 6, а також пристрій верхнього розмиву твердого залишку 7, з'єднане з виходом теплообмінника 5. Ця установка дозволяє уникнути обводнення нафтопродукту за рахунок розігріву не паром, а самим гарячим продуктом, що пройшов через теплообмінник, а також видалити застиглий нафтопродукт з торців цистерни.

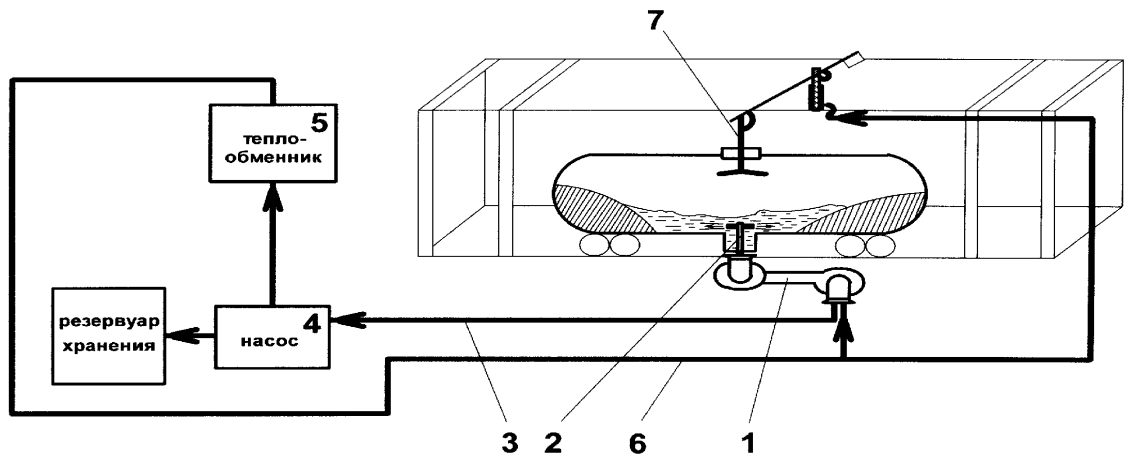


Рис. 1.16. Схема розігріву нафтопродуктів і зливу їх із залізничної цистерни [28]:

1 – пристрій нижнього зливу; 2 – гідромонітор з форсунками; 3 – зливний колектор; 4 – насос; 5 – теплообмінник; 6 – нижній напірний трубопровід.

Після вивантаження з цистерни двох третин об'єму нафтопродукту через пристрій нижнього зливу 1 з відкачуванням у резервуар зберігання, через верхню оглядову горловину цистерни можливо оцінити наявність і розташування твердих залишків різної форми. Після цього, не припиняючи процесу вивантаження, у верхню оглядову горловину встановлюється пристрій верхнього розмиву твердого залишку 7, в який подається нафтопродукт з цистерни через теплообмінник 5 та верхній напірний трубопровід. Встановлені під кутом до вертикальної вісі форсунки через повітряне середовище забезпечують спрямованість струменів у торці цистерни. Найбільш оптимальний внутрішній діаметр форсунок 14...16 мм, при цьому номінальний тиск нафтопродукту – 8...10 кг/см². Робота пристрою нижнього зливу та пристрою верхнього розмиву твердого залишку здійснюється паралельно у зв'язку з тим, що при наливанні через верхній пристрій розмиву нафтопродукту, забезпечується відкачування нафтопродукту через пристрій нижнього зливу, тим самим виключається перелив цистерни. Тверді фрагменти залишку, механічно розбиті струменями нафтопродукту, що надходить через пристрій верхнього розмиву залишку, у подальшому ефективно розігріваються у гідравлічних потоках нагрітого до

80 °С нафтопродукту, утворених форсунками гідромонітора пристрою нижнього зливу.

У нафтопереробній промисловості відомий також модульний автоматизований комплекс для розігріву і нижнього зливу в'язких нафтопродуктів із залізничних цистерн УНСМ-15 (рис. 1.17), який забезпечує злив мазуту, нафти, парафіну, важкого вакуумного газойлю та інших нафтопродуктів [29, 30].



Рис. 1.17. Модульний автоматизований комплекс для розігріву і нижнього зливу в'язких нафтопродуктів із залізничних цистерн УНСМ-15

Установка виконана таким чином, щоб забезпечити наступні умови: компактність і розміщення в умовах естакади, взаємозаміщення вузлів та агрегатів, зручність при обслуговуванні і ремонту основних агрегатів, зручність виконання найбільш важких операцій по зливу-наливу нафтопродуктів, а також безпечність для здоров'я людей та оточуючого середовища.

УНСМ-15 містить в собі усі необхідні складові для здійснення автоматизованого зливу нафтопродукту – УСН “ПОТОК-175ГМ”, теплообмінний апарат, витратна ємність, циркуляційний та відкачуючий насосний агрегат, система трубопроводів і запірної арматури, шафа керування.

Установка модульна, що дуже зручно в експлуатації. Для її підключення потрібно тільки підведення пари для роботи теплообмінного апарату, приймального колектора для нафтопродукту, забезпечення відводу конденсату, а також живлення для електроприводів насосів і системи керування.

Система автоматики комплексу дозволяє стежити за процесом розігріву та зливу і повністю його контролювати, робить управління комплексом зручним та ергономічним. Комплекс повністю автоматизовано і технічно збалансовано, система автоматики здійснює стеження за: температурою нафтопродукту у витратній ємності і в теплообмінному апараті (при необхідності збільшуючи або зменшуючи подачу пара), рівнем нафтопродукту у витратній ємності (при необхідності відключаючи насоси, щоб уникнути їх зриву внаслідок відсутності продукту).

Принцип роботи установки заснований на об'єднанні операцій з підігріву і зливу в'язких нафтопродуктів у один технологічний процес з використанням гідромеханічної енергії.

Всередині зливного трубопроводу УСН “ПОТОК-175ГМ” проходить напірний трубопровід, через який у цистерну подається попередньо розігрітий у теплообмінному апараті продукт. Всередині оголовника УСН “ПОТОК-175ГМ” знаходиться гідромонітор телескопічного типу, що оснащений соплами. Конструкція сопел дозволяє здійснити розпилення струменів у радіусі до 6 м.

Гарячий нафтопродукт розмиває холодний продукт, який під дією відкачуючого насоса стікає по основному трубопроводу УСН “ПОТОК-175ГМ” у витратну ємність. Далі потік розділяється на два: один відправляється у резервуар замовника, а інший – на подальший розмив основної маси нафтопродукту у цистерні.

Висновки до першого розділу, мета і завдання дослідження

Оглядом дослідження науково-технічної інформації показали, що:

1. Необхідність розробки й впровадження інноваційного теплообмінного устаткування й технологій, в основі яких лежать процеси нагрівання і плавлення та інтенсифікація фізико-хімічних і теплообмінних процесів, обумовлений 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 й продукції.

2. Пошук нових конструктивних і технологічних рішень розробки обладнання для проведення процесів нагрівання та плавлення, спрямований на підвищення ефективності роботи апаратів і інтенсифікації теплообміну, вимагає комплексу теоретичних і експериментальних досліджень по вивченню кінетичних закономірностей протікання процесів нагрівання та плавлення.

У зв'язку з цим при виконанні запропонованої дисертаційної роботи була поставлена наступна мета: проведення досліджень, встановлення кінетичних закономірностей протікання процесів локального контактного нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей, що використовуються в різних галузях промисловості (фармацевтична, косметична, харчова тощо), інтенсифікація теплообміну і розробка енергозберігаючої технології та обладнання для проведення цих процесів

Для досягнення поставленої мети необхідно було сформулювати і вирішити такі 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.

РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Стенд для експериментального дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей

З метою дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих систем з низьким коефіцієнтом теплопровідності та визначення їх теплофізичних властивостей в ІТТФ НАНУ було виготовлено стенд, в якому застосовується спосіб локального термоконтактного нагрівання та плавлення (рис. 2.1) [31-34]. Спосіб плавлення основи МЛФ, розміщеної в циліндричній ємності, ґрунтується на русі дискового нагрівального елемента під дією сили тяжіння в процесі плавлення і перетікання розплавленої основи через зазори між диском і стінками ємності. Відмінність запропонованого способу від існуючих полягає в підведенні енергії безпосередньо до фронту фазового перетворення за допомогою нагрівача, який контактує із зовнішньою границею нерозплавленої вуглеводневої суміші. Нагрівач встановлюється зверху на речовину і під силою тяжіння розплавляє необхідну її кількість. Використання цього методу для нагрівання і плавлення вуглеводневих систем, що характеризуються низьким коефіцієнтом теплопровідності, є економічно більш вигідним. При такому способі плавлення енерговтрати через розсіювання тепла вкрай незначні, а ККД передачі теплової потужності від нагрівача через шар розплаву до масиву досить високий. При цьому температуру дискового нагрівача в зоні контакту з основою підтримують нижчою температури її деструкції. В товщі розплаву підтримання температури плавлення відбувається за рахунок конвективної теплопередачі від верхньої поверхні нагрівача.

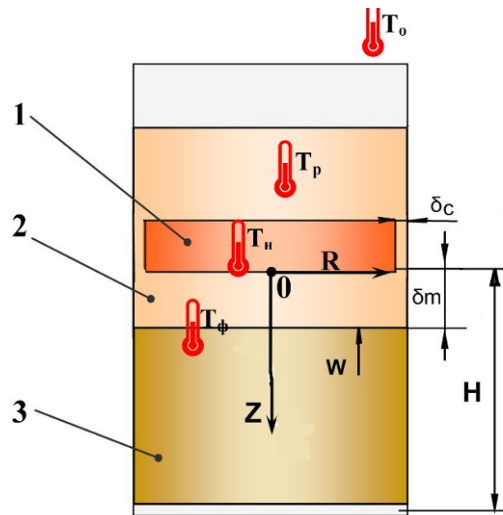


Рис. 2.1. Схема термоконтального нагрівання та плавлення в системі “нагрівач – розплав – тверда речовина”:

1 – нагрівач; 2 – розплав; 3 – тверда речовина

T_n – температура робочої поверхні нагрівача; T_f – температура фазового переходу речовина;

T_0 – початкова температура речовина; T_p – температура розплаву

Стенд для дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей (рис. 2.2) складається з наступних елементів: ємність для досліджуваної вуглеводневої основи 1, дисковий нагрівач 2, платформа для додаткової наважки 4, пульт керування 3. Загальний вигляд стенду наведений на рис. 2.5, а технічні характеристики приведені в таблиці 2.1.

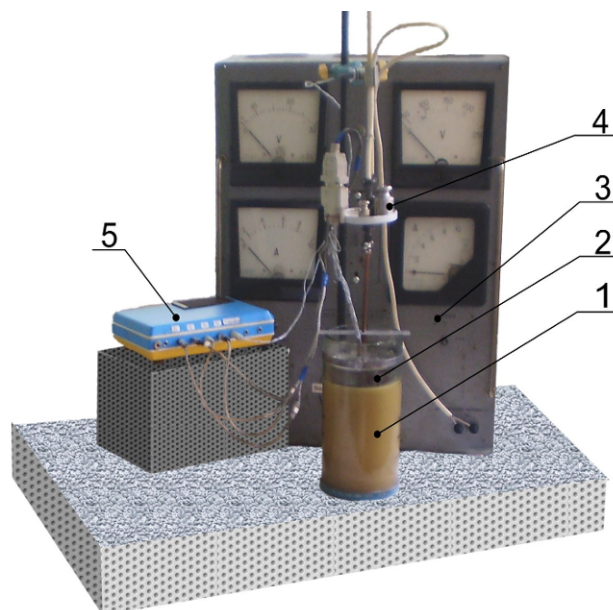


Рис. 2.2. Загальний вигляд стенда для експериментального дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих систем:

1 – ємність з вуглеводневою основою; 2 – дисковий нагрівач; 3 – пульт керування; 4 – платформа для додаткової наважки; 5 – аналогово-цифровий перетворювач.

Таблиця 2.1

Характеристики стенда для експериментального дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих систем

Об'єм речовини, л	1
Висота ємності, мм	180
Рівень речовини в ємності, мм	120
Діаметр ємності, мм	105
Діаметр нагрівача, мм	100
Висота нагрівача, мм	25
Температура нагрівача, °С	90-130
Вага нагрівача, кг	0,65
Тип термопар	ХК

Ємність з досліджуваною вуглеводневою основою призначена для проведення процесу плавлення. Ємність може бути оснащена ізоляцією для зменшення теплових втрат.

Дисковий нагрівач призначений для розігрівання та розплавлення вуглеводневої основи. Всередині нагрівача знаходиться електрична спіраль. При розплавленні дисковий нагрівач поступово опускається до низу ємності під дією власної ваги. Є можливість також збільшувати вагу нагрівача за рахунок додаткового навантаження.

Платформа для додаткової наважки призначена для розміщення на неї додаткової наважки, що забезпечує заданий тиск на вуглеводневу основу, яка плавиться.

Пульт керування призначений для керування роботою стенда за допомогою пускорегулюючої та захисної електричної апаратури.

На лицьовій панелі пульта керування розташовані:

- регулятор вихідної напруги;
- прибори, що показують напругу та силу струму у нагрівачі.

Стенд обладнаний системою датчиків, що підключаються до комп'ютерного вимірювального комплексу, що дозволяє вимірювати та записувати технологічні параметри процесів, що проводяться на стенді.

Дисковий нагрівач оснащено трьома термопарами типу хромель-копель, дві з яких знаходяться знизу нагрівача ДТ1 та ДТ2, а третя зверху на нагрівачі ДТ3, показання яких оброблювалися аналогово-цифровим перетворювачем і виводились на комп'ютер. Додатково оброблювалися показання з термопари ДТ4, яка вимірює температуру оточуючого середовища.

Принципову схему стенда для експериментального дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих систем з низьким коефіцієнтом теплопровідності та схему розміщення датчиків наведено на рис. 2.3.

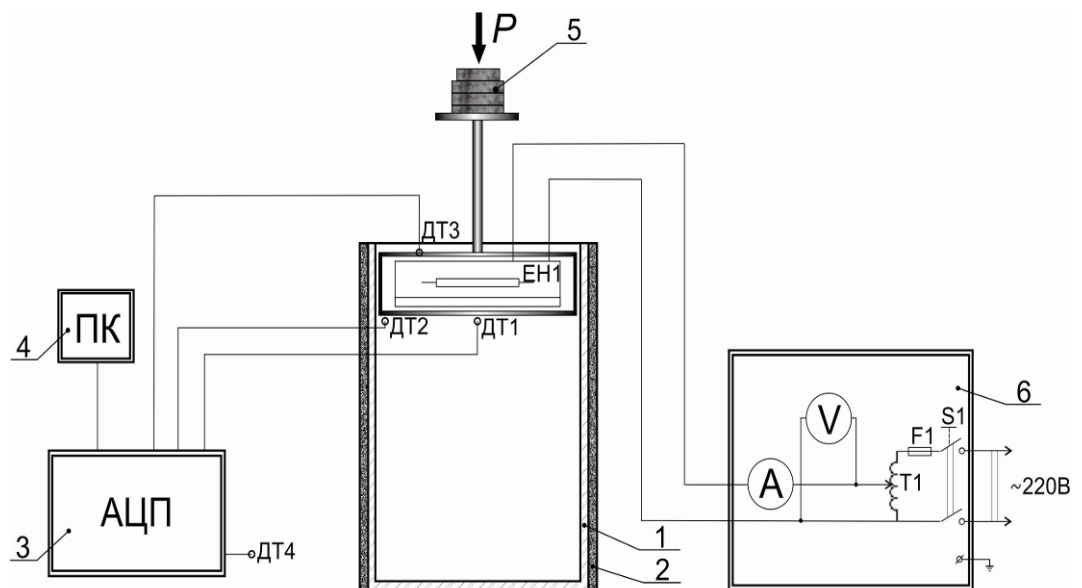


Рис. 2.3. Принципова схема стенда для експериментального дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих систем:

1 – ємність з вуглеводневою основою; 2 – ізоляція ємності; 3 – аналогово-цифровий перетворювач; 4 – персональний комп'ютер; 5 – платформа для додаткової наважки; 6 – пульт керування; ДТ1...ДТ4 – датчики температури;

ЕН1 – електричний нагрівач; Т1 – трансформатор; F1 – запобіжник; S1 – вимикач.

При проведенні досліджень на “Стенді для експериментального дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих систем” ємність заповнюється досліджуваною вуглеводневою сумішшю. На поверхню вуглеводневою суміші опускається дисковий нагрівач. Якщо за програмою дослідження передбачається підвищений тиск на поверхню дискового нагрівача, то на платформу встановлюється додаткова наважка. На електричну спіраль нагрівача подається необхідна електрична напруга для забезпечення заданої підведеної потужності. Під час проведення дослідження записуються показання датчиків та виводяться на комп’ютер для вимірювання швидкості занурення нагрівача у середовище, що досліджується.

2.2 Прилад для визначення термостійкості

Дослідження виконано в дериватографі Q-1000 (рис. 2.4) виробництва фірми “МОМ” (Угорщина) [35]. Схема приладу представлена на рис. 2.5.



Рис. 2.4. Дериватограф Q-1000

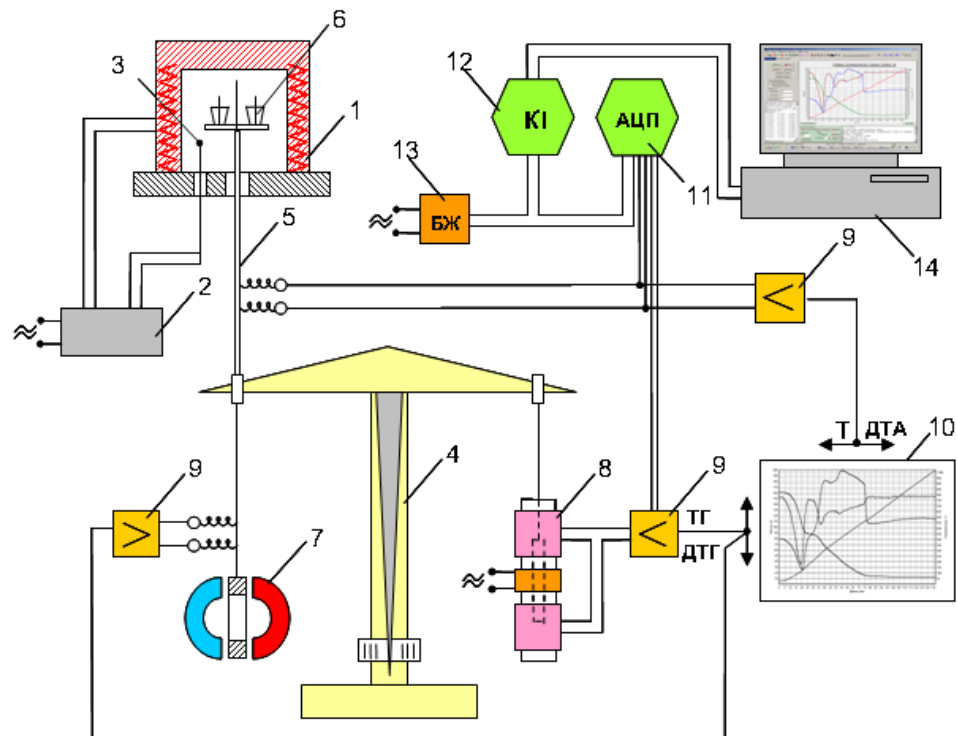


Рис. 2.5. Схема дериватографа Q-1000:

1 – піч; 2 – програматор температури в печі; 3 – термопара контролю температури; 4 – ваги; 5 – керамічна стійка; 6 – зразок; 7 – пристрій для виміру швидкості видалення вологи; 8 – пристрій для виміру зміни маси зразка; 9 – підсилювач сигналу; 10 – самопис; 11 – аналогово-цифровий перетворювач; 12 – конвертер інтерфейсу; 13 – джерело живлення; 14 – комп'ютер.

Дериватограф складається з печі, вагового блока, блоків вимірювання та обробки інформації. В печі 1 за допомогою програматора 2 підтримується задана температура, яка контролюється термопарою 3. Ваговий блок включає аналітичні ваги 4 з пристроями для зміни чутливості та поглинання коливань. На одній стороні коромисла ваг підвішена пустотіла керамічна стійка 5, верхній кінець якої введений в піч. Стійка в верхній частині має гребінку з вмонтованими спаями від двох диференціальних термопар. Перша (робоча) термопара призначена для вимірювання температури зразка (Т) в процесі нагрівання. На спай другої термопари насаджують тигель з інертною речовиною.

Різниця температур між зразком та інертною речовиною реєструється в вигляді диференціальної е.р.с. (ДТА).

На другій стороні коромисла ваг розміщені електромагнітна котушка пристрою 7 та феритовий стрижень пристрою 8. Пристрій 8 виконаний в вигляді диференціального трансформатора з феритовим стрижнем всередині, призначений для реєстрації зміни маси зразка (ТГ). Пристрій 7 складається з електромагнітної котушки в вигляді рамки, яка підвішена в полі постійного магніту. При русі в однорідному магнітному полі в рамці генерується напруга пропорційна швидкості зміни маси зразка (ДТГ).

Інформація про зміну маси та температуру зразка надходить до аналогового цифрового перетворювача 11 та за допомогою конвертора інтерфейсу 12 передається на персональний комп'ютер 14. Паралельно сигнали з пристроїв вимірювання Т, ДТА, ТГ та ДТГ подаються на базовий чотири каналний реєстратор, де відображаються на стрічці самописного прибору 10 в вигляді кривих в залежності від часу.

2.3 Методика проведення дослідження термостійкості

Дериватографічний метод, що об'єднує термогравіметрію з класичним диференціальним термічним аналізом докладно викладений в роботах [36-38].

Дослідження термостійкості зразків виконували в динамічному режимі в повітряному середовищі в діапазоні температур 19...250 °С при швидкості нагрівання 3,8 К/хв. за шкалою ваг 0-50 мг. Зразки розміщували в відкритий конічний платиновий тигель. В якості інертного матеріалу в тиглі порівняння використовували оксид алюмінію. Корекцію шкали температур здійснювали по температурі переходу кварцу з α - в β -форму (573 °С) [39]. Відхилення температури не перевищувало ± 1 К.

Збір та обробка інформації з дериватографа здійснювались за допомогою прикладної комп'ютерної програми «Derivatograph». Результати дослідження зразків були представлені у вигляді дериватографічних кривих, що відображають інформацію про стан зразка в процесі його нагрівання з

постійною швидкістю. Співставлення кривих дало можливість по кривій температури зразка визначити інтервали теплових ефектів, пов'язаних з фазовими перетвореннями, та температуру початку термічного розкладання.

2.4 Дослідження фазових переходів при нагріванні

2.4.1 Прилад для дослідження фазових переходів

Дослідження фазових переходів при нагріванні проведені в модернізованому диференціальному скандувальному мікрокалориметрі ДСМ-2М (виробник СКБ БП АН СРСР, м. Пущино) [40] (рис. 2.6). На рис. 2.7 представлена блок-схема мікрокалориметра ДСМ-2М.

Основу апаратної частини засобів автоматизації складає модуль аналого-цифрового перетворення (АЦП) типу *i-7018*, що разом з конвертером інтерфейсу *i-7520* забезпечує перетворення вхідних сигналів у цифрову форму і передачу даних до персонального комп'ютера, де за допомогою прикладної комп'ютерної програми "Water 4" здійснюється нагромадження та обробка результатів експериментальних досліджень. Програма написана на мові програмування Delphi.



Рис. 2.6. Калориметричний комплекс на базі диференціального скандувального мікрокалориметра ДСМ-2М

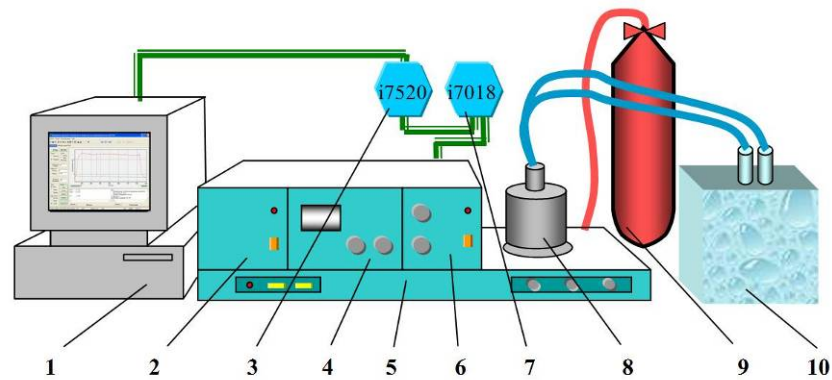


Рис. 2.7. Блок-схема калориметричного комплексу на базі диференціального скандувального мікрокалориметра ДСМ-2М:

- 1 – комп’ютер; 2 – блок живлення; 3 – аналогово-цифровий перетворювач; 4 – блок задання температурних режимів; 5 – корпус; 6 – блок регуляторів; 7 – конвертер протоколів; 8 – блок калориметричний; 9 – балон з гелієм; 10 – кріостат.

Метод ДСК ґрунтується на автоматичній компенсації різниці температур між вимірювальною (робочою) і порівняльною (еталонною) комірками [41]. У ДСМ-2М у вимірювальну комірку розміщують досліджувану речовину (зразок) в контейнері, а в еталонну – такий же контейнер, але порожній. При цьому маси контейнерів повинні бути однакові ($\pm 0,05$ мг). Калориметричні комірки перебувають у безпосередній близькості від нагрівачів, що забезпечує швидкий теплообмін, а отже, зменшує постійну часу калориметра до декількох секунд.

У калориметрі робоча і еталонна комірки оснащені індивідуальними нагрівачами, що дозволяє здійснити принцип “збалансованого нуля”. Контейнер із зразком та порожній контейнер нагріваються з однаковою швидкістю, а автономні нагрівачі комірок через систему автоматичного регулювання вирівнюють температури контейнеру із зразком та порожнього контейнера. Сигнал, пропорційний різниці між потужностями, що подаються автономними нагрівачами в еталонну та робочу комірки, реєструється на комп’ютері. Таким чином реєструють різницю між тепловими потоками у двох калориметричних системах, які відрізняються тільки наявністю

досліджуваної речовини в одній з них. Ця різниця пропорційна теплоті, що виділяється або поглинається при нагріванні або охолодженні досліджуваної речовини.

При роботі на ДСМ-2М зразки досліджуваної речовини поміщають у плоскі тонкостінні алюмінієві контейнери та герметично закривають. Підготовлені контейнери завантажують у калориметричний блок та роблять його інтенсивну продувку попередньо осушеним газоподібним гелієм протягом 3...5 хвилин. Це дозволяє запобігти помилковим тепловим ефектам, поява яких може обумовлюватися вологою навколишнього повітря, що конденсується на стінках вимірювального блоку калориметра та на поверхні контейнерів у процесі охолодження.

Протягом експерименту інертний газ продовжує контролювано подаватися в прилад, що забезпечує стабільний теплообмін між комірками та оболонкою калориметричного блоку.

Термостатування вимірювального блоку мікрокалориметра здійснюється водним розчином етанолу, охолодженим в кріостаті МК-70 до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Після продувки калориметричного блоку показання температурної шкали калориметра виводять на необхідну температуру початку експерименту, задають ізотермічний режим роботи приладу та чекають установлення температурної рівноваги між калориметричними комірками. По досягненню рівноваги на екрані комп'ютера реєструється сигнал в вигляді прямої лінії (ізотерма), що вказує на відсутність диференціального теплового потоку між калориметричними комірками.

Після витримки при встановленій температурі протягом 5 хвилин задають режим нагрівання або охолодження комірок зі швидкістю 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0; 16,0; 32,0 або 64,0 К/хв. При цьому, у пам'яті комп'ютера записується сигнал в вигляді ДСК-кривої в координатах напруга – час, або напруга – температура. Сигнал представляє собою різницю напруг, що

подаються на робочу та еталонну комірки в ході сканування, він пропорційний тепловій потужності.

По досягненні температури закінчення експерименту, роботу приладу знову переводять в ізотермічний режим.

При калориметричному вимірюванні фіксується сума потужностей всіх теплових потоків, що виникають у результаті фазових переходів і зміни теплоємності при скануванні температури. На ДСК-кривій відображаються піки, які відповідають виділенню або поглинанню теплоти в результаті фазового переходу, і перегини, що виникають при зміні теплоємності.

2.4.2 Методика проведення досліджень фазових переходів

На початку досліджень провели градування шкали температур мікрокалориметра ДСМ-2М в досліджуваному інтервалі температур за інструкцією виробника з використанням еталонних речовин: дистильованої води ($T_{пл} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) та нафталіну ($T_{пл} = 80,28\text{ }^{\circ}\text{C}$) – з точністю не гірше $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [39].

Досліджувані речовини масою 22,89 та 23,04 мг поміщали у плоскі тонкостінні алюмінієві контейнери та герметично запечатували (рис. 2.8). Чашку і кришку контейнера підбирали таким чином, щоб їхня сумарна маса дорівнювала масі контейнера, що постійно перебуває в еталонній комірці, з відмінністю не більше $\pm 0,02$ мг. Зважування зразків проводили на мікроаналітичних вагах ВЛМ-1 з точністю $1 \cdot 10^{-5}$ гр.

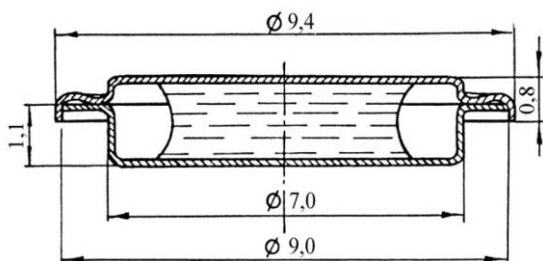


Рис. 2.8. Тонкостінний алюмінієвий контейнер.

Підготовлені контейнери завантажували у калориметричний блок та робили інтенсивну продувку осушеним газоподібним гелієм. Після продувки калориметричного блоку встановлювали необхідну температуру початку експерименту ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$), задавали ізотермічний режим роботи приладу

та чекали установлення температурної рівноваги між калориметричними комірками.

Після досягнення термічної рівноваги у вимірювальному блоці комірки нагрівали зі швидкістю 4 К/хв. до повного перетворення матеріалу з твердого в рідкий стан, про що судили по ДСК-кривій нагрівання.

Визначення величини теплового ефекту фазового переходу здійснювали на підставі даних градування, які отримували при дослідженні реперної (еталонної) речовини в тих же умовах експерименту. Для цього, у робочій комірці калориметричного блоку, контейнер з досліджуваною речовиною заміняли на контейнер з реперною речовиною. Для нашого дослідження використали еталонний хімічно чистий кристалічний нафталін ($T_{пл} = 80,28 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta H_{пл} = 18,8 \text{ кДж/моль}$) [39].

Визначення температур початку, кінця фазових переходів та максимумів піків, а також площ, укладених між ДСК-кривими плавлення і базовою лінією калориметра, здійснювали за допомогою комп'ютерної програми "Water 4" (рис. 2.9). Інтегральну теплоту фазових переходів, що спостерігали при нагріванні матеріалу, визначали за площами піків плавлення.

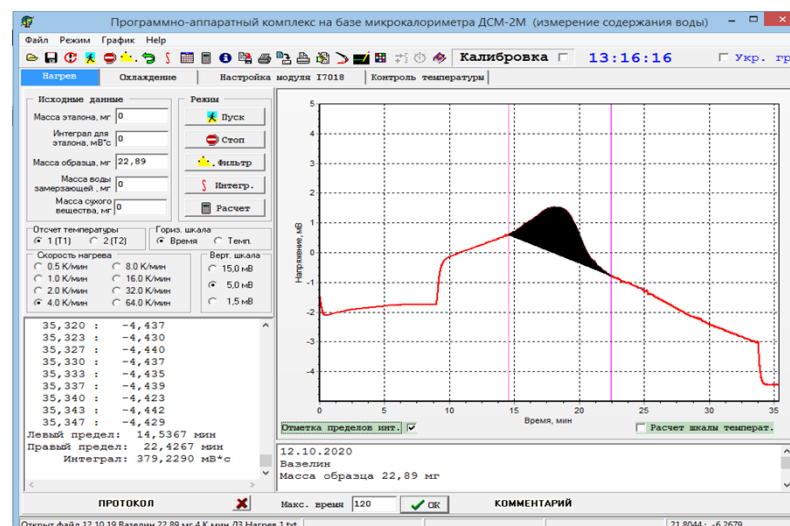


Рис. 2.9. Панель керування системою збору та обробки інформації з калориметра ДСМ-2М при визначенні площі піків плавлення в досліджуваних зразках.

Питому теплоту (ентальпію) фазових переходів обчислювали за формулою:

$$\Delta H_{i\bar{e}}^{\zeta\delta} = \frac{\Delta I_{i\bar{e}}^{\dot{a}\delta} \cdot \dot{\delta}_{\dot{a}\delta} \cdot S^{\zeta\delta}}{S^{\dot{a}\delta} \cdot \dot{\delta}_{\zeta\delta}}, \text{ Дж/г}, \quad (2.1)$$

де ΔH_{nl}^{em} – питома теплота плавлення реперної речовини, Дж/г;

m_{em} , m_{zp} – маса наважки реперної та досліджуваної речовини, мг;

S^{em} , S^{zp} – площа піків плавлення реперної та досліджуваної речовини, мВ с.

2.5 Прилад і методика визначення теплоємності

Теплоємність досліджуваних зразків визначали в диференціальному скандувальному мікрокалориметрі ДСМ-2М, описаному у підрозділі 1.

На початку експерименту проводили градування шкали температур мікрокалориметра ДСМ-2М в досліджуваному інтервалі температур за інструкцією виробника з використанням зразків дистильованої води ($T_{пл} = 0 \text{ C}$) та нафталіну ($T_{пл} = 80,28 \text{ C}$) з точністю не гірше $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ [39]. Градування мікрокалориметра за тепловою потужністю здійснювали з використанням еталонної речовини [42] – синтетичного корунду $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (вміст оксиду алюмінію $\gg 99,99\%$.) з теплового комплекту приладу.

В основі методу вимірювання теплоємності за допомогою сканувальної калориметрії лежить той факт, що для нагріву зразка з теплоємністю c зі швидкістю dT/dt потрібна теплова потужність $P = c \cdot dT/dt$.

Мікрокалориметр ДСМ-2М дозволяє визначати в межах робочого діапазону температур (123...773 К) питому теплоємність c будь-якої нелеткої речовини [40]. Для цього використовують зразкові міри теплоємності з відомою залежністю питомої теплоємності реперної речовини від температури.

Визначення теплоємності досліджуваної речовини проводили наступним чином. У калориметричні комірки (робочу та еталонну) поміщали два порожніх контейнери однакової маси (різниця в масі не більше $\pm 0,02$ мг). Здійснивши продувку гелієм протягом 3...5 хвилин, прилад виводили на

температуру початку експерименту і записували ДСК-криву нагрівання порожніх контейнерів у необхідному температурному діапазоні. До початку нагрівання та після його закінчення прописували ділянки ізотермічного режиму для визначення базової лінії, що з'єднує точки виходу калориметричної системи з ізотермічного режиму на початку нагрівання та виходу її в ізотермічний режим по закінченні нагрівання.

Далі підбирали зразкову міру теплоємності з теплового комплекту до ДСМ-2М, таким чином, щоб маса контейнера з-під реперної речовини дорівнювала масі порожнього контейнера, що перебуває в еталонній комірці. Робили заміну порожнього контейнера в робочій комірці калориметра зразковою мірою теплоємності і повторювали експеримент за тих самих умов, що і для порожніх контейнерів.

Далі підбирали чашку й кришку контейнера таким чином, щоб їхня сумарна маса дорівнювала масі порожнього контейнера, що постійно перебуває в еталонній комірці з відмінністю не більше $\pm 0,02$ мг. Зразки досліджуваних матеріалів закривали в герметичні алюмінієві контейнери (рис. 2.8) і по черзі поміщали у робочу калориметричну комірку. Після чого експеримент повторювали.

Температурний діапазон був розділений на інтервали, в кінцевих точках яких x_i (рис. 2.10) вимірювали відхилення кривої ДСК від базової лінії після переведення мікрокалориметра з режиму сканування в ізотермічний режим. Вимірювання відхилень повторювали не менше трьох разів. Для цього кожен раз вміст комірок охолоджували до стартової температури, величина якої була на $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ нижче кінцевої температури сканування. Швидкість сканування становила 8 K/хв . Питому теплоємність вимірювали в температурному інтервалі $0\dots 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ з кроком $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На всіх етапах вимірювання в комірці порівняння знаходився порожній контейнер. Під час експерименту в вимірювальну комірку по черзі поміщали порожній контейнер, контейнер з еталонною мірою теплоємності і контейнер з досліджуваним зразком і визначали відхилення ДСК-кривої від базової лінії

порожнього контейнера (Y), еталонної міри теплоємності (Y_s) і досліджуваного зразка (Y_m) (рис. 2.10).

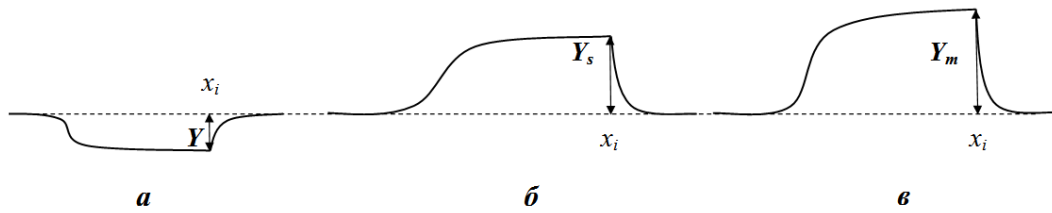


Рис. 2.10. Визначення відхилення ДСК-кривих від базової лінії калориметра при визначенні теплоємності в точці x_i температурного інтервалу:

відхилення при роботі з порожніми контейнерами (a); відхилення при роботі з еталонною мірою теплоємності (b); c – відхилення при роботі зі зразком (c).

Розрахунок питомої теплоємності досліджуваного матеріалу виконували за формулою:

$$c_m = \frac{(\bar{Y}_m \pm \bar{Y})m_s c_s}{(\bar{Y}_s \pm \bar{Y})m_m}, \quad (2.2)$$

де \bar{Y} – середнє значення абсолютних величин відхилення ДСК-кривої порожнього контейнера від базової лінії калориметра;

\bar{Y}_m – середнє значення абсолютних величин відхилення ДСК-кривої досліджуваного зразка;

\bar{Y}_s – середнє значення абсолютних величин відхилення ДСК-кривої еталонної міри теплоємності;

m_s – маса еталонної міри теплоємності;

c_s – теплоємність еталонної міри;

m_m – маса досліджуваного зразка.

Середні значення абсолютних величин \bar{Y} складали з середніми величинами \bar{Y}_m і \bar{Y}_s , коли відхилення не співпадали з напрямком відносно базової лінії і віднімали, якщо напрямки відхилень співпадали.

При обробці експериментальних даних використовували програму збору та обробки інформації “ThermCap” (рис. 2.11) та програму Microsoft® OfficeExcel.

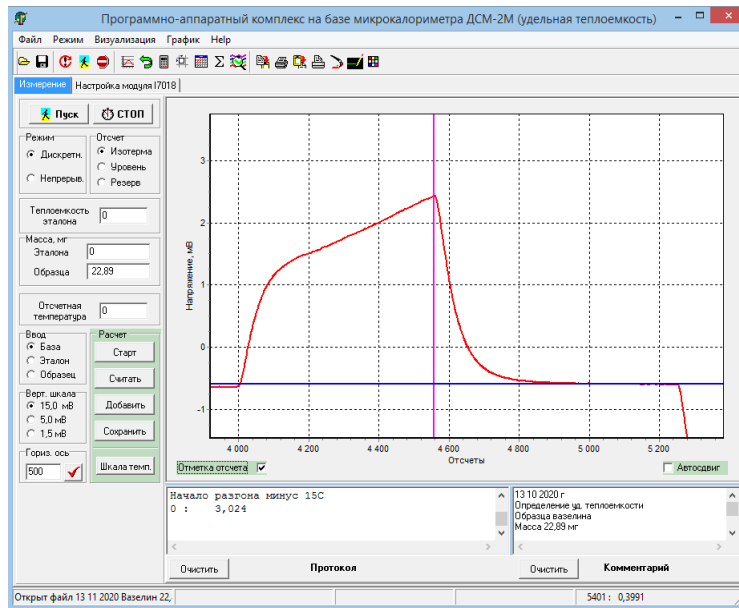


Рис. 2.11. Комп’ютерна панель керування системою збору та обробки інформації “ThermCap” при визначенні питомої теплоємності на ДСМ-2М.

В якості еталонної міри теплоємності використовували синтетичний корунд $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, який має стандартні теплофізичні властивості [42]. Питому теплоємність стандартного зразка розраховували за апроксимуючими температурні залежності поліномами:

в інтервалі температур $T = 190 \dots 320$ К:

$$c = -49,024407 + 0,651534T - 771,53 \cdot 10^{-6}T^2 + 0,889 \cdot 10^{-7}T^3$$

і в інтервалі температур $T = 320 \dots 400$ К:

$$c = 147,4338 - 0,0281T + 0,000045 T^2 - 18190,6836/(T - 13,5) + 3,4768 \cdot 10^{-13}(T - 273,15)^4.$$

2.4 Прилад для визначення в’язкості вазеліну

Дослідження динамічної в’язкості проводили на віскозиметрі DV-E фірми “Brookfield” [43]. Принцип роботи віскозиметра оснований на обертанні шпинделя (який занурений в рідину, що досліджується) за

допомогою відкаліброваного привода. Опір в'язкості рідини обертанню привода вимірюється по відхиленню швидкості привода. Відхилення швидкості привода вимірюється за допомогою датчика обертання. Діапазон вимірювань DV-E (мПа/с) визначається за швидкістю обертання шпинделя, його розміром і формою, контейнером, в якому обертається шпindel, і шириною діапазону моменту обертання каліброваного привода.

Висновки до розділу 2

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

На стенді для експериментального дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей досліджено вплив теплофізичних параметрів (температура нагрівача, тиск на дисковий нагрівач, 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 – віскозиметр DV-E фірми “Brookfield”.

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

РОЗДІЛ 3. КОМПЛЕКС ПРОВЕДЕНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ УСТАНОВКАХ

3.1 Вуглеводневі суміші та їх властивості. Обрані модельні середовища

Вуглеводні – це органічні сполуки, молекули яких складаються лише з атомів карбону та гідрогену. Залежно від будови вуглецевого скелета їх поділяють на ациклічні (аліфатичні), аліциклічні та ароматичні. Аліфатичні вуглеводні мають відкритий (незамкнений) вуглецевий ланцюг. За ступенем насиченості вуглець-вуглецевих зв'язків їх поділяють на алкани (насичені вуглеводні), алкени (вуглеводні з подвійним зв'язком), алкадієни (з двома подвійними зв'язками), алкіни (з потрійним зв'язком). Аліциклічні та ароматичні вуглеводні мають замкнений вуглецевий ланцюг. Ароматичні (арени), залежно від кількості бензенових ядер, поділяють на одноядерні та багатоядерні. Усі інші – циклічної будови, крім ароматичних, відносять до аліциклічних [44-45].

Вуглеводні, такі як вазелін, парафін, церезин, віск, нафтопродукти, тверді жири тощо, а також різного типу полімерні матеріали та окремі види харчових продуктів є складними сумішами твердих, рідких та піврідких 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 [45-47]. 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 [48].

Ланолін – це густа, в'язка маса жовтого або жовто-бурого кольору, своєрідного запаху, плавиться при температурі 36...42 °С. Склад ланоліну дуже складний і до теперішнього часу вивчений не повністю. В основному він являє собою суміш складних ефірів високомолекулярних спиртів (холестерину, ізохолестерину і т.п.) з вищими жирними кислотами

(миристинової, пальмітинової, церотинової і ін.) і вільних високомолекулярних спиртів. У хімічному відношенні досить інертний, нейтральний і стійкий при зберіганні. Найціннішою властивістю ланоліну є його здатність емульгувати до 180...200 % (від власної маси) води, до 140 % гліцерину і близько 40 % етанолу (70 % концентрації) з утворенням емульсій типу вода/масло. Добавки невеликої кількості ланоліну до жирів і вуглеводням різко збільшують їх здатність змішуватися з водою і водними розчинами, що зумовило його широке застосування у складі ліпофільно-гідрофільних основ [49-52].

Церезин – мінеральна воскова суміш насичених і ненасичених вуглеводнів з довгим ланцюгом (від C_{20} до C_{32}) і високою молекулярною масою (500...700), що становить аморфні (некристалічні) крихкі воскові пластинки або пастилки від білого до жовтого кольору, без запаху і смаку.

Церезин отримують шляхом екстракції та очищення мінерального воску озокериту, отриманого з вугілля та сланців. Озокерит спочатку нагрівають з метою видалення землі або каменів із розплаву. Якщо необхідно, його нагрівають до 115...120 °С, щоб видалити всю вологу і потім обробляють сірчаною кислотою. Після нейтралізації знебарвлюють за допомогою активованого вугілля або силікагелю та фільтрують. Якщо знебарвлення не є достатнім, його повторно обробляють сірчаною кислотою і піддають адсорбційній фільтрації через адсорбент. Церезин розчинний в бензолі, хлороформі, гарячих оліях, петролейному ефірі, 30 частинах абсолютного етанолу, скипидарі, сірковуглецю та більшості органічних розчинників і нерозчинний у воді [49-50, 53-54].

Церезин використовують як ущільнювальний агент у кремах та мазях, як стабілізатор емульсій, замутнювач та контролюючий в'язкість агент. Його часто використовують як заміну озокериту завдяки своїм аналогічним властивостям, а також як заміну бджолиного воску і парафіну. Він виступає як реологічний модифікатор при низьких концентраціях (2...3 %) і може створювати дуже маленькі кристалики, які утворюють структуру, що не

дозволяє текти у практичних умовах. У стоматології використовують як один з основних воскових компонентів разом із бджолиним воском і мікрокристалічним парафіном. Церезин сумісний із більшістю восків тваринного, рослинного і мінерального походження, а також із мінеральними оліями і вазеліном [54].

Подібні за властивостями: віск мікрокристалічний, віск білий, віск жовтий.

Озокерит – мінерал з групи нафтидів (бітумів), природна суміш твердих вуглеводнів парафінового ряду (C_nH_{2n+2}) з рідкими нафтовими маслами і смолистими речовинами. Дуже велику роль у ньому відіграють церезини (від $C_{37}H_{76}$ до $C_{53}H_{108}$). Утворюється внаслідок кристалізації при охолодженні парафінової нафти. Складається з парафіну, мінеральних олій, смол та інших речовин. Консистенція від м'якої, пластичної до твердої, сипкої. За хімічним складом озокерит являє собою природну суміш алканів. В деяких з них є азотні, кисневі та сірчисті сполуки [49-50, 56].

Озокерит має високу теплоємність та низьку теплопровідність. Складається з домішок різних вуглеводнів, що містять за вагою 7...85 % вуглецю та 3...14 % водню. Питома вага в межах від -85 до -95 , точка кипіння від $58...100$ °C.

Має запах гасу, добре розчиняється у бензині, гасі, нафті, скипидарі, погано – у спирті, нерозчинний у воді.

Озокерит використовується в радіо- і електротехніці як електроізоляційний матеріал, в хімічній промисловості при виробництві лаків, в медицині для виготовлення вазеліну, мазей, кремів та ін., а також для теплотікування (озокеритолікування) [55-56].

Воски – поширені в рослинному і тваринному світі суміші простих ліпідів (складні ефіри вищих жирних кислот і вищих високомолекулярних спиртів). До складу молекул ліпідів, складових восків (на відміну від жирів, що мають схожу будову) не входить гліцерин.

Воски використовуються для свічок; виготовлення виплавлених моделей для лиття, так званих восківок; у натуральній косметиці – загущувач для кремів і мазей; покриття для захисту і збереження продуктів харчування, в медичних цілях (наприклад, як покриття лікарських препаратів у формі таблеток) і т.п. [49-50, 57-59].

Диметилсульфоксид (C_2H_6SO) (рис. 3.1) – безбарвна в'язка рідина або безбарвні кристали, важливий біполярний розчинник. Диметилсульфоксид (ДМСО) додається в такі сучасні лікарські препарати, як димексид, долобене, йоддицерин, хондрасил [60-61].

Властивості диметилсульфоксиду (ДМСО) призводять до значних труднощів при його плавленні, особливо в зимовий період року, у зв'язку з тим, що температура замерзання ДМСО – $18,55\text{ }^\circ\text{C}$.

Основним способом отримання ДМСО є окислення диметилсульфіду. У промисловості цей процес проводять з використанням азотної кислоти. ДМСО є побічним продуктом целюлозно-паперової промисловості. Річне виробництво ДМСО вимірюється десятками тисяч тонн.

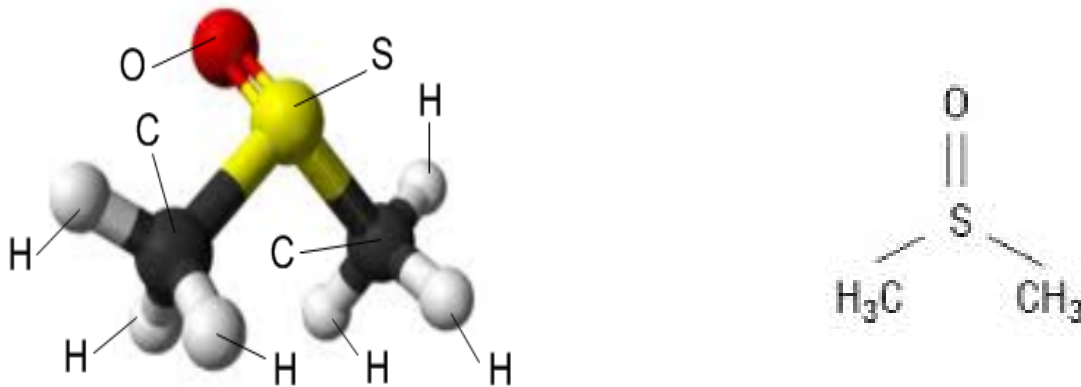


Рис. 3.1. Будова диметилсульфоксиду (C_2H_6SO)

Таблиця 3.1

Теплофізичні властивості ДМСО [61]	
Параметр	Значення
Температура самозаймання на повітрі	$300\text{-}302\text{ }^\circ\text{C}$ ($572\text{-}575\text{ }^\circ\text{F}$)
Температура кипіння (1 атмосфера)	$189\text{ }^\circ\text{C}$ ($372\text{ }^\circ\text{F}$)
Коефіцієнт розширення	$0,00088/^\circ\text{C}$
Провідність (електрична), при $20\text{ }^\circ\text{C}$	$3 \cdot 10^{-8}\text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$

	80 °C	$7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$
Критичний тепловий потік		$4,1 \cdot 10^5 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{с}$
Критичний молярний об'єм		$2,38 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$
Критичний тиск		56,3 атм.
Критична температура		447 °C (837 °F)
Густина, при 25 °C		$1,0955 \text{ г/см}^3$
Межі займання на повітрі:		
нижня (100 °C)		3-3,5 % по об'єму
верхня		42-63 % по об'єму
Температура спалаху (у відкритій ємності)		95 °C (203 °F)
Температура спалаху (у закритій ємності)		89 °C (192 °F)
Температура замерзання		18,55 °C (65,4 °F)
Теплоємність, ідеальний газ, C_p (Т, К)		$6,94 + 5,6 \cdot 10^{-2} T - 0,227 \cdot 10^{-4} T^2$
Теплоємність (рідина), 25 °C		0,47 кал/г/°C
Теплота згоряння		6054 кал/г
Теплота плавлення		41,3 кал/г
Теплота розчинення у воді при 25 °C		-54 кал/г
Теплота випаровування при 70 °C		11,3 ккал/моль
Молярна постійна температури замерзання		4,07 °C/моль
Молярний об'єм		71,2 см ³ /г
Молекулярна вага		78,13
Коефіцієнт заломлення при 25 °C		1,4768
Теплоємність при 29,5 °C		$0,47 \pm 0,015 \text{ кал/г/}^\circ\text{C}$
Поверхневий натяг при 20 °C		43,53 дин/см
Тиск парів при 25 °C		0,6 мм.рт.ст.
В'язкість, сП, при 25 °C		2

На графіку представлена крива залежності тиску парів ДМСО від температури (рис. 3.2) [61].

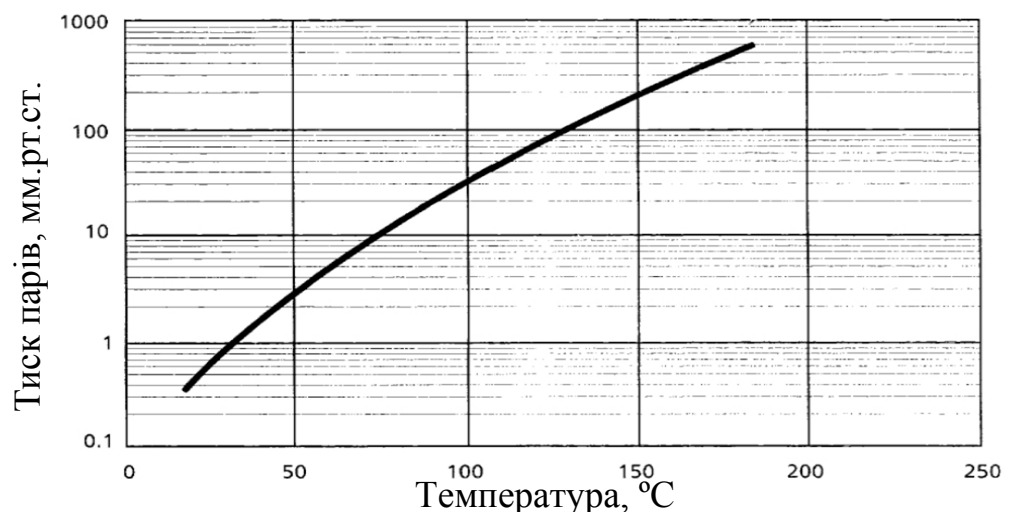


Рис. 3.2. Крива залежності тиску парів ДМСО від температури

Таблиця 3.2

Теплоємність і густина ДМСО в залежності від температури [61]

Температура, °C	Ср (рідина), кал/г·°C	Густина, г/см ³
30	0,47	1,096
60	0,47	1,062
100	0,48	1,023
150	0,52	0,974

На рис. 3.3 зображено графік термічної стабільності ДМСО [61].

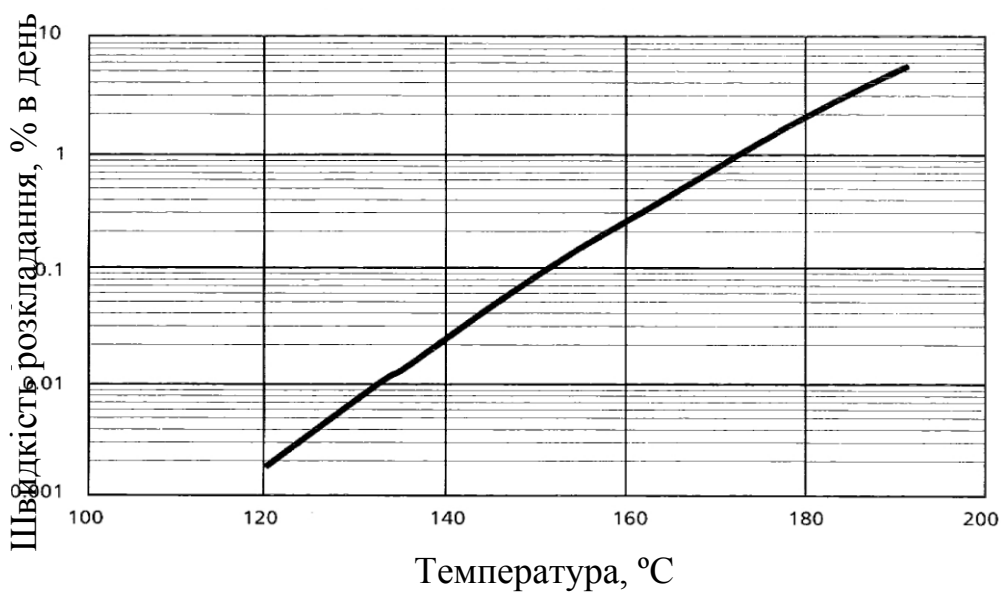


Рис. 3.3. Термічна стабільність ДМСО

Таблиця 3.3

В'язкість ДМСО в залежності від температури [61]

Температура, °C	В'язкість, сП
25	1,991
30	1,808
40	1,511
50	1,286
75	0,916
100	0,691

На рис. 3.4 зображено графік в'язкості розчинів ДМСО-вода [61]

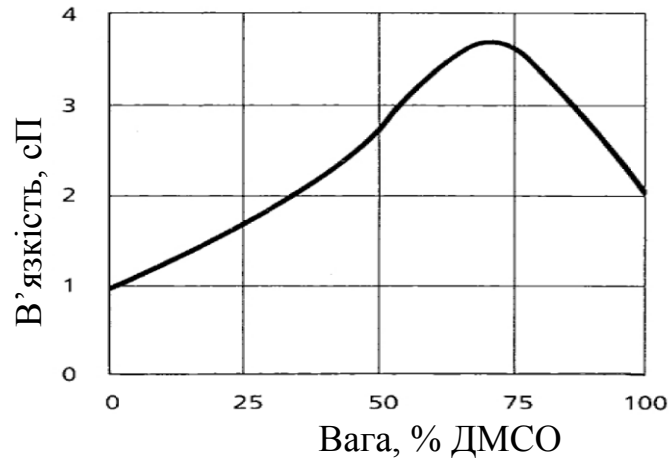


Рис. 3.4. В'язкість розчинів ДМСО-вода

В якості лікарського засобу очищений диметилсульфоксид застосовується у складі мазей для збільшення трансдермального переносу діючих речовин, оскільки за кілька секунд проникає через шкіру і переносить інші речовини.

Також ДМСО використовується як кріопротектор. Він додається в клітинне середовище для запобігання пошкодженню клітин при їх заморожуванні. Приблизно 10 % ДМСО може бути використано для безпечного охолодження клітин, а також для зберігання їх при температурі рідкого азоту.

Жири – це також суміші, і тому не мають чіткої характеристики плавлення. Чим більше в жирі набір різних видів жирних кислот, тим в більш широкому температурному діапазоні відбувається плавлення. Характеристики плавлення жирів можуть бути визначені шляхом розрахунку твердої фракції жиру (індекс твердості жиру – ІТЖ) при різних температурах [62].

Кристалічні гліцериди щільніше рідких, тому при охолодженні об'єм жиру зменшується. Ця зміна щільності використовується для оцінки ІТЖ шляхом вимірювання зміни об'єму (дилатометрії). Для оцінки співвідношення “тверда – рідка фаза” в зразку жирового продукту може бути також застосований ядерний магнітний резонанс (ЯМР). Цей метод заснований на розходженні вмісту молекул водню в рідкій і твердій фазах.

Результатом вимірювань є криві плавлення, які мають форму, що наведена на рис. 3.5 [63].

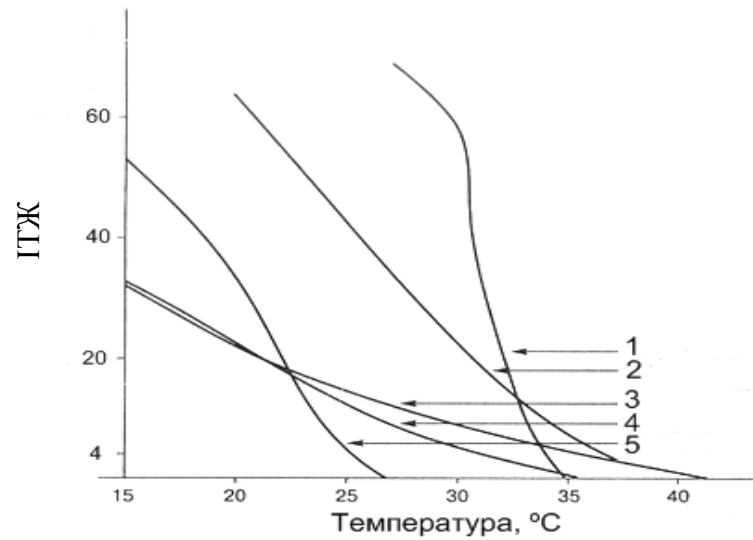


Рис. 3.5. Криві плавлення деяких жирів:

- 1 – какао олія; 2 – гідрогенізована кісточкова пальмова олія;
3 – пальмова олія; 4 – вершкова олія; 5 – кокосова олія.

Температури плавлення, густина, теплоємність та коефіцієнти теплопровідності деяких жирів та олій представлені в табл. 1.7.

Таблиця 3.4

Назва речовини	Властивості жирів та олій [64-67]			Теплоємність, Дж/кг·°С
	Температура плавлення, °С	Густина, кг/м ³	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К	
Свинячий жир	28...48	915...923	0,17...0,2	2510
Яловичий жир	42...52	937...953	0,17...0,18	2303
Баранячий жир	44...55	937...961	-	-
Саломас	28...37	821...939	0,14...0,17	2100
Пальмова олія	30...39	921...925	-	-
Кокосова олія	24...27	925...926	0,17...0,18	-
Олія какао	32...36	880...927	0,29...0,43	2512
Соєва олія	-7...-8	922...934	0,15...0,18	1900

Мазут – рідкий продукт темно-коричневого кольору, залишок після виділення з нафти або продуктів її вторинної переробки бензинових, газових і газойлевих фракцій, що википають до 350-360 °С. Мазут – суміш вуглеводнів, нафтових смол, асфальтенів, карбенів, карбоїдів й органічних сполук, що містять метали (V, Ni, Fe, Mg, Na, Ca) [68-70].

Фізико-хімічні властивості мазуту залежать від хімічного складу вихідної нафти й ступеня відгону дистилятних фракцій.

Мазути розрізняють по маркам залежно від в'язкості, виміряної за допомогою віскозиметрів. Є марки М40, М100, М200 і для мартенівських печей МП. Цифри вказують найбільше значення в'язкості (°ВУ) при температурі 50 °С. Наприклад, марка М40 означає, що в'язкість мазуту не перевищує 40 °УВ при температурі 50 °С. В'язкість мазуту суттєво залежить від температури (рис. 3.6) [71-73].

Графік залежності коефіцієнтів в'язкості мазутів від температури представлений на рис. 3.6 [71].

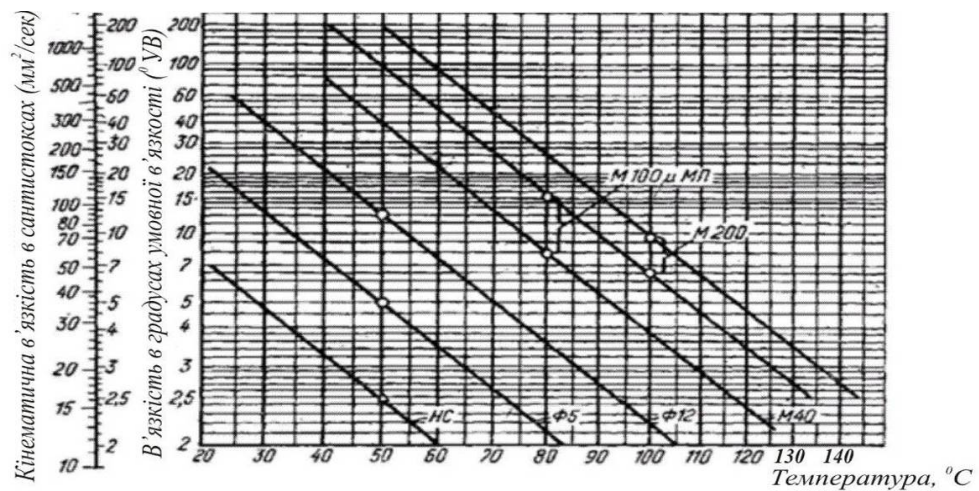


Рис. 3.6. Залежність коефіцієнтів в'язкості мазутів від температури
Ф5 і Ф12 – мазути флотські; 40, 100, 200 – топкові мазути; МП – паливо для мартенівських печей; НС – стабілізована нафта.

Теплофізичні властивості мазуту різних марок представлені в табл. 1.10 [71-73].

Теплофізичні властивості мазуту різних марок

Найменування	Од. виміру	Низькосірчисті		Сірчисті і високосірчисті		
		М40	М100	М40	М100	М200
В'язкість, при 80 °С	°УВ	6	10	8	15,5	24
Густина, при 20 °С	кг/м ³	970	990	1005	945	960
Температура спалаху, не нижче	°С	90	110	90	110	140
Температура застигання, не вище	°С	10	25	10	25	36

Графік залежності коефіцієнта теплопровідності мазуту від температури представлений на рис. 3.7 [71, 74], і свідчить, що при зростанні температури від 40 до 130 °С коефіцієнт теплопровідності зменшується в діапазоні від 0,14 до 0,117 Вт/м·К.

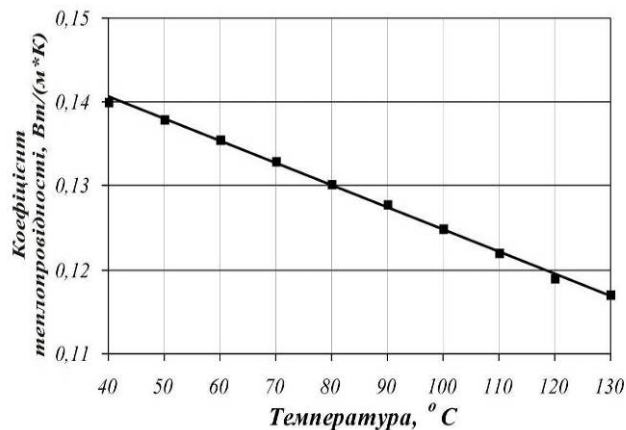


Рис. 3.7. Графік залежності коефіцієнта теплопровідності мазуту від температури

Модельними середовищами в даній роботі обрано вазелін та парафін.

Вазелін (парафін рідкий; лат. *Vaselinum, Paraffinum unguinosum, Petrolatum*) – густа напіврідка суміш твердих граничних вуглеводнів і мінерального масла. Залежно від ступеня очищення може мати білий колір або відтінки жовтого до чорного. Добре розчинний у гідрофобних розчинниках (ефірі, хлороформі), не розчинний в гідрофільних (вода і спирт).

Змішується з будь-якими маслами, крім касторової. Отримують вазелін при вакуумній перегонці низькокипящих нафтових фракцій. Стійкий до дії окислювачів, лугів і кислот [75-80].

Природний вазелін – це мазеподібна, а в тонкому шарі – прозора в'язка безбарвна маса, без смаку і запаху (рідко зі слабким запахом гасу), вільна від зерен і грудок, легкотянущаяся в нитки [81]. Володіє асептичними і гідрофільними властивостями і здатністю, особливо в суміші з ланоліном, поглинати і утримувати значну кількість води. Натуральний вазелін дуже важко емульгується. При зберіганні в будь-яких температурних умовах не повинен розшаровуватися і виділяти масло, навіть у вигляді слідів (випоту).

Вазелін штучний – сплав церезину, парафіну з очищеним (медичним) вазеліновим або парфумерним маслом в різній пропорції в залежності від точки плавлення парафіну або церезину, тому реологічні й теплофізичні властивості вазеліну залежать від композиційної сполуки. До нього додають очищений петролятум для підвищення в'язкості і запобігання в значній мірі від появи випотів [49, 82].

Парафіни являють собою суміш твердих вуглеводнів метанового ряду переважно нормальної будови з 18...35 атомами вуглецю в молекулі. У парафінах зазвичай міститься деяка кількість ізопарафінових вуглеводнів, а також вуглеводнів з ароматичним або нафтовим ядром в молекулі.

Парафін – речовина білого кольору кристалічної будови з молекулярною масою 300...450, в розплавленому стані має малу в'язкість. Величина і форма кристалів парафіну залежать від умов його виділення: з нафти парафін виділяється у вигляді дрібних тонких кристалів, а з нафтових дистилятів і дистилятних рафінатів селективного очищення – у вигляді великих кристалів. При швидкому охолодженні виділяються кристали дрібніше, ніж при повільному [83-86].

Парафіни інертні до більшості хімічних реагентів. Вони окислюються азотною кислотою, киснем повітря (при 140 °С) і деякими іншими

окислювачами з утворенням різних жирних кислот, аналогічних жирним кислотам, що містяться в жирах рослинного і тваринного походження.

Вищенаведене показує, що всі ці речовини є складними багатокомпонентними вуглеводневими сумішами, склад яких та властивості можуть варіюватися в залежності від марок, галузей промисловості, в яких вони застосовуються, за ступенем очищення та від інших багатьох параметрів.

Для організації методів інтенсифікації різних тепломасообмінних процесів, створення нового й підвищення ефективності існуючого обладнання, у тому числі для одержання якісних фармацевтичних препаратів, необхідна інформація про властивості оброблюваних систем.

Тому, був проведений літературний огляд та знайдені теплофізичні властивості деяких вуглеводневих сумішей (табл. 3.6).

Таблиця 3.6

Теплофізичні властивості вуглеводневих сумішей, теплоносія та матеріалу термодетальної поверхні [75-89]

Матеріал	Склад	Температура плавлення, T_f (°C)	Густина, ρ (кг/м ³)	Питома теплота плавлення, L (кДж/кг)	Теплоємність, c (Дж/кг·K)	Теплопровідність, λ (Вт/м·K)	Температуропровідність, $\alpha \cdot 10^6$ (м ² /с)	Кінематична в'язкість, ν (сСм)	Динамічна в'язкість, μ (Па·с)
Вазелін	суміш мінерального масла та твердих парафінів C ₇ -C ₃₅	37...55	870...885	160	2200... 3990	0,174...0,27	0,117	16...36	(18...41) · 10 ⁻³
Парафін	суміш граничних вуглеводнів з C ₁₈ -C ₃₅	40...75	880...920	147...154	2130... 2190	0,12...0,34	0,121	3,7...42	(13...36) · 10 ⁻³
Віск	складні ефіри жирних кислот та одноатомних спиртів C ₂₃ -C ₃₃	62...96	885...970	115...175	1640... 2930	0,034...0,25	0,121...0,29	4,5...7,5 (при 100 °C)	(10...22) · 10 ⁻³
Церезин	суміш граничних вуглеводнів з C ₃₆ -C ₅₅	65...88	910...920	126...184	2360... 2660	0,26...0,34	0,139	10...60	(11...66) · 10 ⁻³
Ланолін	суміш складних ефірів, спиртів з жирними кислотами C ₁₈ -C ₂₄	36...42	940...970	-	-	-	-	-	-
Озокерит	суміш твердих вуглеводнів C – 85...87 % H – 13...14 %	58...100	800...970	140...160	3340	0,17	0,064	6,5...7,1 (при 100 °C)	6,7...8,9 (при 100 °C)
Пропіленгліколь		-60	1036	-	2483	0,218	0,085	5,4	0,056
Вода		0	1000	-	4190	0,59	0,140	0,8	0,8
Сталь		1350	7800	-	450	40,0	11,54	-	-

Густина, теплоємність і теплопровідність близькі і мало змінюються з температурою, тому ці дані для розрахунків були взяті з таблиці.

3.2 Дослідження впливу теплофізичних параметрів на кінетику процесів нагрівання та плавлення

Плавлення – це процес переходу тіла з твердого стану в рідке, тобто перехід речовини з одного агрегатного стану в інше. Плавлення відбувається з поглинанням теплоти плавлення і є фазовим переходом першого роду, яке супроводжується стрибкоподібною зміною теплоємності в конкретній для кожної речовини температурній точці перетворення – температура плавлення [90].

Температура плавлення вуглеводневих основ змінюється в широкому діапазоні, а для ефективного проведення процесів диспергації та гомогенізації необхідно знати значення цього параметра. Експериментальні дослідження на стенді для нагрівання і плавлення вуглеводневих сумішей отримані у вигляді діаграм ($T - \tau$) плавлення вазеліну (рис. 3.8), що оброблені аналогово-цифровим перетворювачем та програмою DASyLab 10.0 [91].

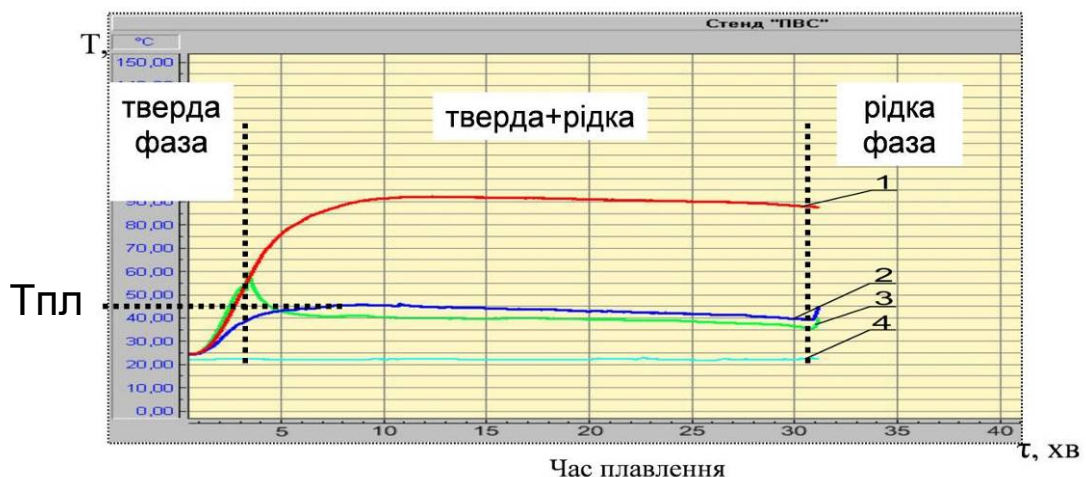


Рис. 3.8. Вивід результатів досліджень на комп'ютер за допомогою аналогово-цифрового перетворювача:

1 – температура нагрівача (ДТ3); 2, 3 – температура розплаву під нагрівачем (ДТ1 та ДТ2); 4 – температура оточуючого середовища (ДТ4).

Завданням цих досліджень було знайти оптимальні параметри для проведення процесів нагрівання та плавлення завдяки варіюванню температурою нагрівача та тиском на дисковий нагрівач, що представляє собою зусилля, яке здійснює нагрівач на поверхню речовини.

Проведення процесів нагрівання та плавлення на експериментальному стенді можна розділити на чотири етапи (рис. 3.9): початок плавлення та перехід розплаву через кільцевий зазор між нагрівачем і стінкою ємності, процес плавлення, коли вже розплав перетікає через зазор на верхню поверхню нагрівача та перетворення твердої фази у рідку.

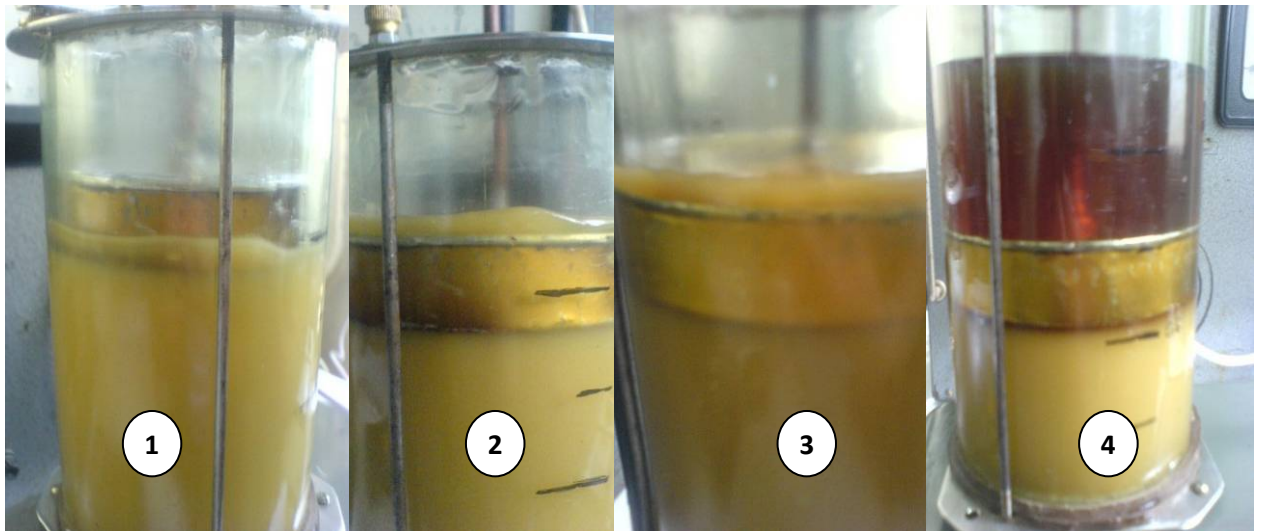


Рис. 3.9. Етапи процесу плавлення вазеліну на експериментальному стенді:

- 1 – початок плавлення та перехід розплаву через кільцевий зазор між нагрівачем та стінкою ємності;
- 2, 3 – процес плавлення (перетікання розплаву через зазор на верхню поверхню нагрівача);
- 4 – перетворення твердої фази у рідку.

Отримано залежність швидкості плавлення від тиску на нагрівач при різних температурах нагрівача (рис. 3.10). Як видно з рисунку, з підвищенням тиску та температури нагрівача можна домогтися інтенсифікації процесу. Але, краще не підвищувати тиск більше 2 кПа, бо на

верхній поверхні нагрівача утворюється великий шар не розплавленої речовини, тобто нагрівач просто витискає речовину, яка не встигає перейти у рідку фазу.

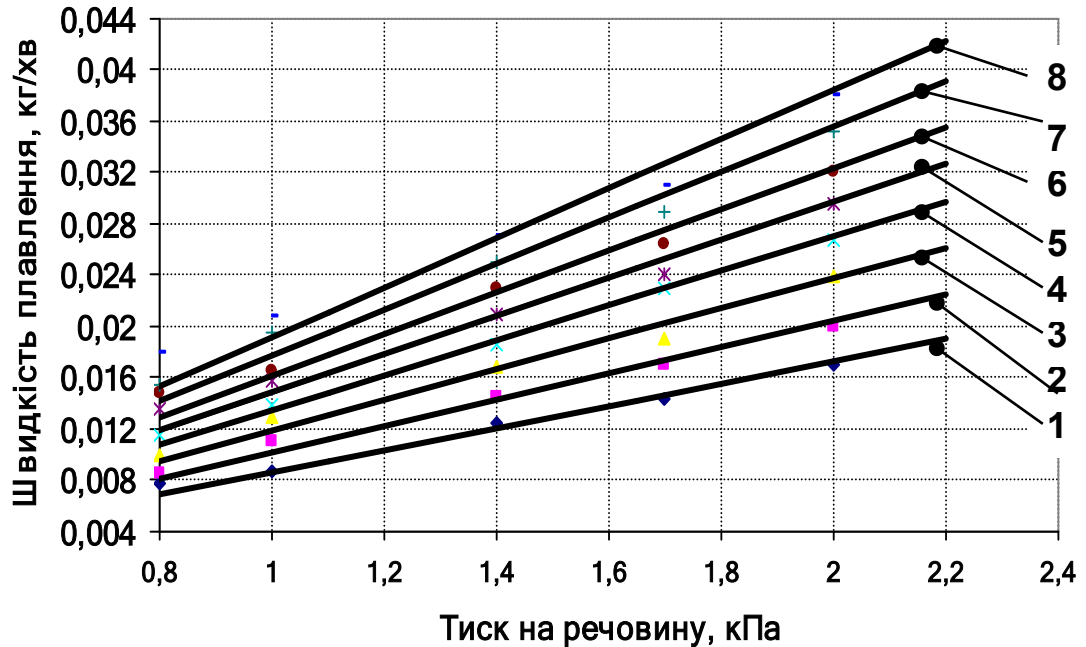


Рис. 3.10. Залежність швидкості плавлення вазеліну від тиску на нагрівач при різних температурах нагрівача:

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 – $T = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На експериментальному стенді проведені дослідження і отримано залежності температури розплаву під нагрівачем в залежності від температури нагрівача при різних тисках. Дуже важливо, щоб речовина під нагрівачем встигала б розплавлятися і утворювалась плівка розплавленої речовини. Тому що, якщо нагрівач буде видавлювати речовину, вона не встигатиме до кінця розплавитися або буде перегріватися.

Досліджено вплив теплофізичних параметрів на кінетику процесів нагрівання та плавлення (рис. 3.11). Проведені досліди і отримано залежність температури розплаву під нагрівачем в залежності від температури при різних тисках на нагрівач. Дуже важливо, щоб речовина під нагрівачем встигала б розплавлятися, але не перегріватися. Тому, з урахуванням того,

що температура плавлення вазеліну може коливатися від 37 до 55 °С, знайдена оптимальна область і параметри, щоб вуглеводнева суміш під нагрівачем встигала б розплавлятися, але не перегріватися, що дуже важливо.

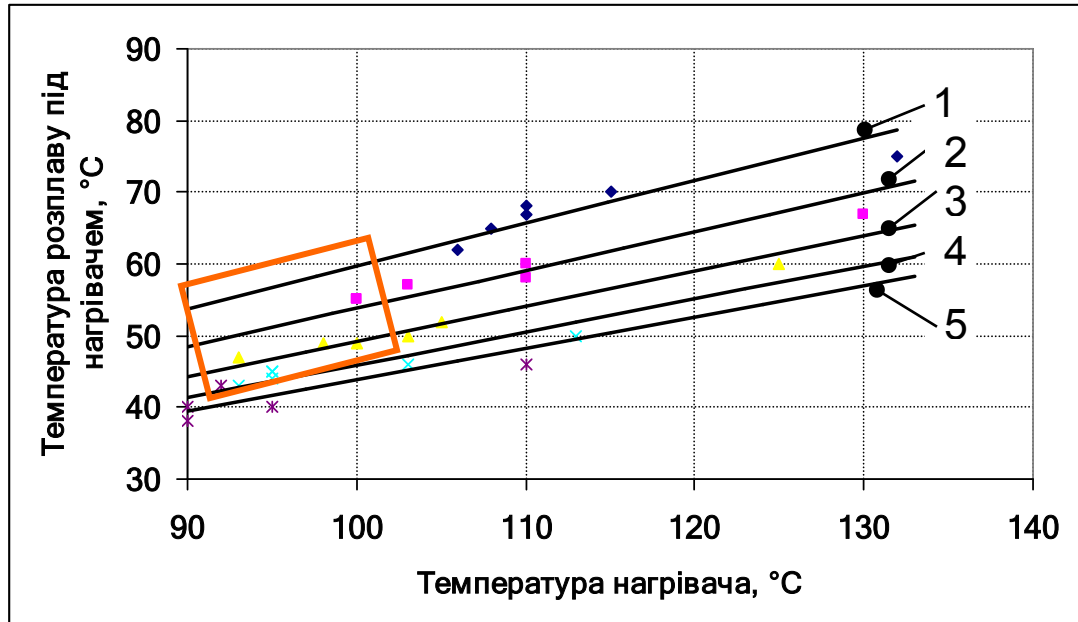


Рис. 3.11. Зміна температури розплаву вазеліну під нагрівачем в залежності від температури нагрівача при різних тисках на нагрівач:

1 – $P=0,8$ кПа; 2 – $P=1$ кПа; 3 – $P=1,4$ кПа; 4 – $P=1,7$ кПа; 5 – $P=2$ кПа.

При встановленні температури нагрівача від 90 до 100 °С, щоб досягти температури плавлення речовини від 37 до 55 °С, достатньо встановити тиск на нагрівач від 0,8 до 1,7 кПа.

3.3 Дослідження теплоємності та теплоти плавлення

Метод диференціальної сканувальної калориметрії (ДСК) є головним представником групи компенсаційних методів, за якими виділена або поглинута зразком теплота компенсується в калориметрі зовнішнім тепловим потоком. Цей метод забезпечує пряме вимірювання теплових ефектів при фазових перетвореннях. Термін “сканувальна” визначає такий режим роботи калориметра, при якому температура калориметричної системи лінійно змінюється у часі. Термін “диференціальний” відповідає суті процесу

сканування, при якому відбувається вимірювання різниці потужностей теплових потоків.

Необхідність точного експериментального визначення теплоємності кожної вуглеводневої суміші має 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 багато в чому визначає раціональність обраних конструкцій, розмірів, режимів роботи і, в кінцевому рахунку, ефективність розробки в цілому.

Взагалі, як відомо з даних по вазеліну, парафіну і всім іншим вуглеводневим сумішам, теплоємність не сильно змінюється з температурою. Але в залежності від марки, призначення та інших параметрів може різнитися. З літературних даних для вазеліну теплоємність може коливатись від 2,2 до 3,99 Дж/кг·К, відповідно, для парафіну теплоємність змінюється від 2,13 до 2,19 Дж/кг·К. для церезина – від 2,36 до 2,66 Дж/кг·К.

Тому, проведенні дослідження по визначенню теплоємності вазеліну та парафіну в залежності від температури (рис. 3.12).

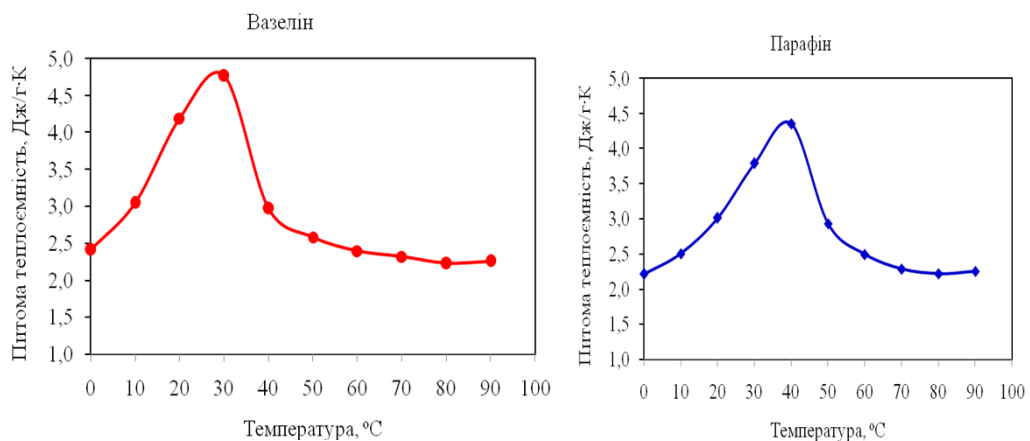


Рис. 3.12. Залежність питомої теплоємності від температури вазеліну та парафіну

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 температурах – високомолекулярні фракції. При цьому у кожній фракції своя теплота плавлення.

Враховуючи це, проведені дослідження теплоти плавлення методом диференціальної скандувальної калориметрії (ДСК) та отримати ДСК-криві плавлення вазеліну і парафіну для визначення питомої теплоти плавлення цих вуглеводневих сумішей.

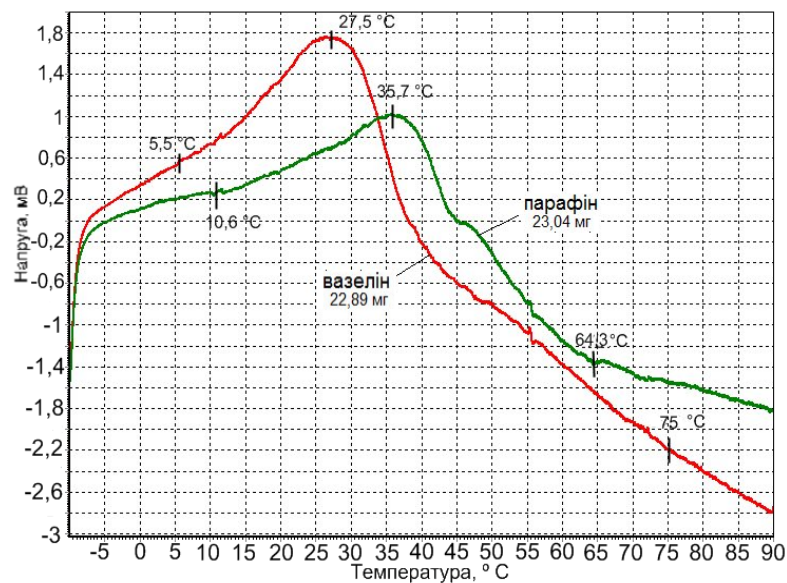


Рис. 3.13. ДСК-криві плавлення

По ДСК-кривим плавлення була визначена питома теплота плавлення в інтервалах плавлення для вазеліну 5,5...75,0 °С та для парафіну 10,6...64,3 °С, яка становить, відповідно, для вазеліну – 68,95 кДж/кг, а для парафіну – 50,73 кДж/кг (табл. 3.7). Ці дані використані для розрахунків теплообміну та моделювання процесів нагрівання та плавлення.

Таблиця 3.7

Визначення питомої теплоти плавлення для вазеліну та парафіну

Матеріал	Маса зразка, мг	Площа піка плавлення, мВ*с	Теплота плавлення, мДж	Питома теплота плавлення, кДж/кг	Інтервал плавлення, °С
Вазелін	22,89	750,2448	1578,21	68,95	5,5 – 75,0
Парафін	23,04	555,6153	1168,79	50,73	10,6 – 64,3

3.4 Дослідження термостійкості

Вазелін та парафін – органічні термолабільні речовини. Термоконтатний спосіб нагрівання та плавлення, пов'язаний з безпосереднім контактом нагрівача і речовиною, яку не обхідно розплавити. І підвищуючи температуру нагрівача, можна інтенсифікувати процес розплавлення. Для того щоб уникнути деструкції при нагрівання та плавлення вазеліну і парафіну проведені дослідження їх термостійкості на дериватографі Q-1000, що характеризує верхню межу робочих температур, до якої їх можна нагрівати без змін структурно-механічних властивостей та перегріву (рис. 3.14, 3.15).

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

Дослідження проводились в діапазоні температур 18...260 °С та швидкості нагрівання 3,8 К/хв. При цьому проводилась реєстрація наступних даних: Т – температура зразка; ТГ – маса зразка; ДТГ – швидкість зміни маси; ДТА – зміна диференціальної температури (тепловий ефект).

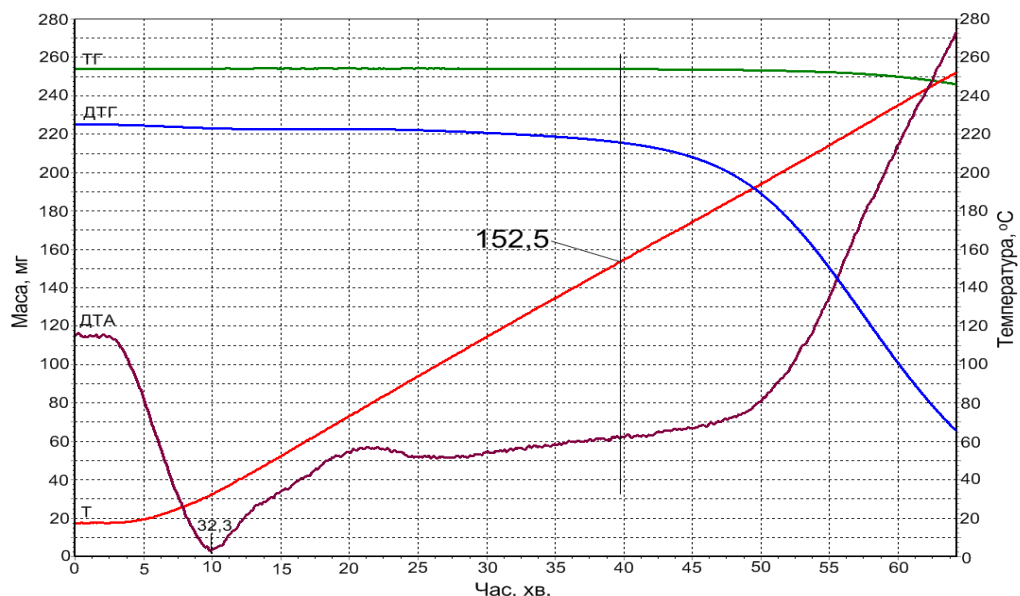


Рис. 3.14. Дериватограма вазеліну. Маса зразка 253,9 мг

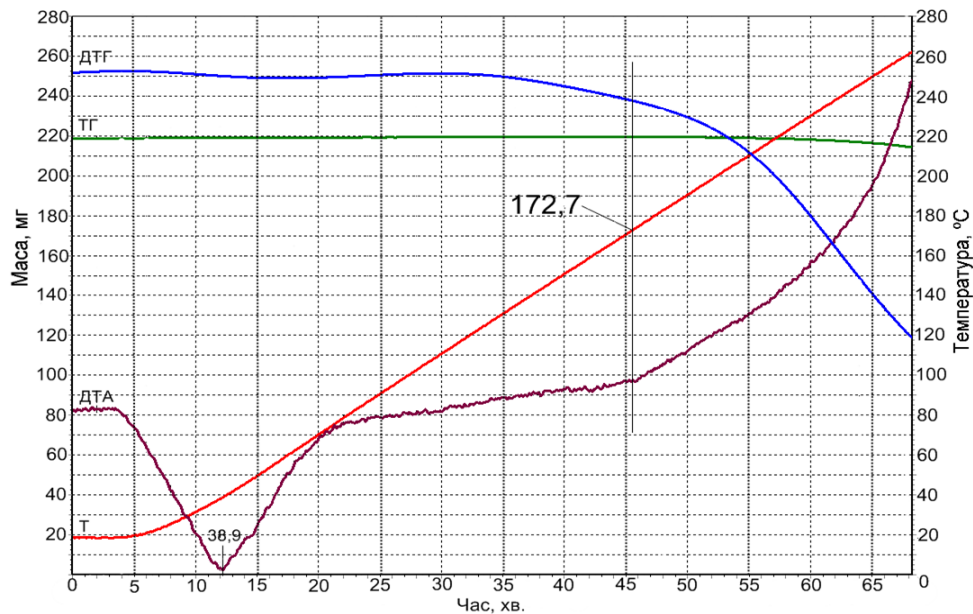


Рис. 3.15 Дериватограма парафіну. Маса зразка 218,7 мг

Дослідження термостійкості вазеліну та парафіну дали можливість по кривій зміні диференціальної температури ДТА (різниця температур між зразком та інертною речовиною) визначити температуру початку термічного розкладання: для вазеліну – 152,5 °С, для парафіну – 172,7 °С, після якої починаються процеси, зв'язані з деструкцією матеріалу (рис. 3.14, 3.15).

3.5 Зміна ентальпії внаслідок нагрівання та плавлення

Розрахунок теплоти фазового переходу.

За даними експериментальних досліджень по визначенню питомої теплоємності побудовано сумарний графік питомої теплоємності від температури для вазеліну та парафіну (рис. 3.16). та визначено значення теплоємності для необхідних значень температур для цих вуглеводневих сумішей. (табл. 3.8, 3.9).

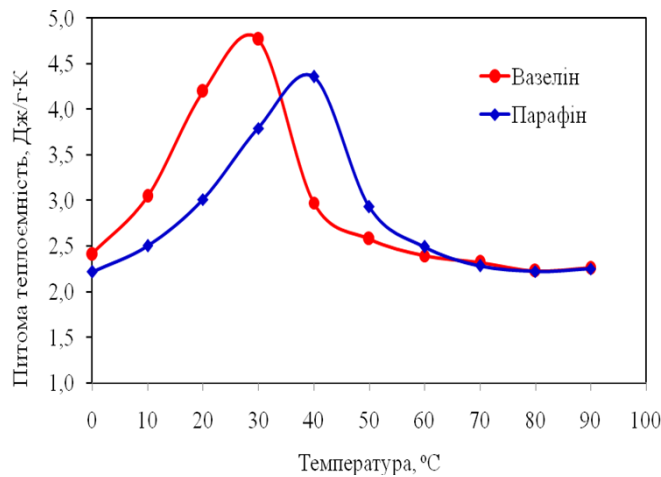


Рис. 3.16. Сумісний графік залежності питомої теплоємності від температури для вазеліну та парафіну

Таблиця 3.8

Залежність питомої теплоємності вазеліну від температури

Зразок	Температура, °C									
	0	10	20	30	35	40	50	60	70	80
Питома теплоємність, Дж/г·К										
Вазелін	2,41	3,04	4,19	4,77	4,19	2,97	2,58	2,39	2,32	2,23

Таблиця 3.9

Залежність питомої теплоємності парафіну від температури

Зразок	Температура, °C									
	0	10	20	30	40	45	50	60	70	80
Питома теплоємність, Дж/г·К										
Парафін	2,22	2,50	3,01	3,79	4,36	3,79	2,93	2,49	2,29	2,22

Розрахунок теплоти плавлення вазеліну.

Зміна питомої ентальпії при нагрівання визначається за формулою

$$dH = C_p \cdot dT. \quad (3.1)$$

Відповідно до експериментальних даних для вазеліну в інтервалах температур від $T_0=0$ °C до $T_1=10$ °C та від $T_2=10$ °C до $T_3=20$ °C спостерігаються лінійні залежності теплоємності від температури з різними кутами нахилу на кожній з цих ділянок.

На інтервалі температур від $T_3=20^\circ\text{C}$ до $T_4=35^\circ\text{C}$ залежність $C_p = f(T)$ має форму оберненої параболи з максимумом $C_{p\max} = 4,8$ кДж/кг К в точці $T_m=27,5^\circ\text{C}$.

В інтервалах температур від $T_4=35^\circ\text{C}$ до $T_5=40^\circ\text{C}$, від $T_5=40^\circ\text{C}$ до $T_6=45^\circ\text{C}$, від $T_6=45^\circ\text{C}$ до $T_7=50^\circ\text{C}$, від $T_7=50^\circ\text{C}$ до $T_8=60^\circ\text{C}$, від $T_8=60^\circ\text{C}$ до $T_9=80^\circ\text{C}$ та від $T_9=80^\circ\text{C}$ до $T_{10}=90^\circ\text{C}$ залежності теплоємності від температури будемо апроксимувати прямим лініями з різними кутами нахилу на кожній з цих ділянок.

На ділянках лінійної залежності $C_p = f(T)$ зміну теплоємності будемо описувати співвідношеннями виду

$$C_p(T) = C_{pi} + \Delta C_{pi} \cdot \frac{T - T_i}{\Delta T_i}, \quad (3.2)$$

де T_i – температура початку інтервалу; C_{pi} – теплоємність на початку інтервалу;

ΔT_i – різниця температур на початку і в кінці інтервалу; ΔC_{pi} – різниця теплоємності на початку і в кінці інтервалу.

Введемо позначення $a_i = \Delta C_{pi} / \Delta T_i$. Тоді рівняння (3.2) можна переписати у вигляді

$$C_p(T) = C_{pi} + a_i \cdot (T - T_i). \quad (3.3)$$

На ділянці від $T_3=20^\circ\text{C}$ до $T_4=35^\circ\text{C}$, де теплоємність змінюється з температурою по параболічному закону, залежність $C_p = f(T)$ будемо описувати рівнянням

$$C_p(T) = C_{p\max} - b \cdot (T - T_m)^2. \quad (3.4)$$

Для вазеліну, згідно експериментальним даним, $C_{p\max} = 4,8$ кДж/кг, $T_m = 27,5^\circ\text{C}$ і $b = 10,85 \cdot 10^{-3}$. Константа b – розраховується з табличних даних (табл. 3.8) для $C_p(20^\circ\text{C})$ і $C_p(35^\circ\text{C})$.

Згідно (3.1) зміна ентальпії на лінійній ділянці визначається як $dH = C_p \cdot dT$. Тоді зміну ентальпії з температурою на лінійних ділянках можна визначати з рівняння

$$dH_i = C_p(T) \cdot dT = C_{pi} \cdot dT + a_i \cdot (T - T_i) \cdot dT. \quad (3.5)$$

Зміну величину ентальпії на кожному лінійному інтервалі ΔH_i визначаємо шляхом інтегрування обох частини рівняння (3.5)

$$\Delta H_i = C_{pi} \int_{T_i}^{T_{i+1}} dT + a_i \int_{T_i}^{T_{i+1}} (T - T_i) \cdot dT$$

Після інтегрування одержимо

$$\Delta H_i = C_{pi} \cdot (T_{i+1} - T_i) + \frac{a_i}{2} (T_{i+1} - T_i)^2$$

або

$$\Delta H_i = C_{pi} \cdot \Delta T_i + \frac{a_i}{2} \cdot (\Delta T_i)^2, \quad (3.6)$$

де ΔT_i - різниця температур на початку і в кінці інтервалу.

На ділянці від $T_3=20^\circ\text{C}$ до $T_4=35^\circ\text{C}$, де залежність $C_p = f(T)$ описується параболою, зміна ентальпії з температурою визначається з рівняння

$$dH_{34} = C_p(T) \cdot dT = C_{p\max} \cdot dT + b \cdot (T - T_m)^2 \cdot dT. \quad (3.7)$$

Зміну величину ентальпії на цій ділянці визнаємо шляхом інтегрування обох частини рівняння (3.7).

Інтегрування будемо проводити послідовно в інтервалі $T_3=20^\circ\text{C}$ до $T_m=27,5^\circ\text{C}$ і в інтервалі від $T_m=27,5^\circ\text{C}$ до $T_4=35^\circ\text{C}$.

$$\Delta H_{3-m} = C_{p\max} \int_{T_3}^{T_m} dT - b \int_{T_3}^{T_m} (T - T_m)^2 \cdot dT$$

$$\Delta H_{m-4} = C_{p\max} \int_{T_m}^{T_4} dT - b \int_{T_m}^{T_4} (T - T_m)^2 \cdot dT$$

Після інтегрування одержимо

$$\Delta H_{3-m} = C_{p\max} \cdot (T - T_m) \Big|_{T_3}^{T_m} - \frac{b}{3} \cdot (T - T_m)^3 \Big|_{T_3}^{T_m} = C_{p\max} \cdot (T_m - T_3) - \frac{b}{3} \cdot (T_m - T_3)^3.$$

$$\Delta H_{m-4} = C_{p\max} \cdot (T - T_m) \Big|_{T_m}^{T_4} - \frac{b}{3} \cdot (T - T_m)^3 \Big|_{T_m}^{T_4} = C_{p\max} \cdot (T_4 - T_m) - \frac{b}{3} \cdot (T_4 - T_m)^3$$

$$\Delta H_{3-4} = 2 \cdot C_{p\max} \cdot \Delta T_{3-m} - \frac{2b}{3} \cdot (\Delta T_{3-m})^3$$

$$\text{де } \Delta T_{3-m} = T_m - T_3 = T_4 - T_m.$$

Зміна ентальпії при нагріванні вазеліну від $T_0=0$ °C до $T_1=80$ °C

визначається як

$$\Delta H_{sum} = \sum_{i=0}^{i=10} \Delta H_i. \quad (3.8)$$

$$\Delta H_{3-4} = 2 \cdot C_{p\max} \cdot \Delta T_{3-m} - \frac{2b}{3} \cdot (\Delta T_{3-m})^3$$

Таблиця 3.10

Дані результатів розрахунку

T_i	0	10	20	27,5	35	40	50	60	80
$C_{pi}(T_i)$	2,41	3,04	4,19	4,8	4,19	2,97	2,58	2,39	2,23
ΔT_i	0	10	10	7,5	7,5	5	10	10	20
ΔC_{pi}	0	0,63	1,15			-1,22	-0,39	-0,19	-0,16
$C_{pi} \cdot T_i$	0	30,4	41,9	36,0	36,0	14,85	25,8	23,9	44,6
$a_i/2$	0	0,0315	0,0575			-0,122	-0,0195	-0,0095	-0,004
$b/3$				$3,616 \cdot 10^{-3}$	$3,616 \cdot 10^{-3}$				
ΔH_i	0	33,55	47,65	34,475	34,475	11,80	23,85	22,95	43,0
ΔH_{sum}	0	33,55	81,62	115,675	150,15	161,95	185,8	208,75	251,75

ΔH_T	0	23	46	63,23	80,5	92	115	138	184
ΔH_{melt}	0	10,55	36,62	52,44	69,65	69,95	70,8	70,75	67,75

Для того щоб нагріти 1 кг вазеліну від 0 °С до 80 °С треба збільшити його ентальпію на 251,75 кДж/кг.

При цьому на нагрівання вазеліну в цьому інтервалі температур при сталому значенні теплоємності $C_p = 2,3$ кДж/кг К витрачається кількість тепла, яка дорівнює $\Delta H = 2,3$ Дж/кг К \times 80 К = 184 кДж/кг К. Отже плавлення 1 кг вазеліну витрачається $\Delta H_{melt} = 251,75 - 184 = 67,75$ кДж/кг.

Це відповідає, одержаним в лабораторії ІТТФ експериментальним даним про теплоту плавлення вазеліну, яка становить ΔH_{melt} 68,95 кДж/кг (рис. 3.17).

На нагрівання 1 кг вазеліну від 20 °С до 80 °С треба збільшити його ентальпію на $251,75 - 81,62 = 170,13$ кДж/кг.

Це відповідає літературним даним про теплоту плавлення вазеліну, яка оцінюється величиною $\Delta H_{melt} = 160$ кДж/кг.

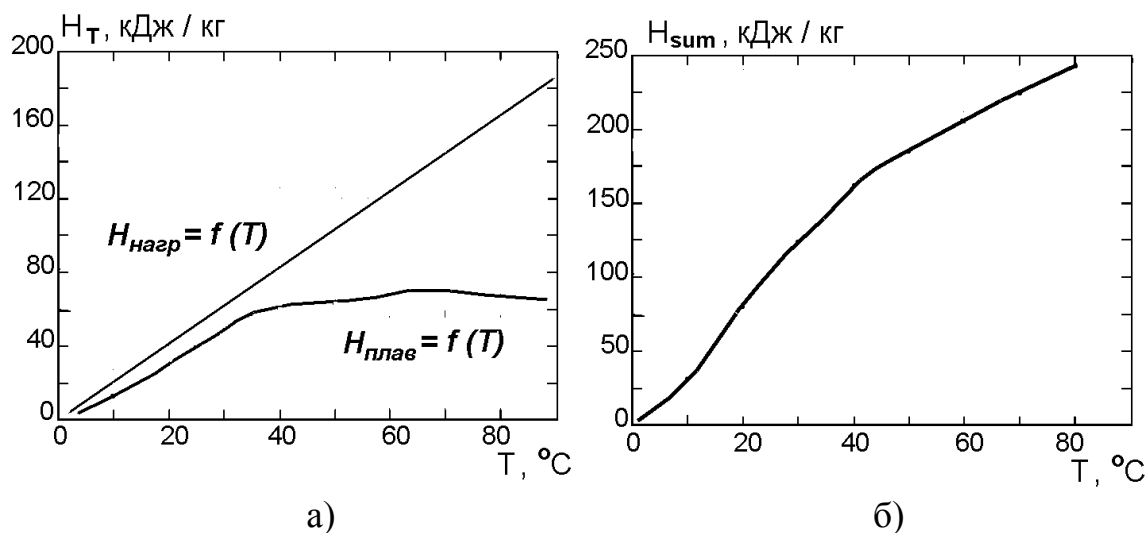


Рис. 3.17. Зміна ентальпії з температурою в об'ємі вазеліну внаслідок нагрівання $H_{i\text{аа}}(T)$ і плавлення $H_{i\text{аа}}(T)$ (а) та сумарна зміна ентальпії внаслідок нагрівання та плавлення $H_{sum}(T)$ (б).

3.6 Дослідження в'язкості

Експериментальні дослідження динамічної в'язкості вазеліну та парафіну проведені на віскозиметрі DV-E фірми "Brookfield".

Проведений комплекс вимірювань в'язкості вазеліну та парафіну в широкому інтервалі температур (40...70 °С) і швидкості обертів (20...100 хв⁻¹), в результаті яких встановлено, що вазелін і парафін є неньютонівськими рідинами, а також встановлена залежність в'язкості від температури при різних швидкостях обертів, що необхідно для моделювання.

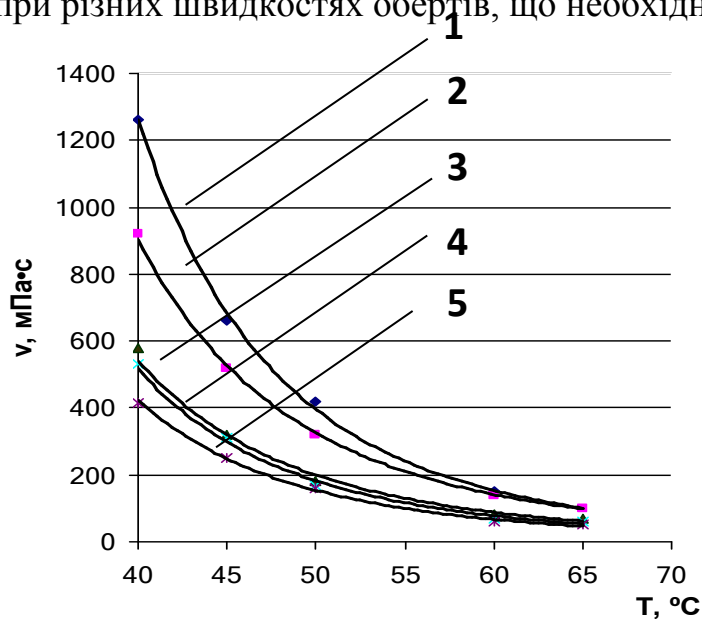


Рис. 3.18. Залежність в'язкості вазеліну від температури при різній швидкості обертів: 1 – 20 хв⁻¹, 2 – 30 хв⁻¹, 3 – 50 хв⁻¹, 4 – 60 хв⁻¹, 5 – 100 хв⁻¹

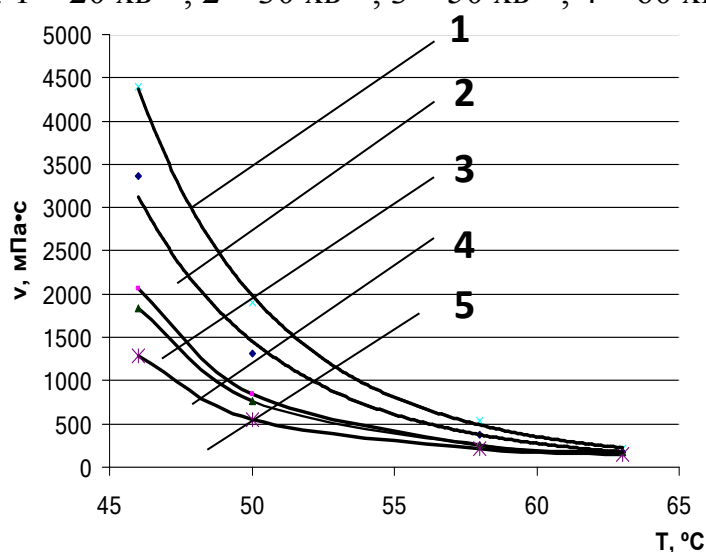


Рис. 3.19. Залежність в'язкості парафіну від температури при різній швидкості обертів: 1 – 20 хв⁻¹, 2 – 30 хв⁻¹, 3 – 50 хв⁻¹, 4 – 60 хв⁻¹, 5 – 100 хв⁻¹

Висновки до розділу 3

1. На стенді для експериментального дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей досліджено вплив теплофізичних параметрів (температура нагрівача, тиск на дисковий нагрівач, початкова температура вуглеводневої суміші) на швидкість перебігу процесів нагрівання і плавлення для визначення оптимальних параметрів.

2. Модельними середовищами в даній роботі обрано вазелін та парафін. Вони є складними багатокомпонентними вуглеводневими сумішами, склад яких та властивості можуть варіюватися в залежності від марок, галузей промисловості, в яких вони застосовуються, за ступенем очищення та від інших багатьох параметрів.

3. Дослідження термостійкості вазеліну та парафіну дали можливість по кривій зміні диференціальної температури ДТА (різниця температур між зразком та інертною речовиною) визначити температуру початку термічного розкладання: для вазеліну – 152,5 °С, для парафіну – 172,7 °С, після якої починаються процеси, зв'язані з деструкцією матеріалу.

4. Проведені дослідження теплоємності та теплоти плавлення методом диференціальної скандувальної калориметрії (ДСК), що дозволили отримати залежність питомої теплоємності від температури та ДСК-криві плавлення вазеліну і парафіну, по яким була визначена питома теплота плавлення в інтервалах плавлення для вазеліну 5,5...75,0 °С та для парафіну 10,6...64,3 °С, 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.

5. Розрахована залежність зміни ентальпії від температури в об'ємі вазеліну дає можливість визначити кількість теплоти, що витрачається на будь-якому заданому інтервалі температур, та визначити теплоту, що витрачено окремо на плавлення і нагрівання.

6. Проведений комплекс вимірювань в'язкості вазеліну та парафіну в широкому інтервалі температур і швидкості обертів, в результаті яких

встановлено, що вазелін і парафін є неньютонівськими рідинами, а також встановлена залежність в'язкості від температури при різних швидкостях обертів, що необхідно для моделювання.

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ НАГРІВАННЯ ТА ПЛАВЛЕННЯ ВУГЛЕВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ З ПРИМУСОВИМ ВИДАЛЕННЯМ РОЗПЛАВУ

Підтримання постійного контакту нагрівача з поверхнею твердої речовини відбувається завдяки перетіканню шару розплаву під дією нормального тиску з боку нагрівача через зазори між диском і стінками ємності. В товщі розплаву, який поступає через зазори на зовнішню поверхню диску верхню поверхню нагрівача, підтримання температури плавлення відбувається за рахунок конвективної теплопередачі від верхньої поверхні нагрівача. Саме такі процеси моделюються при дослідженні процесів плавлення та гомогенізації полімерних матеріалів [92-95].

З математичної точки зору задача плавлення шляхом теплопровідності з примусовим видаленням розплаву є більш складною ніж звичайна задача плавлення оскільки необхідно шукати спільне вирішення рівняння кількості руху та рівняння енергій. Задача ще більш ускладнюється неозначеністю агрегатного та реологічного стану речовини в процесі плавлення в залежності від температури та необхідністю врахування її неньютонівських властивостей.

Цим, зокрема, пояснюється та обставина, що на теперішній час відсутні публікації, пов'язані з моделюванням процесів нагрівання та плавлення саме вуглеводневих сумішей, таких як вазелін, парафін, жири, ланолін тощо.

Метою даного дослідження є розвиток теорії та методів моделювання процесів нагрівання та плавлення цих речовин на основі результатів експериментальних досліджень на лабораторному стенді як першого етапу розробки математичної моделі перебігу цих процесів.

4.1 Моделювання течії розплаву через зазор

Принцип побудови моделі течії через зазор. В'язка рідина тече у вузькому кільцевому каналі між двома співвісними циліндрами під дією перепаду тиску на кінцях каналу з урахуванням сили тяжіння. Стінка зовнішнього циліндра рухається зі швидкістю нерухомої стінки

внутрішнього циліндра із швидкістю w_0 в напрямку протилежному градієнту тиску.

Треба знайти розподіл напруження зсуву і швидкості потоку по ширині зазору.

Задачу течії рідини в кільцевому зазорі доцільно вирішувати в циліндричній системі координат.

Вирішення цієї задачі для ньютонівської рідини в циліндричній системі координат можна отримати в аналітичній формі. Аналітично можна розрахувати залежності $v_z = f(r)$ та $\tau_{rz} = f(r)$, а також визначити середню швидкість рідини в зазорі і витрати рідини через зазор в залежності від геометрії установки та режимних параметрів.

Для неньютонівської рідини в циліндричній системі координат задача не має аналітичного рішення і для її вирішення слід застосовувати чисельні методи

Враховуючи, що зазор між ємністю і нагрівачем дуже вузький ($\delta/R_1 = 0,05$), задачу можна вирішувати не в циліндричних, а в декартових координатах шляхом переходу від кругової моделі до плоско-паралельної моделі.

В цьому випадку задачу можна вирішити в аналітичному вигляді і для ньютонівської і для неньютонівської в'язкої рідини/

Перехід до плоско-паралельної моделі. Течію рідкого вазеліну через зазор будемо розглядати в декартових координатах.

Як і в циліндричній системі координат напрямок руху рідини в зазорі будемо позначати z , а напрямок вздовж ширини зазору позначимо y . Перехід від циліндричної до декартової системи координат схематично представлено на рис. 4.1. Як видно з рисунку, напрямок координати y в декартовій системі співпадає з напрямком координати r в циліндричній системі. Початок координат (y, z) вибираємо в довільній точці на периметрі

кола нижньої поверхні нагрівача, так що точка $y = 0$ відповідає точці $r = R_1$ в циліндричній системі. Координата внутрішньої поверхні стінки ємності $r = R_2$ очевидно відповідає координаті $y = \delta$ в декартовій системі. Відстані по координаті z в обох системах координат мають однакові значення.

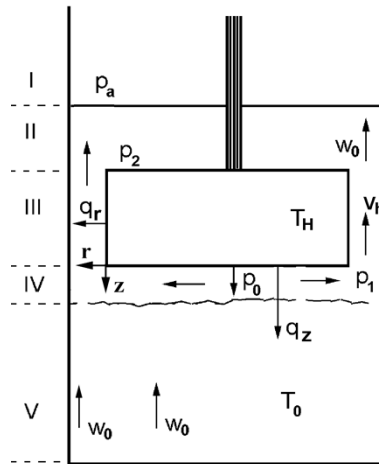


Рис. 4.1. Схема до моделі процесів нагрівання та плавлення з примусовим видалення розплаву: I – повітря; II – розплав над нагрівачем; III – нагрівання та доплавлення у кільцевому зазорі; IV – нагрівання і плавлення в дисковому зазорі; V – тверда речовина.

Швидкість течії розплаву через зазор, яка в циліндричній системі позначається $v_z(r)$, а в декартовій системі – $v_z(y)$, в обох системах мають ті ж самі значення.

В плоско-паралельній моделі швидкість $v_z(y)$ розглядається як швидкість переміщення розплавленого вазеліну в зазорі відносно нагрівача.

Так само в обох системах однакове значення має також швидкість опускання нагрівача v_h , яка в моделі визначає швидкість переміщення стінки ємності і твердого, і розплавленого вазеліну в об'ємі ємності поза зазором відносно нагрівача.

В плоско паралельній моделі швидкість руху стінки ємності відносно нагрівача будемо позначати w_0 . Тобто, за величиною $w_0 \equiv v_h$.

В плоско-паралельній моделі права поверхня зазору $y=0$, яка відповідає боковій поверхні нагрівача, є нерухомою, а ліва поверхня зазору, яка відповідає внутрішній поверхні стінки ємності рухається відносно поверхні нагрівача із швидкістю w_0 в додатному напрямі z .

Експериментальні дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводів проводилися на лабораторному стенді, схематично представлено на рисунку 2. Для теоретичного аналізу результатів експерименту створено математичну модель, яка описує особливості гідродинаміки, тепло- та масообміну в процесі нагрівання та плавлення.

Математична модель базується на таких припущеннях:

1. Стаціонарність процесу нагрівання та плавлення.
2. Розплав – в'язка нестислива ньютонівська або неньютонівська рідина.
3. Теплофізичні властивості розплаву постійні.
4. Рух розплаву в зазорах – ламінарний ($Re < 1$).
5. На стінках відсутнє прослизання.

Модельними об'єктами дослідження обрані вазелін та парафін, які є складними вуглеводневими сумішами, склад та властивості яких можуть варіюватися в залежності від ступеня очищення, від галузі їх застосування та від багатьох інших параметрів.

Модель представлена базовими рівняннями: рівняння теплопровідності, нерозривності та збереження кількості руху (4.1)-(4.5).

Рівняння теплопровідності в осьовому (4.1) та в радіальному напрямі (4.2)

$$\frac{\lambda}{\rho \dot{N}_p} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + w_0 \frac{\partial T}{\partial z} = 0; \quad (4.1)$$

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \quad (4.2)$$

Рівняння нерозривності

$$G_m = \rho S v = \text{const}. \quad (4.3)$$

Рівняння збереження кількості руху

$$\rho v_z \frac{dv_z}{dz} = -\frac{dp}{dz} + \mu(T) \frac{d^2 v_z}{dr^2} + \rho g. \quad (4.4)$$

Рівняння нагрівання та плавлення речовини

$$Q = \frac{d(m C_p T)}{d\tau} + \frac{dm}{d\tau} \cdot L_{melt}. \quad (4.5)$$

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

4.2 Течія розплаву в кільцевому зазорі під дією перепаду тиску і руху стінки

Рівняння течії розплаву в зазорі в плоско-паралельній моделі.

Течія рідини всередині зазору напрямку z відбувається в результаті спільного односпрямованого дії перепаду тиску в зазорі ΔP і швидкості руху стінки w_0 відносно нерухомого нагрівача. Визначимо перепад тиску в зазорі в процесі плавлення.

В початковий момент контакту гарячого нагрівача з поверхнею твердого вазеліну величина тиску на верхній поверхні вазеліну визначається сумою атмосферного тиску p_a і додатковим тиском з боку нагрівача p_h . Тиск p_h визначається як відношення ваги нагрівача до площі його нижньої поверхні на рівні $z = 0$.

$$p_h = \frac{m_h \cdot g}{S_{hz}} = \rho_h \cdot g \cdot H_h = 812 \text{ Па}, \quad (4.6)$$

де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – величина гравітаційного прискорення.

Якщо нагрівач внаслідок розтоплення верхнього шару вазеліну опуститься вниз так, що частина розплаву вазеліну перейде на верхню поверхню нагрівача ($z = H_h$), при визначенні величини тиску p_h необхідно враховувати підйомну архімедову силу. Тоді, ефективна маса нагрівача

визначається як $m_{ef} = (\rho_h - \rho_{vs}) \cdot V_h$, а додатковий тиск з боку нагрівача на вазелін, який знаходиться в контактi з нижньою поверхнею нагрівача, буде тепер дорівнювати

$$p_h = \frac{m_{ef}}{S_{hz}} = (\rho_h - \rho_{vs}) \cdot H_h \cdot g = (2,77 - 0,88) \frac{\text{т}}{\text{м}^3} \times 3 \text{ м} \times 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 556 \text{ Па}, \quad (4.7)$$

а на верхній поверхні нагрівача на рівні виходу із зазору ($z = H_h$) тиск дорівнює атмосферному тиску p_a .

Коли верхня поверхня розплавленого вазеліну підніметься суттєво вище верхньої поверхні нагрівача, до рівня $z > H_h$, величина додаткового тиску на вазелін на рівні $z = 0$ визначається як сума ефективного тиску з боку нагрівача і тиску стовпа розплаву вазеліну над верхньою поверхнею нагрівача

$$p_h(z=0) = (\rho_h - \rho_{vs}) \cdot H_h \cdot g + \rho_{vs} \cdot (z - H_h) \cdot g. \quad (4.8)$$

На верхню поверхню нагрівача діє додатковий тиск з боку стовпа розплаву вазеліну який дорівнює

$$p_h(z = H_h) = \rho_{vs} \cdot (z - H_h) \cdot g. \quad (4.9)$$

Перепад тисків між нижньою та верхньою поверхнею нагрівача, тобто перепад тисків між на вході і на виході із зазору визначається з формули

$$\Delta p = p_h(z=0) - p_h(z = H_h) = (\rho_h - \rho_{vs}) \cdot H_h \cdot g. \quad (4.10)$$

Таким чином, після заповнення зазору розплавом перепад тиску в зазорі залишається постійним і рівним:

$$\Delta p = (\rho_h - \rho_{vs}) \cdot H_h \cdot g. \quad (4.11)$$

Визначення швидкості течії в зазорі для неньютонівських рідин.

Рівняння руху рідини в прямокутному каналі в компонентах напружень записується у вигляді:

$$\frac{d\tau_{yx}}{dy} = \frac{dp}{dz}; \quad (4.12)$$

Враховуючи, що градієнт тиску по довжині зазору є постійною величиною, $dp/dz = \Delta p/H_h = \text{const}$, запишемо рівняння (4.1) у вигляді:

$$\frac{d\tau_{yz}}{dy} = \frac{\Delta p}{H_h}, \quad (4.13)$$

Інтегрування (4.13) дає

$$\tau_{yz} = \frac{\Delta p}{H_h} y + C_1, \quad (4.14)$$

Постійну інтегрування C_1 визначаємо з таких міркувань.

Оскільки швидкість потоку на поверхні нагрівача ($y=0$) дорівнює нулю, а швидкість потоку на поверхні стінки в напрямку осі z позитивна і дорівнює w_0 , на кривій профілю швидкості $v_z = f(y)$ повинен існувати максимум в деякому (невідомому поки) перерізі $y = y_0$, де величина зсувного напруження дорівнює нулю. Якщо скористатися цією передумовою, то на основі рівняння (4.14) можна записати

$$\frac{\Delta p}{H_h} y_0 + C_1 = 0, \text{ звідки } C_1 = -\frac{\Delta p}{H_h} y_0.$$

Підставляючи значення постійної C_1 в рівняння (4.13), одержимо

$$\tau_{yz}(y) = \frac{\Delta p}{H_h} (y - y_0). \quad (4.15)$$

Очевидно, що за умови $y < y_0$ напруження зсуву приймає негативні значення, а при $y > y_0$ – позитивні.

Закон в'язкості для неньютонівської рідини запишемо у вигляді степеневого закону Оствальда – де Ваале:

$$\tau_{yz} = -K \left| \frac{dv_z}{dy} \right|^{n-1} \cdot \frac{dv_z}{dy} = -K |\gamma_{yz}|^{n-1} \cdot \gamma_{yz}, \quad (4.16)$$

який можна представити у формі

$$\tau_{yz} = -K \left(\frac{dv_z}{dy} \right)^n, \text{ уèù } \hat{=} \frac{dv_z}{dy} > 0; \quad (4.16a)$$

$$\tau_{yz} = K \left(-\frac{dv_z}{dy} \right)^n = K \cdot (-\gamma_{yz})^n, \text{ якщо } \frac{dv_z}{dy} < 0. \quad (4.16\text{б})$$

Величина $\tau_{yz} < 0$, якщо $\frac{dv_z}{dy} > 0$, навпаки, $\tau_{yz} > 0$, якщо $\frac{dv_z}{dy} < 0$.

Швидкість зсуву $\gamma_{yz} = dv_z/dy$ визначається з рівняння

$$\frac{dv_z}{dy} = \left(-\frac{\tau_{yz}}{K} \right)^{1/n}, \text{ якщо } y < y_0; \quad (4.17\text{а})$$

$$\frac{dv_z}{dy} = -\left(\frac{\tau_{yz}}{K} \right)^{1/n}, \text{ якщо } y > y_0. \quad (4.17\text{б})$$

Підставляючи значення τ_{yz} з рівняння (4.15), перепишемо рівняння (4.17) у вигляді

$$\frac{dv_z}{dy} = \left(-\frac{\Delta P}{H_h K} (y - y_0) \right)^{1/n}, \text{ якщо } y < y_0; \quad (4.18\text{а})$$

$$\frac{dv_z}{dy} = -\left(\frac{\Delta P}{H_h K} (y - y_0) \right)^{1/n}, \text{ якщо } y > y_0. \quad (4.18\text{б})$$

Інтегруючи рівняння (4.18) у відповідних інтервалах, знайдемо розподіл швидкості потоку по висоті зазору. Проведемо спершу інтегрування для інтервалу $y < y_0$.

$$\int dv_z = \left(\frac{\Delta P}{BK} \right)^{1/n} \int (y_0 - y)^{1/n} \cdot dy;$$

Після виконання операції інтегрування отримаємо

$$v_z(y) = -\left(\frac{\Delta P}{BK} \right)^{1/n} \cdot \frac{n}{n+1} \cdot (y_0 - y)^{\frac{n+1}{n}} + C_2. \quad (4.19)$$

Значення постійної C_2 знаходимо з умови, що $v_x = 0$ при $y = 0$.

$$\tilde{N}_2 = \left(\frac{\Delta P}{H_h K} \right)^{1/n} \cdot \frac{n}{n+1} \cdot (y_0)^{\frac{n+1}{n}}.$$

Підставляючи вираз для константи C_2 , приведемо рівняння (4.19) до вигляду

$$v_z(y) = \left(\frac{\Delta P}{H_h K} \right)^{1/n} \frac{n}{n+1} \left[(y_0)^{\frac{n+1}{n}} - (y_0 - y)^{\frac{n+1}{n}} \right] \text{ при } y \leq y_0. \quad (4.20)$$

Проведемо тепер інтегрування для інтервалу $y > y_0$.

$$\int dv_z = - \int \left(\frac{\Delta P}{H_h K} (y - y_0) \right)^{1/n} dy.$$

Після проведення операції інтегрування одержимо

$$v_z(y) = - \left(\frac{\Delta P}{H_h K} \right)^{1/n} \cdot \frac{n}{n+1} \cdot (y - y_0)^{\frac{n+1}{n}} + C_3. \quad (4.21)$$

Значення постійної C_3 находимо з умови, що $v_z = w_0$ при $y = \delta$.

$$\tilde{N}_3 = w_0 + \left(\frac{\Delta P}{H_h K} \right)^{1/n} \cdot \frac{n}{n+1} \cdot (h - y_0)^{\frac{n+1}{n}}.$$

Підставляючи вираз для константи C_2 , приведемо рівняння (4.21) до вигляду

$$v_z(y) = \left(\frac{\Delta P}{H_h K} \right)^{1/n} \cdot \frac{n}{n+1} \left[(\delta - y_0)^{\frac{n+1}{n}} - (y - y_0)^{\frac{n+1}{n}} \right] + w_0 \text{ і } \delta \leq y \leq y_0.$$

Розподіл швидкості течії по висоті зазору в інтервалі $0 \leq y \leq \delta$ описується системою рівнянь

$$v_z(y) = \left(\frac{\Delta P}{H_h K} \right)^{1/n} \frac{n}{n+1} \left[(y_0)^{\frac{n+1}{n}} - (y_0 - y)^{\frac{n+1}{n}} \right] \text{ при } y \leq y_0; \quad (4.22a)$$

$$v_z(y) = \left(\frac{\Delta P}{H_h K} \right)^{1/n} \frac{n}{n+1} \left[(\delta - y_0)^{\frac{n+1}{n}} - (y - y_0)^{\frac{n+1}{n}} \right] + w_0 \text{ при } y \geq y_0. \quad (4.22б)$$

Очевидно, що при $y = y_0$ рівняння (4.22a) і (4.22б) повинні приводити до одного і того ж значення швидкості $v_z(y) = v_z(y_0)$. Порівнюючи праві частини рівнянь (4.22a) і (4.22б), отримаємо

$$(y_0)^{\frac{n+1}{n}} - (\delta - y_0)^{\frac{n+1}{n}} = w_0 \cdot \frac{n+1}{n} \left(\frac{H h K}{\Delta P} \right)^{1/n}. \quad (4.23)$$

Вирішуючи рівняння (4.23) щодо y_0 , знаходимо значення параметра y_0 , який визначає нульові значення напруги зсуву і швидкості зсуву на осі y_0 , а, отже, положення максимуму швидкості течії розплаву по ширині зазору.

Очевидно, що знайдене значення y_0 є функцією заданих геометричних і режимних параметрів елемента, які містяться в комплексі в правій частині рівняння (4.23). Вводячи позначення

$$A_1 = w_0 \frac{n+1}{n} \left(\frac{H h K}{\Delta P} \right)^{1/n}, \quad (4.24)$$

перепишемо рівняння для розрахунку параметра y_0 у вигляді

$$(y_0)^{\frac{n+1}{n}} - (\delta - y_0)^{\frac{n+1}{n}} = A_1. \quad (4.25)$$

Швидкість течії в зазорі для ньютонівських рідин.

Для ньютонівських рідин розподіл напруження по ширині зазору описується тим же рівнянням (4.15), що і для неньютонівських.

$$\tau_{yz}(y) = \frac{\Delta p}{H h} (y - y_0).$$

Очевидно, що за умови $y < y_0$ напруження зсуву $\tau_{yz}(y)$ приймає негативні значення, а при $y > y_0$ – позитивні.

Замість степеневого закону в'язкості для неньютонівської рідини застосуємо закон в'язкості для ньютонівської рідини. Таке перетворення можна зробити і в рамках степеневого закону в'язкості, який описується рівнянням (4.16).

$$\tau_{yz} = -K \left| \frac{dv_z}{dy} \right|^{n-1} \cdot \frac{dv_z}{dy} = -K \left| \gamma_{yz} \right|^{n-1} \cdot \gamma_{yz},$$

Якщо показник $n=1$, рівняння степеневого закону зводиться до ньютонівського закону в'язкості, а коефіцієнт консистенції K прийме значення динамічного коефіцієнта в'язкості μ

$$\tau_{yz} = -\mu \frac{dv_z}{dy} = -\mu \cdot \gamma_{yz}. \quad (4.26)$$

Швидкість зсуву $\gamma_{yz} = dv_z/dy$ визначається з рівняння

$$\frac{dv_z}{dy} = -\frac{\tau_{yz}}{\mu}. \quad (4.27)$$

Підставляючи значення τ_{yz} з рівняння (4.15), перепишемо рівняння (4.27) у вигляді

$$\frac{dv_z}{dy} = -\frac{\Delta p}{\mu H_h} (y - y_0). \quad (4.28)$$

Очевидно, що $dv_z/dy > 0$, якщо $y < y_0$ і $dv_z/dy < 0$, якщо $y > y_0$.

Інтегруючи рівняння (4.28) у відповідних інтервалах, знайдемо розподіл швидкості $v_z(y)$ по зазору. Проведемо інтегрування для інтервалу $0 < y < y_0$.

$$\int_0^y dv_z = \frac{\Delta p}{\mu H_h} \int_0^y (y_0 - y) \cdot dy = \frac{\Delta p}{\mu H_h} \cdot \left(y_0 y - \frac{y^2}{2} \right) \Big|_0^y$$

Підставивши в обох частинах рівняння верхню і нижню границі, одержимо

$$v_z(y) = \frac{\Delta p}{\mu H_h} \left(y_0 y - \frac{y^2}{2} \right). \quad (4.29)$$

При $y = y_0$ величина швидкості

$$v_z(y_0) = \frac{\Delta p}{\mu H_h} \cdot \frac{y_0^2}{2}. \quad (4.30)$$

Проведемо інтегрування для інтервалу $y > y_0 < \delta$.

$$\int_y^\delta dv_z = \frac{\Delta p}{\mu H_h} \int_y^\delta (y_0 - y) \cdot dy = \frac{\Delta p}{\mu H_h} \cdot \left(y_0 y - \frac{y^2}{2} \right) \Big|_y^\delta.$$

Підставивши в обох частинах рівняння верхню і нижню границі, одержимо

$$w_0 - v_z(y) = \frac{\Delta p}{\mu H_h} \cdot \left(y_0(\delta - y) - \frac{\delta^2 - y^2}{2} \right),$$

звідки швидкість потоку $v_z(y)$ описується як

$$v_z(y) = w_0 - \frac{\Delta p}{\mu H_h} \cdot \left(y_0(\delta - y) - \frac{\delta^2 - y^2}{2} \right). \quad (4.31)$$

При $y = y_0$ величина швидкості визначається з рівняння

$$v_z(y_0) = w_0 - \frac{\Delta p}{\mu H_h} \cdot (\delta - y_0) \cdot \left(\frac{y_0 - \delta}{2} \right) = w_0 + \frac{\Delta p}{\mu H_h} \cdot \frac{(\delta - y_0)^2}{2}. \quad (4.32)$$

Очевидно, що в точці $y = y_0$ швидкість $v_z(y)$, розрахована для обох інтервалів, має бути однаковою оскільки координата лежить на межі обох інтервалів. Прирівнюючи праві частини рівнянь (4.32) і (4.30), одержимо рівняння для визначення координати y_0

$$w_0 + \frac{\Delta p}{\mu H_h} \cdot \frac{(\delta - y_0)^2}{2} = \frac{\Delta p}{\mu H_h} \cdot \frac{y_0^2}{2}. \quad (4.33)$$

Після простих перетворень рівняння (4.33) зводиться до вигляду

$$w_0 = + \frac{\Delta p}{\mu H_h} \delta^2 - \frac{\Delta p}{\mu H_h} \delta \cdot y_0.$$

Вирішуючи останнє рівняння відносно y_0 , знаходимо значення координати y_0 , яке виражається через відомі параметри моделі

$$y_0 = \frac{\delta}{2} + \frac{\mu H_h}{\Delta p \cdot \delta} \cdot w_0. \quad (4.34)$$

Визначивши кількісні значення параметра y_0 для заданих режимних і конструктивних параметрів апарата, і підставляючи це значення в рівняння, в

які входить параметр y_0 можна знайти розподіл тиску по ширині зазору (4.15), в тому числі значення напруження зсуву на рухомих і на нерухомих стінках зазору. Підставивши значення y_0 в рівняння (4.29) та (4.31), знаходимо кількісні значення швидкості потоку $v_z(y)$ в кожній точці зазору. Зазначимо, що $v_z(y_0)$, яке розраховуємо по формулі (4.30) визначає максимум швидкості в зазорі.

Рішення для ламінарної течії в циліндричних координатах.

В'язка рідина тече у вузькому кільцевому каналі між двома співвісними циліндрами під дією перепаду тиску на кінцях каналу з урахуванням сили тяжіння. Стінка зовнішнього циліндра рухається зі швидкістю нерухомої стінки внутрішнього циліндра із швидкістю w_0 в напрямку протилежному градієнту тиску (рис. 4.2, а). Потрібно знайти розподіл напруження зсуву і швидкості потоку по ширині зазору.

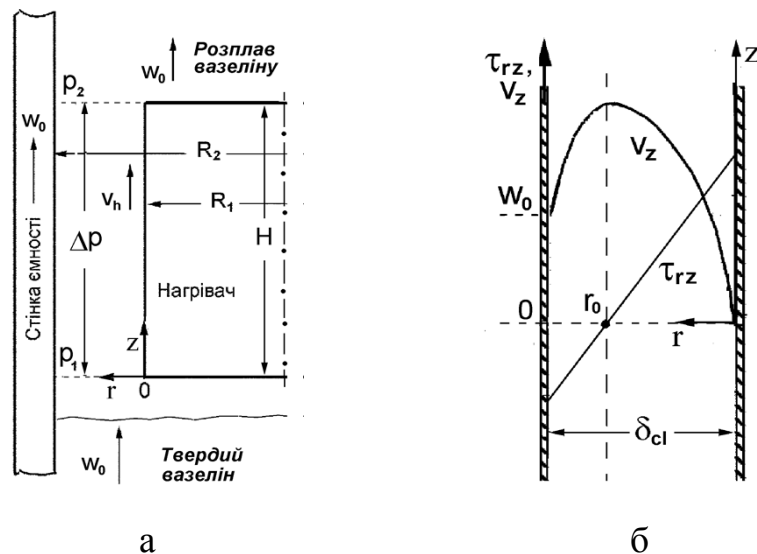


Рис. 4.2. Схема течії розплаву в кільцевому зазорі (а) та розподіл швидкості $v_{zs}(\delta)$ і зсувних напружень $\tau_{rz}(\delta)$ по ширині зазору (б).

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 . І перепад тиску $p_1 - p_2$, і швидкість руху стінки w_0 (швидкість опускання нагрівача), поки що, залишаються не визначеними.

Для того щоб вирішити цю задачу, треба визначити розподіл напруження тиску по ширині зазору $d\tau_{rz}/dr$. Для всіх задач течії в циліндричних трубах і кільцевих зазорах воно описується стандартним рівнянням руху:

$$\frac{d(r\tau_{rz})}{dr} = -\frac{dp}{dz} = \frac{p_1 - p_2}{H}. \quad (4.35)$$

Залежність напруження тиску від радіусу завжди пряма лінія (рис. 4.2, б), а тому похідна $d\tau_{rz}/dr$ завжди постійна, але невідома величина. У всіх цих задачах записується рівняння в'язкості для ньютонівської або неньютонівської рідини (4.36), 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. 4.2, б) і.

Для ньютонівської рідини рівняння в'язкості має вигляд:

$$\tau_{rz}(r) = -\mu \frac{dv_z}{dr}. \quad (4.36)$$

Рівняння напруження зсуву

$$\tau_{rz}(r) = \frac{\Delta p}{H_h} (r - r_0). \quad (4.37)$$

В нашій задачі в рівнянні (4.37) для $\tau_{rz} = f(r)$ міститься невідомий параметр r_0 (рис. 4.2, б), який необхідно визначити для вирішення цієї задачі.

З рівняння в'язкості швидкість потоку в будь-якій точці r визначається швидкістю потоку, яка містить невідомий параметр r_0 .

$$v_z(r) = \frac{\Delta p}{\mu H_h} \left(r_0 r - \frac{r^2}{2} \right) \text{ при } r \leq r_0; \quad (4.38a)$$

$$v_z(r) = w_0 - \frac{\Delta p}{\mu H_h} \cdot \left(r_0 (\delta - r) - \frac{\delta^2 - r^2}{2} \right) \text{ при } r_0 \leq r \leq \delta. \quad (4.38b)$$

Рівняння (4.38a) описує ліву гілку параболи (зліва від r_0), а рівняння (4.38b) – праву гілку (рис. 4.2, б). Обидва ці рівняння містять невідомий параметр r_0 . Але, як видно з рисунку в точці $r = r_0$ значення швидкості по

рівнянню (4.38а) і (4.38б) будуть однаковими. Тому прирівнюючи швидкості ми знаходимо r_0 і далі вирішуємо задачу.

$$r_0 = \frac{\delta_{cl}}{2} + \frac{\mu H}{\Delta p \cdot \delta_{cl}} w_0. \quad (4.39)$$

Розраховуємо середню швидкість розплаву в зазорі:

$$\bar{v}_z = v_{cl} = w_0 \frac{(\delta - r_0)}{\delta} + \frac{(p_1 - p_2)}{\mu H_h} \left[\frac{\delta^2}{3} - (\delta - r_0) \cdot r_0 \right]. \quad (4.40)$$

В рівняннях цієї моделі невизначеним залишаються тиск p_1 на вході в зазор, відносна 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.

4.3 Розрахунок середньої швидкості та об'ємної витрати через зазор

Розрахунок для ньютонівської рідини.

Об'ємна витрата розплаву через зазор дорівнює добутку середньої швидкості розплаву в зазорі на площу поперечного перерізу зазору.

$$G_V = \bar{v}_z \cdot S_{cl}. \quad (4.41)$$

Площу поперечного перерізу будемо розраховувати по формулі

$$S_{cl} = \pi(R_1^2 - R_2^2) = \pi(R_2 - R_1) \cdot (R_2 + R_1) = 2\pi R_{cp} \delta, \quad (4.42)$$

де $R_{cp} = (R_1 + R_2)/2$ – середній радіус зазору.

Середня швидкість в зазорі визначається по формулі

$$\bar{v}_{xn} = \frac{2\pi R_{cp}}{S_{cl}} \int_0^{\delta} v_z(y) \cdot dy = \frac{1}{\delta} \cdot \int_0^{\delta} v_z(y) \cdot dy. \quad (4.43)$$

Тоді, з урахуванням (4.41) об'ємна витрата через зазор визначається як

$$G_V = 2\pi R_{cp} \int_0^{\delta} v_z(y) \cdot dy. \quad (4.44)$$

Приймаючи до уваги, що розподіл швидкості по ширині зазору в інтервалі $0 \leq y \leq y_0$ і в інтервалі $y_0 \leq y \leq \delta$ описується двома різними рівняннями рівняння (4.44) зручно звести до вигляду

$$G_V = 2\pi R_{cp} \int_0^{\delta} v_z(y) \cdot dy = G_{V1} + G_{V2} = 2\pi R_{cp} \left(\int_0^{y_0} v_z(y) \cdot dy + \int_{y_0}^{\delta} v_z(y) \cdot dy \right). \quad (4.45)$$

Розподіл швидкості потоку по ширині зазору в інтервалі $0 \leq y \leq y_0$ описується рівнянням (4.29):

$$v_z(y) = \frac{\Delta p}{\mu H_h} \left(y_0 y - \frac{y^2}{2} \right) \quad (4.46)$$

Тоді, підставляючи праву частину (4.46) в праву частину рівняння (4.45) для інтервалу $0 \leq y \leq y_0$, запишемо

$$G_{V1} = \frac{2\pi R_{cp} \Delta p}{\mu H_h} \int_0^{y_0} \left(y_0 y - \frac{y^2}{2} \right) \cdot dy = \frac{2\pi R_{cp} \Delta p}{\mu H_h} \left(y_0 \int_0^{y_0} y \cdot dy - \int_0^{y_0} \frac{y^2}{2} \cdot dy \right).$$

Після інтегрування одержимо

$$G_{V1} = \frac{2\pi R_{cp} \Delta p}{\mu H_h} \left(y_0 \frac{y^2}{2} \Big|_0^{y_0} - \frac{y^3}{6} \Big|_0^{y_0} \right) = 2\pi R_{cp} \frac{\Delta p}{\mu H_h} \cdot \frac{y_0^3}{3}. \quad (4.47)$$

Розподіл швидкості потоку по ширині зазору в інтервалі $y_0 \leq y \leq \delta$ описується рівнянням (4.31):

$$v_z(y) = w_0 - \frac{\Delta p}{\mu H_h} \cdot \left(y_0(\delta - y) - \frac{\delta^2 - y^2}{2} \right). \quad (4.48)$$

Витрата розплаву в зазорі в інтервалі $y_0 \leq y \leq \delta$ визначається з рівняння

$$G_{V2} = 2\pi R_{cp} \cdot \int_{y_0}^{\delta} v_z(y) \cdot dy. \quad (4.49)$$

Підставляючи праву частину (4.48) в праву частину рівняння (4.49), одержимо

$$G_{V2} = 2\pi R_{cp} \cdot \int_{y_0}^{\delta} \left[w_0 - \frac{\Delta p}{\mu H_h} \cdot \left(y_0(\delta - y) - \frac{\delta^2 - y^2}{2} \right) \right] \cdot dy. \quad (4.50)$$

Візьмемо інтеграли з кожного з трьох членів в правій частині (4.50)

$$G_{V2} = 2\pi R_{cp} \cdot \left[\int_{y_0}^{\delta} w_0 dy - \frac{\Delta p}{\mu H_h} \cdot \int_{y_0}^{\delta} y_0(\delta - y) dy + \frac{\Delta p}{\mu H_h} \cdot \int_{y_0}^{\delta} \frac{\delta^2 - y^2}{2} dy \right]$$

В результаті одержали рівняння для розрахунку витрати G_{V2} у вигляді

$$G_{V2} = 2\pi R_{cp} \cdot \left[w_0 \cdot (\delta - y_0) - \frac{\Delta p}{\mu H_h} \left(\frac{y_0(\delta - y_0^2)}{2} - \frac{2\delta^3 - 3\delta^2 y_0 + 4y_0^3}{6} \right) \right],$$

Після простих перетворень рівняння зводимо до вигляду

$$G_{V2} = 2\pi R_{cp} \cdot \left[w_0 \cdot (\delta - y_0) - \frac{\Delta p}{\mu H_h} \left(\delta(\delta - y_0)y_0 - \frac{\delta^3 - y_0^3}{3} \right) \right]. \quad (4.51)$$

Складаючи праві частини рівнянь (4.47) і (4.51) одержимо рівняння для визначення сумарної витрати через зазор у вигляді

$$G_V = G_{V1} + G_{V2} = 2\pi R_{cp} \cdot \left[w_0 \cdot (\delta - y_0) - \frac{\Delta p}{\mu H_h} \left(\delta(\delta - y_0)y_0 - \frac{\delta^3 - y_0^3}{3} - \frac{y_0^3}{3} \right) \right]. \quad (4.52)$$

Після простого перетворення зведемо рівняння розрахунку витрати через зазор до кінцевого вигляду

$$G_V = 2\pi R_{cp} \cdot \left[w_0 \cdot (\delta - y_0) - \frac{\Delta p}{\mu H_h} \left(\delta(\delta - y_0)y_0 - \frac{\delta^3}{3} \right) \right]. \quad (4.53)$$

Згідно рівнянню (4.41) середня швидкість через зазор визначається як

$$\bar{v}_z = \frac{G_V}{S_{cl}} = \frac{G_V}{2\pi R_{cp} \delta}. \quad (4.54)$$

Підставляючи в це рівняння значення G_V з (4.53), одержимо рівняння для визначення середньої швидкості розплаву через зазор, яке містить лише відомі параметри.

$$\bar{v}_z = w_0 \frac{(\delta - y_0)}{\delta} - \frac{\Delta p}{\mu H_h} \left[(\delta - y_0) \cdot y_0 - \frac{\delta^2}{3} \right]. \quad (4.55)$$

Зв'язок між швидкістю опускання нагрівача та швидкістю течії розплаву в зазорі.

Коли нагрівач опускається вниз, він витісняє масу розплаву, яка переходить всередину зазору. Якщо нагрівач опустився на відстань Δh_h , то об'єм розплаву, що переходить в зазор дорівнює $S_{hz} \cdot \Delta h_h = \pi R_1^2 \cdot \Delta h_h$. Тоді висота, на яку піднявся рівень в зазорі розраховується як

$$\Delta h_{cl} = \frac{S_{hz} \Delta h_h}{S_{cl}} = \frac{\pi R_1^2 \cdot \Delta h_h}{\pi R_1^2}, \quad (4.56)$$

де S_{hz} і S_{cl} д – площа нижньої поверхні нагрівача і площа перерізу зазору, відповідно.

Якщо середня швидкість рідкої речовини через зазор \bar{v}_z , а швидкість опускання нагрівача v_h , то з рівняння балансу витрати речовини через зазор:

$$G_{V_3} = (R_2^2 - R_1^2) \cdot \bar{v}_z = \pi R_1^2 \cdot v_h$$

знаходимо швидкість v_h :

$$v_h = \bar{v}_z \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_1^2} = \bar{v}_z \left(\frac{R_2^2}{R_1^2} - 1 \right) = 0,1025 \bar{v}_z. \quad (4.57)$$

Підставляючи у формулу значення радіусів R_1 та R_2 находимо зв'язок між швидкість опускання нагрівача та середньою швидкістю нагрівача в зазорі

$$v_h = 0,1025 \cdot \bar{v}_z. \quad (4.58)$$

Як видно з формули (4.58), це співвідношення залежить лише від діаметрів нагрівача та ємності і тому залишається незмінним при зміні ваги нагрівача або його температури

$$y_0 = 0,27 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\bar{v}_z = \frac{\Delta p \cdot \delta^2}{12 \mu H_h}; \quad v_h = \frac{\Delta p \cdot \delta^2}{118 \cdot \mu H_h} \approx 0,05 \text{ м/с.}$$

4.4 Течія розплаву в дисковому зазорі під нагрівачем

Моделювання течії розплаву в дисковому зазорі (рис. 4.3) 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. А загальне переміщення розплаву в апараті відбувається внаслідок дії відомого тиску нагрівача на вході і атмосферного тиску на виході.

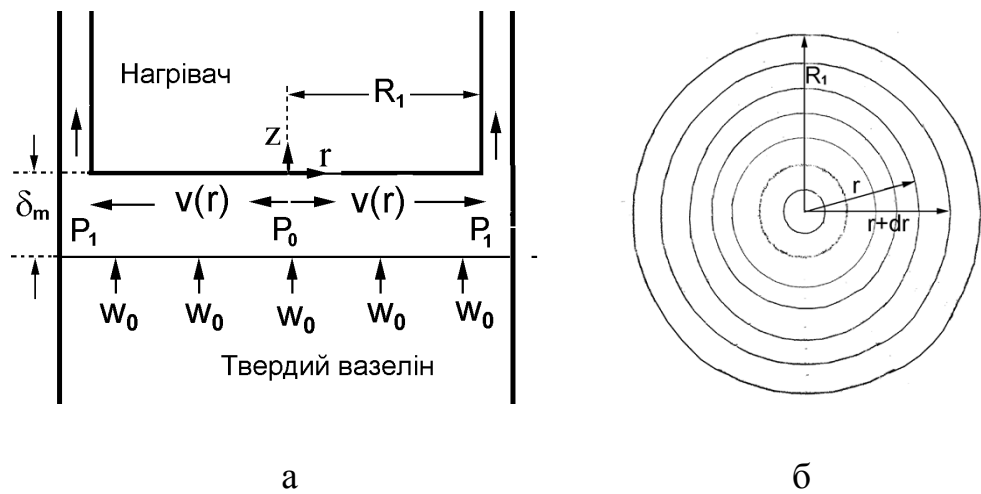


Рис. 4.3. Схема течії розплаву в дисковому зазорі під нагрівачем (а) та схема розбиття дискового зазору на елементарні зони (б)

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. Отже, скільки в зазор поступає розплавлено вазеліну, стільки і витікає із зазору. Це впливає з рівняння нерозривності або з балансу маси. 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. 4.3, б):

$$\rho \frac{v^2(r)}{2} + p(r) = \rho \frac{v^2(r+dr)}{2} + p(r+dr) + dW_{fr}. \quad (4.59)$$

Витрата енергії на в'язке тертя на цій ділянці:

$$dW_{fr} = \mu \frac{v(r)}{\delta_m} \cdot \frac{dS_z}{dS_r} = \mu \frac{w_0 r}{2\delta_m^3} dr. \quad (4.60)$$

Швидкість течії в зазорі:

$$v(r) = \frac{w_0 r}{2\delta_m}. \quad (4.61)$$

З урахуванням (4.60) та (4.61) рівняння руху має вигляд:

$$-\frac{dp}{dr} dr = \rho \cdot \frac{w_0^2 \cdot \pi r \cdot dr}{4\delta_m^2} + \mu \frac{w_0 r}{2\delta_m^3} dr. \quad (4.62)$$

Після інтегрування в межах від 0 до r одержимо:

$$p_0 - p(r) = \rho \cdot \frac{w_0^2 \cdot \pi r^2}{8\delta_m^2} + \mu \frac{w_0 r^2}{4\delta_m^3} = \frac{w_0 r^2}{4\delta_m^2} \left(\frac{\pi \rho w_0}{2} + \frac{\mu}{4\delta_m} \right). \quad (4.63)$$

Підставляючи в (4.63) $r = R_1$, знаходимо тиск p_1 на виході із-під нагрівача:

$$p_1 = p_0 - \rho \cdot \frac{w_0^2 \cdot \pi R_1^2}{8\delta_m^2} - \mu \frac{w_0 R_1^2}{4\delta_m^3} = p_0 - \frac{w_0 R_1^2}{4\delta_m^2} \left(\frac{\pi \rho w_0}{2} + \frac{\mu}{4\delta_m} \right). \quad (4.64)$$

Приймається що в центрі при $r=0$ 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 для течії в дисковому зазорі (4.59)-(4.63) в останньому рівнянні (4.64) визначено тиск p_1 , який можливо далі застосовувати.

4.5 Процеси теплообміну в кільцевому та дисковому зазорі під нагрівачем

Передача тепла в кільцевому зазорі.

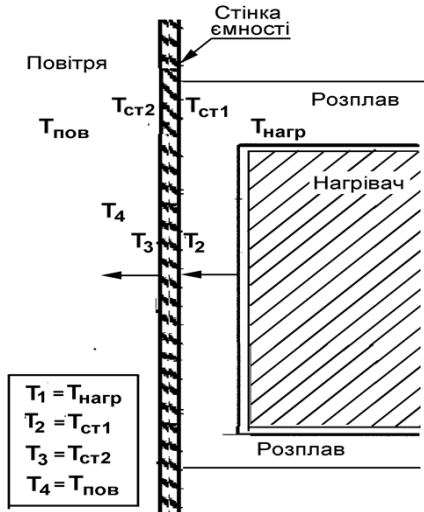


Рис. 4.4. Схема передачі тепла з бокової поверхні нагрівача в кільцевому зазорі

Для оцінки кількості тепла, що йде на нагрівання та плавлення вазеліну (парафіну) з бокової поверхні нагрівача в зазорі внаслідок тепловіддачі з бокової поверхні нагрівача (рис. 4.4) застосовано виключно класичні рівняння теплопередачі в трубах і в зазорах.

Кількість теплоти, переданої в зазор з бокової поверхні нагрівача в одиницю часу

$$q_r = \frac{T_1 - T_4}{\frac{1}{2\pi\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha\pi d_3}} \quad (4.65)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки в повітря $\alpha = \text{Nu} \cdot \lambda_{\text{пов}} / l_0$ (4.66)

$$\text{Nu} = 0,75(\text{GrPr})^{0,25} = 0,75 \cdot \left(g \cdot l_0^3 \cdot \beta \cdot \Delta T / \eta a \right)^{0,25}; \quad (4.67)$$

Кількість тепла за час проходження розплавом зазору

$$Q_r = q_r H_h^2 / \bar{v}_{cl} \quad (4.68)$$

йде на нагрівання маси вазеліну в зазорі:

$$m_{cl} = \rho_{vs} (R_2^2 - R_1^2) H \quad (4.69)$$

Збільшення ентальпії розплаву за час проходження через зазор:

$$\Delta H_T = \frac{Q_r}{m_{cl}} = \frac{q_r H_h^2}{v_{cl} \cdot \rho_{vs} (R_2^2 - R_1^2) \cdot H_h} \text{ [Дж/кг]}. \quad (4.70)$$

За даним експерименту по нагріванню та плавленню даного вазеліну визначаємо $\Delta H_{T \text{ exp}} / \Delta T$ і оцінюємо нагрівання вазеліну при проходженні через зазор:

$$\Delta T = \frac{\Delta H_T}{H_{T \text{ exp}}} \Delta H_{T \text{ теор}}. \quad (4.71)$$

Передача тепла в дисковому зазорі під нагрівачем.

Товщина плівки δ_m є постійною величиною, яка вибирається заздалегідь із умови, що температура на границі $z = \delta_m$ це температура плавлення вазеліну T_m . Тобто, при $T < T_m$ вазелін (парафін) вважається твердим, а при $T > T_m$ – це розплав. При опусканні нагрівача частина розплаву видаляється із плівки, а на його місце через поверхню $z = \delta_m$ в плівку входить розплавлений вазелін із швидкістю $v_z(\delta_m)$.

Оскільки процес нагрівання і плавлення вважається стаціонарним, то при цьому товщина плівки і швидкість опускання нагрівача $w_0 = v_z(\delta_m)$ – постійні.

Рівняння балансу тепла, яке показує, кількість тепла, що передається через поверхню $z = \delta_m$ від розплаву в плівці з температурою T_m в твердий вазелін з температурою T_{s0}

$$\lambda_m \left(\frac{dT}{dz} \right)_{z=\delta_m} = \rho_m [v_z(\delta_m)] \cdot L + \lambda_s \left(\frac{dT}{dz} \right)_{z=\delta_m} \quad (4.72)$$

Звідти швидкість опускання нагрівача

$$w_0 = v_z(\delta_m) = \frac{\lambda_m (dT/dz)_{z=\delta_m} - \lambda_s (dT/dz)_{z=\delta_m}}{\rho_m \cdot L} \quad (4.73)$$

Рівняння теплопереносу в твердій фазі ($z \geq \delta_m$):

$$\rho_s C_s v_{sz} \frac{dT_s}{dz} = \lambda_m \cdot \frac{d^2 T_s}{dz^2} \quad (4.74)$$

Після інтегрування рівняння (4.74) одержимо розподіл температури в твердому вазеліні в інтервалі від T_m до T_{s0} , який описується рівнянням:

$$T = T_{s0} + (T_m - T_{s0}) \cdot \exp \left[- \frac{v_{sz} (z - \delta_m)}{a_s} \right] \quad (4.75)$$

З рівняння (4.75) знаходимо теплий потік, що йде *на нагрівання* твердого вазеліну з урахуванням $v_{sz}\rho_s = v_z(\delta_m) \cdot \rho_m$

$$\lambda_s \cdot (dT/dz)_{z=\delta_m} = -(T_m - T_{s0}) \cdot \rho_m C_s v_z(\delta_m) \quad (4.76)$$

Рівняння нагрівання і плавлення вазеліну при $z \geq \delta_m$

$$\lambda_s \cdot (dT/dz)_{z=\delta_m} = (T_m - T_{s0}) \cdot \rho_{m_s} v_z(\delta_m) (L + C_s (T_m - T_{s0})) \quad (4.77)$$

де $L = f(T)$ – теплота плавлення вазеліну від T_{s0} до T_m ;

C_s – теплоємність.

Перший член в правій частині (4.77) – це тепло на плавлення вазеліну в інтервалі від T_m до T_{s0} , а другий член – це тепло на нагрівання вазеліну в інтервалі від T_m до T_{s0} .

Теплопередача від нагрівача в об'єм вазеліну.

Передача тепла в об'єм твердого вазеліну с температурою T_0 від поверхні нагрівача з температурою T_1 в напрямі z визначається базовим рівнянням теплопровідності

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (4.78)$$

де $a = \lambda/\rho \cdot c_p$ – коефіцієнт температуропровідності.

Це рівняння визначає зміну температури твердої речовини з часом τ на будь-якій відстані z від поверхні нагрівача, за умови що нагрівач нерухомий і увесь час знаходиться у контакт із поверхнею твердої речовини. За цим рівнянням можна визначити передачу тепла у вазелін (або парафін тощо) швидкість його нагрівання традиційними методами. Враховуючи, що величина коефіцієнту температуропровідності вуглеводнів дуже невисока, швидкість нагрівання надмірно мала. Це є обґрунтуванням недоліку традиційних способів розплавлення.

Ми застосуємо це рівняння для нашої моделі.

Введемо безрозмірну температуру $\theta = (T - T_0)/(T_1 - T_0)$ і запишемо рівняння теплопровідності у формі

$$\theta \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}. \quad (4.79)$$

Начальні та граничні умови мають вигляд:

$$\theta = 0 \text{ при } \tau \leq 0, z \geq 0; \quad \theta = 1 \text{ при } \tau > 0, z = 0; \quad \theta = 0 \text{ при } \tau > 0, z = \infty.$$

Рівняння аналітичному вигляді не розраховується і рішення має вигляд

$$\theta = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{z/\sqrt{4a\tau}} \exp(-x^2) \cdot dx$$

або в розмірній формі

$$\frac{T - T_0}{T_1 - T_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{4a\tau}}\right). \quad (4.80)$$

Функція $\operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{4a\tau}}\right)$ розраховується із спеціальних таблиць і її

пояснення потребує дуже багато часу і це не потрібно ні для захисту, ні для презентації.

Але з рівняння (4.80) можна зробити прості, але важливі висновки.

Глибина проникнення теплового фронту δ_T з часом в об'єм речовини визначається із простого співвідношення

$$\delta_T = 4\sqrt{a\tau}. \quad (4.81)$$

При $z > \delta_T$ температура речовини $T(z) = T_0$. а при $z < \delta_T$ температура $T(z) > T_0$.

Швидкість проникнення теплового фронту визначається шляхом диференціюванню по часу глибини поглиблення

$$v_T = \frac{d\delta_T}{d\tau} = 2\sqrt{\frac{a}{\tau}} \quad (4.82)$$

З (4.80) і (4.81) випливає, що на відстанях $z > \delta_T$ температура T відрізняється від початкової температури T_0 менше ніж на 1 % від різниці $T_1 - T_0$. За допомогою розподілення (4.80) можна визначити тепловий потік на поверхні $z = 0$

$$q_z[z]_{z=0} = -\lambda \left[\frac{\partial T}{\partial z} \right]_{z=0} = \frac{\lambda}{\sqrt{\pi a \tau}} (T_1 - T_0). \quad (4.83)$$

Це рівняння показує, що тепловий потік від нагрітої поверхні з температурою T_1 , який надходить в об'єм речовини, з часом буде зменшуватися.

Проведемо розрахунки для вазеліну

$$a = 7,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}; T_1 = 90 \text{ }^\circ\text{C}; T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$\delta_T = 2\sqrt{a\tau} = 1,1 \cdot 10^{-3} \sqrt{\tau} \text{ м} = 1,1 \sqrt{\tau} \text{ мм}$$

$$v_T = 2\sqrt{\frac{a}{\tau}} = \frac{5,48 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{\tau}} \text{ м/с} = \frac{0,055}{\sqrt{\tau}} \text{ см/с} = \frac{0,55}{\sqrt{\tau}} \text{ мм/с}.$$

Видно, що швидкість проникнення теплового фронту часом зменшується.

Але оскільки в нашій задачі термоконтакту об'єм рідини речовини пересувається в сторону нагрівача із швидкістю w_0 (це швидкість опускання нагрівача в об'єм вазеліну), то за умови, що швидкість $v_T \leq w_0$, фронт теплового проникнення не зможе далеко відійти від поверхні (він буде постійно повертатися до поверхні нагрівача із швидкістю w_0 , так що в якийсь момент, коли $v_T = w_0$, швидкість поширення фронту буде дорівнювати нулю відносно нагрівача.

Це означає, що все тепло, яке надходить від нагрівача, буде зосереджуватися біля його поверхні.

Тепловий потік від поверхні розраховується за формулою (4.84)

$$q_z[z]_{z=0} = \frac{\lambda}{\sqrt{\pi a \tau}} (T_1 - T_0) = \frac{0,175 \cdot 10^4}{4,85 \sqrt{\tau}} \cdot (90 - 20) = \frac{25,2}{\sqrt{\tau}} \text{ кВт/м}^2$$

В таблиці 4.1 наведено дані про зміну величин δ_T , v_T та q_z за перші 10 секунд за хвилину з моменту нагрівання вазеліну. В останньому рядку таблиці показано, які кількість тепла Q_z надходить від поверхні нашого конкретного нагрівача заданого розміру в об'єм вазеліну.

Таблиця 4.1

Дані про зміну величин δ_T , v_T та q_z за перші 10 секунд за хвилину з моменту нагрівання вазеліну

τ , с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	60
δ_T , мм	1,1	1,55	1,9	2,2	2,46	2,7	2,9	3,1	3,3	3,47	8,5
v_T , см/с	0,05 5	0,03 9	0,03 2	0,02 7	0,02 5	0,02 2	0,02 1	0,01 9	0,01 8	0,01 7	0,00 7
q_z , кВт/м ²	25,2	17,8	14,5	12,6	11,3	10,3	9,5	8,9	8,4	8,0	3,25
Q_z , Дж/с	198	140	114	99	89	81	75	70	66	63	26

Висновки до розділу 4

1. 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.

2. Розроблене моделювання течії розплаву в кільцевому зазорі, що описує ламінарну течію під дією перепаду тиску і швидкістю руху стінки ємності відносно нагрівача дало можливість розрахувати середню швидкість розплаву через зазор.

3. В результаті моделювання течії розплаву під нагрівачем, що безпосередньо пов'язане з моделюванням течії розплаву через кільцевий зазор, бо розплав переходить із дискового в кільцевий зазор як одна нерозривна течія, було визначено тиск на вході в кільцевий зазор між стінкою і нагрівачем.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ІННОВАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТА УСТАНОВКИ ДЛЯ НАГРІВАННЯ ТА ПЛАВЛЕННЯ ВУГЛЕВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ

5.1 Енергоефективна технологія для термоконтактного нагрівання та плавлення

Продукти перегонки нафти, що складаються в основному із суміші граничних вуглеводнів, широко застосовуються в якості вуглеводневих основ у виробництві м'яких лікарських форм зовнішньої дії – кремів, мазей тощо [96-97]. Аналіз стану науки по цій тематиці показав, що на підприємствах фармацевтичної промисловості для нагрівання та плавлення основ для виготовлення косметичних і лікарських препаратів застосовують теплообмінні апарати періодичної дії з мішалками, ванни із зміювиками, нагрівальні елементи, які повністю або частково покривають ємність, нагрівальні камери тощо. Таке обладнання має рід недоліків: тривалий час плавлення, висока енергоємність, трудомісткість, енергозатратність тощо. Передача тепла в цих апаратах здійснюється в нестаціонарному режимі з великим перепадом температур, що призводить до небажаних змін властивостей кінцевого продукту, безпосередньо, і самих речовин. При роботі на такому обладнанні неможливо домогтися рівномірного прогріву всієї маси речовини, а отже, і якісної теплової обробки [98-100].

Традиційна технологія виготовлення м'яких лікарських форм складається з наступних стадій (рис. 5.1): підготовка основи, підготовка лікарських речовин, введення їх в основу та отримання готової продукції [101-103].

На стадії підготовки основи здійснюються процеси нагрівання та плавлення, що досліджуються у даній роботі. Вона складається з наступних етапів (рис. 5.2): транспортування зі складу в тарі заводу-виробника, завантаження в пристрій для плавлення, процес плавлення, вивантаження з пристрою, дозування, транспортування рідкої речовини.

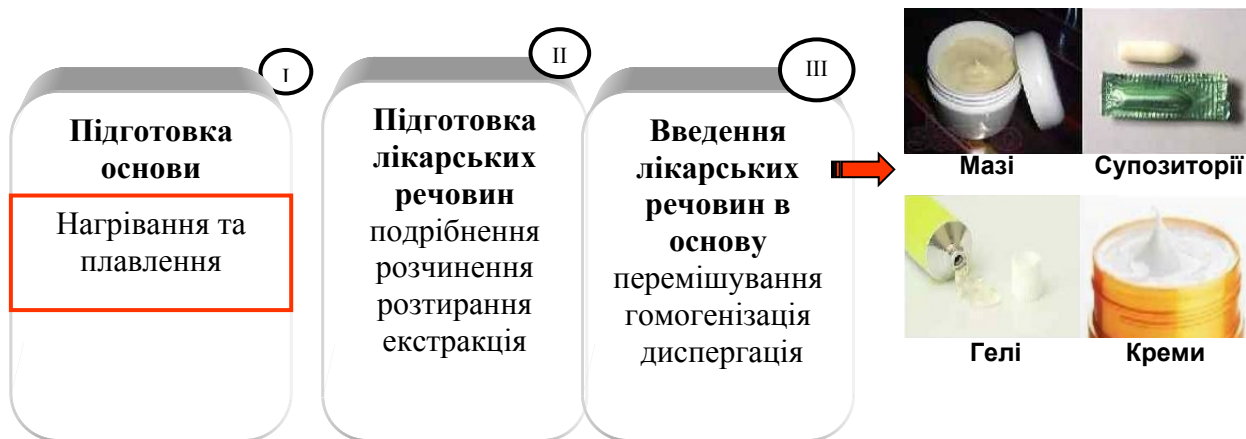


Рис. 5.1. Традиційна технологія отримання м'яких лікарських форм

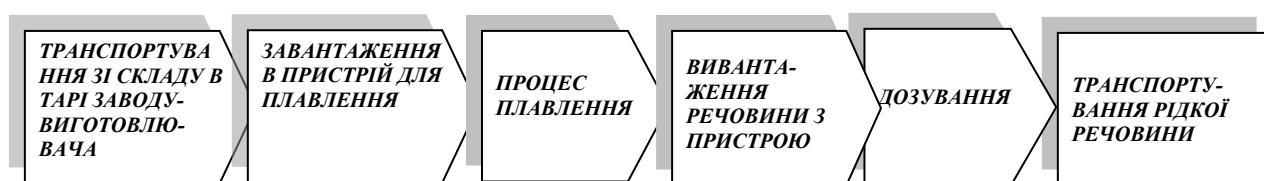


Рис. 5.2. Традиційна технологічна схема нагрівання та плавлення на стадії підготовки вуглеводневої основи

В Інституті технічної теплофізики розроблені схема прискореного термоконтального способу нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей з низьким коефіцієнтом теплопровідності за рахунок контактного та конвективного переносу тепла, що дозволяє інтенсифікувати процес і призводить до зменшення енерговитрат.

Використання такого способу плавлення дозволяє поєднати процеси плавлення, дозування, вивантаження та транспортування розплавленої речовини у одному технологічному циклі (рис. 5.3), що призведе до зменшення терміну плавлення та більш раціональному використанню енергії. Завдяки цьому була розроблена прискорена технологія плавлення основ, для виготовлення фармацевтичних препаратів [104-107].

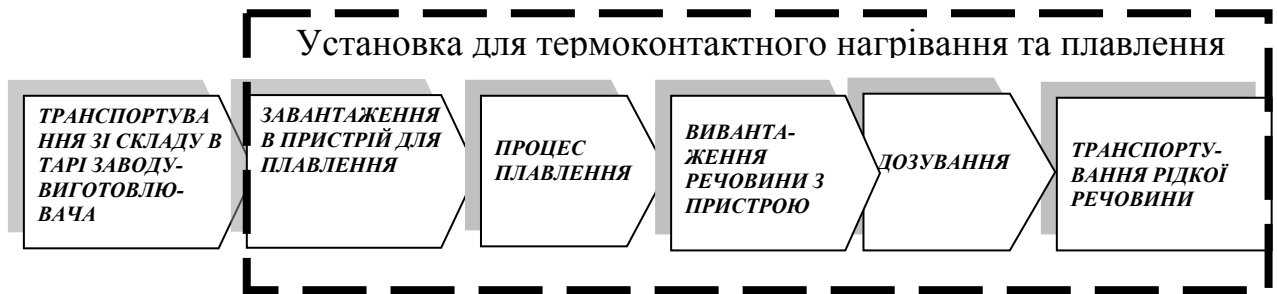


Рис. 5.3. Технологічна схема прискореного нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей

Особливостями даної технологічної схеми є те, що в ній об'єднані чотири технологічні операції, а саме плавлення, вивантаження, дозування та транспортування розплавленої речовини в одному технологічному циклі. Операція завантаження речовин в пристрій для їх плавлення відсутня в зв'язку з тим, що цей процес реалізують безпосередньо в тарі заводу-виготовлювача даних речовин. При цьому процес плавлення здійснюється термоконтактним способом. За цим способом плавлення, на відміну від діючих, поверхня, що обігривається, контактує з твердою поверхнею речовини. Це дозволяє плавити речовини без попереднього їх подрібнення. Зона контакту поверхні, що обігривається, та речовини є сталюю, тому продуктивність способу не залежить від швидкості подачі її в зону контакту. Поверхню, яка обігривається, занурюють у речовину зверху по мірі її плавлення до заздалегідь зазначеної глибини занурення, при цьому температуру цієї поверхні в зоні контакту підтримують нижчою температури деструкції речовини, а на поверхні розплаву – вищою температури її плавлення.

Такий спосіб дозволяє нагрівати і розплавляти лише ту частину речовини, яка необхідна, тобто реалізовувати дозований процес плавлення. Це дає можливість більш раціонально використовувати енергію, підвищуючи коефіцієнт корисної дії та зменшуючи питомі витрати енергії в 4...5 разів. Підтримання температури поверхні в зоні контакту речовини, що плавиться, нижчою температури деструкції, а на поверхні розплаву – вищою за точку її плавлення, дозволяє уникати перегріву речовини, забезпечуючи високу

якість косметичних та фармацевтичних препаратів. В разі, коли розплавлена речовина перестає контактувати з поверхнею, що обігривається, тепло не передається речовині і процес нагріву та плавлення припиняється. При низькій теплопровідності речовин цей процес має більш суттєві переваги, так як термічну обробку не проходить речовина, що знаходиться нижче зони плавлення.

5.2 Виготовлена та введена установка для термоконтактного нагрівання та плавлення

На основі цього методу для проведення процесу плавлення розроблено установку “Термобат-М” з гвинтовим насосом, яка дає можливість відводити з зони плавлення речовини з більшою в’язкістю, що значно скорочує час нагріву і плавлення речовин [104-107]. Принципова схема цієї установки представлена на рис. 5.4, а технічні характеристики у таблиці 5.1.

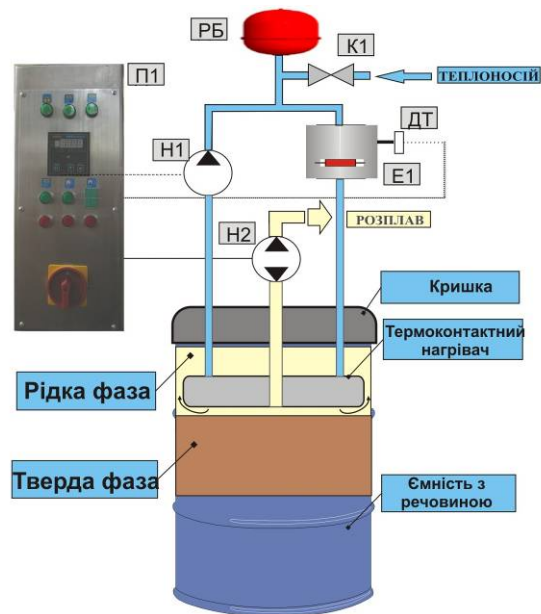


Рис. 5.4 – Принципова схема установки для термоконтактного плавлення:
 Н1...Н2 – насоси; ДТ – датчик температури; РБ – розширювальний бачок;
 П1 – пульт керування; К1 – запірно-регулююча арматура контуру циркуляції теплоносія; Е1 – електричний водонагрівач.

Технічні характеристики установки “Термобат-М”

Тип пристрою за способом плавлення	занурювальний
Встановлена електрична потужність, кВт	12
Продуктивність по вазеліну, кг/зміна	400
Теплоносій	вода
Регулювання температури нагріву	автоматичне
Діапазон регулювання температур, °С	30-110
Електроживлення	220/380 В, 50 Гц
Кількість циркуляційних насосів Sprut, шт.	1
Кількість гвинтових насосів KIBER KVB, шт.	1
Габаритні розміри, мм:	
довжина	1560
ширина	1095
висота	2720

Розроблена та виготовлена установка, в якій застосовано спосіб термоконтального плавлення, пройшла випробовування та наведена на рис. 5.5.

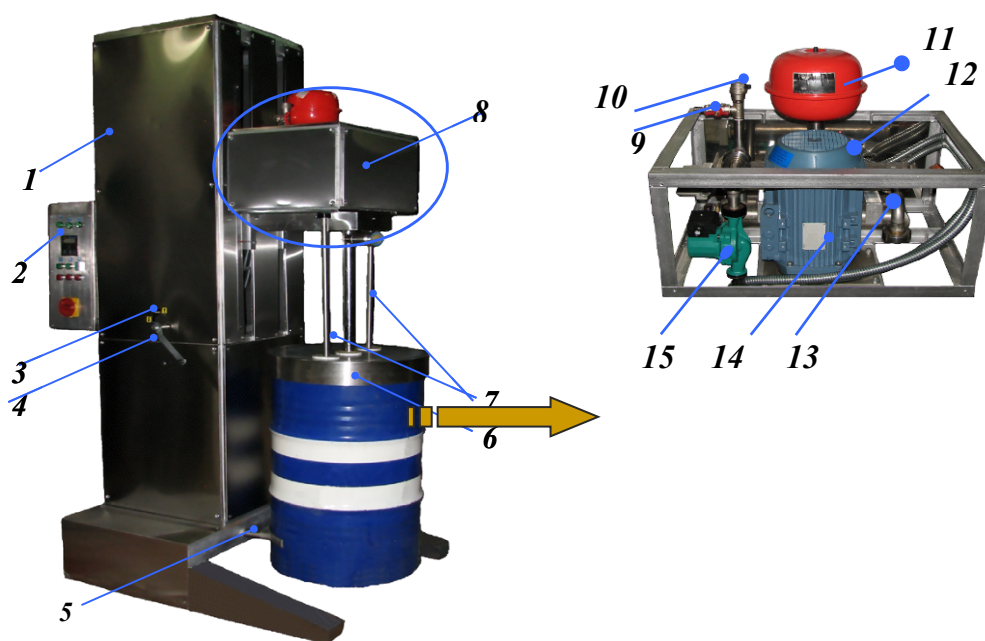


Рис. 5.5. Установка “Термобат-М”:

- 1 – корпус з вантажопідйомним механізмом; 2 – шафа електроуправління;
 3 – перемикач вантажопідйомного механізму; 4 – ручка лебідки; 5 – упор;
 6 – термоконтактний 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 – електрокотел; 14 – гвинтовий насос; 15 – циркуляційний насос.

Установка для плавлення речовин “ТЕРМОБАТ-М” складається з наступних вузлів (рис. 5.5): корпус 1 з вантажопідйомним механізмом і упором 5 для центрування бочки з продуктом; шафа електрокерування 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.

Шафа електрокерування (рис. 5.6) 2 містить пускорегулюючу апаратуру, цифровий вимірювальний прилад типу ТРЦ 02 Універсал з дисплеєм цифрової індикації, кнопки управління. Це обладнання призначено для включення і виключення електронагрівача, циркуляційного і продуктового насосів, захисту електродвигунів установки і підтримки заданих температур нагрівального апарату.

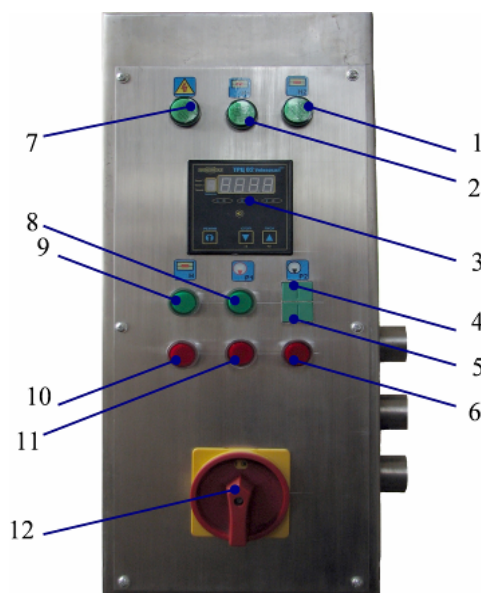


Рис. 5.6. Шафа електрокерування установки:

1 – нагрівач I ступінь; 2 – нагрівач II ступінь; 3 – регулятор температури; 4 – кнопка пуску продуктового насоса; 5 – кнопка реверсу продуктового насоса; 6 – кнопка зупинки продуктового насоса; 7 – мережа; 8 – кнопка пуску циркуляційного насоса; 9 – кнопка пуску нагрівача; 10 – кнопка зупинки нагрівача; 11 – кнопка зупинки циркуляційного насоса; 12 – головний вимикач.

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 речовина 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. 5.5) 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 переміщатися 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. (рис. 5.7).

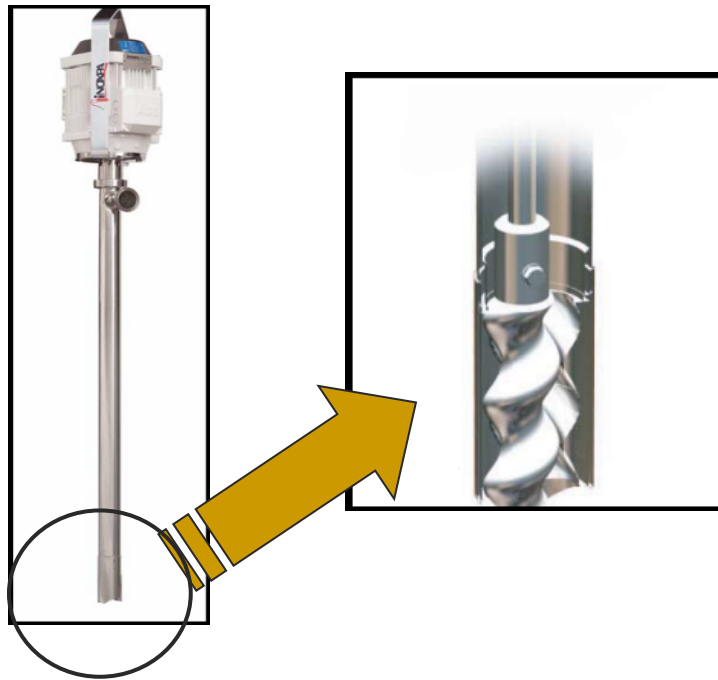



Рис. 5.7. Гвинтовий насос KIBER RVB-25


Принцип роботи на установці.

Через штуцер 9 (рис. 5.5) зробіть заповнення нагрівального апарату 8 теплоносієм, контролюючи через інший штуцер його перелив. Усуньте, при необхідності, просочування теплоносія через роз'ємні з'єднання шляхом затягування накидних гайок.


Підключіть до установки електроживлення. Короткочасним включенням перевірте правильність напрямку обертання продуктового насоса 14.

Пуск установки “ТЕРМОБАТ-М” проводиться у такій послідовності:

- підвезення на вантажопідйомному візку типу “Рокла” європіддону з встановленою на ньому ємністю з продуктом, який підлягає плавленню;
- підймання нагрівального апарату, обертаючи ручку лебідки за годинниковою стрілкою, при цьому перемикач підйому/опускання знаходиться в положенні “підйом” ;
- встановлення ємності в упорі для центрування (рис.5.5, поз. 5) при піднятому нагрівальному апараті;

- піднімаючи кришку ємності, встановлення на ємність кришки, що входить до складу електронагрівального апарату;
- забезпечення можливості опускання нагрівального апарату на задану висоту, для чого необхідно опустити нижню каретку обертанням ручки лебідки проти годинникової стрілки (перемикач підйому/опускання знаходиться в положенні “опускання” );
- увімкнення головного вимикача установки;
- на шафі електрокерування встановлення необхідної температури теплоносія (регулятор температури ТРЦ 02 Універсал);
- увімкнення циркуляційного насосу;
- увімкнення нагріву нагрівального апарату;
- для відбору розплаву увімкнення продуктового насосу;
- для припинити відбору розплаву продуктивний насос необхідно вимкнути;
- короткочасно включення реверсу продуктового насосу дозволяє звільнити труби від продукту.

По закінченні роботи провести зупинку в такій послідовності:

- вимкнення нагрів електронагрівального апарату;
- вимкнення головного вимикача установки;
- обертанням ручки лебідки за годинниковою стрілкою, підіймається нагрівальний апарат (перемикач підйому/опускання у положенні “підйом” ).

Результати досліджень термоконтного нагрівання та плавлення на промисловому зразку в Інституті технічної теплофізики НАНУ представлено на рис. 5.8 [104].

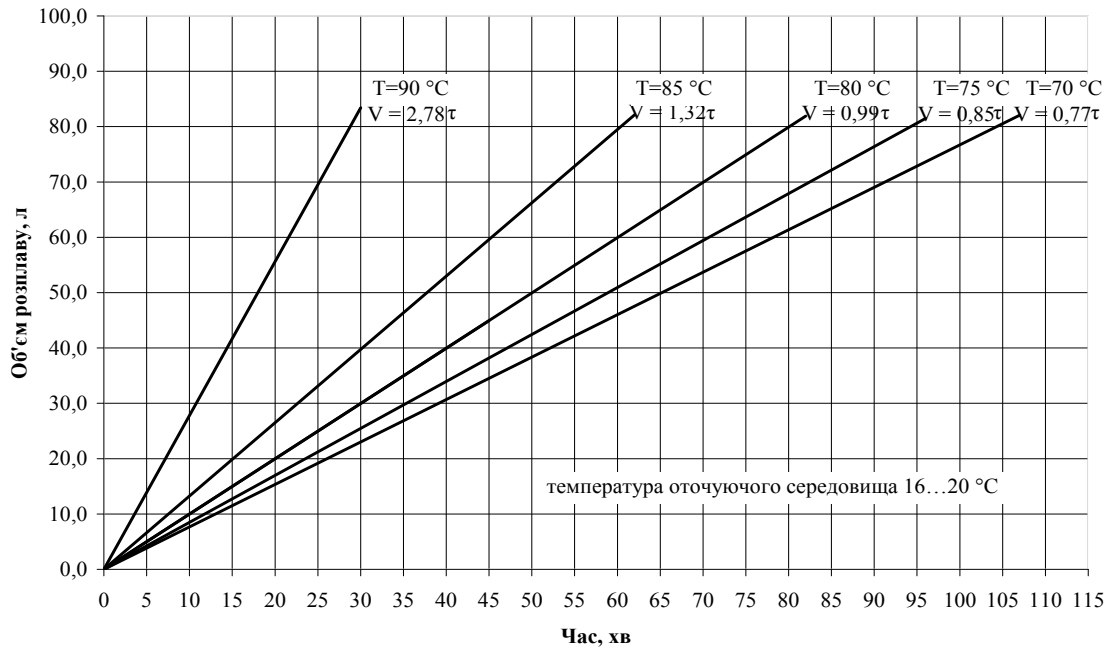
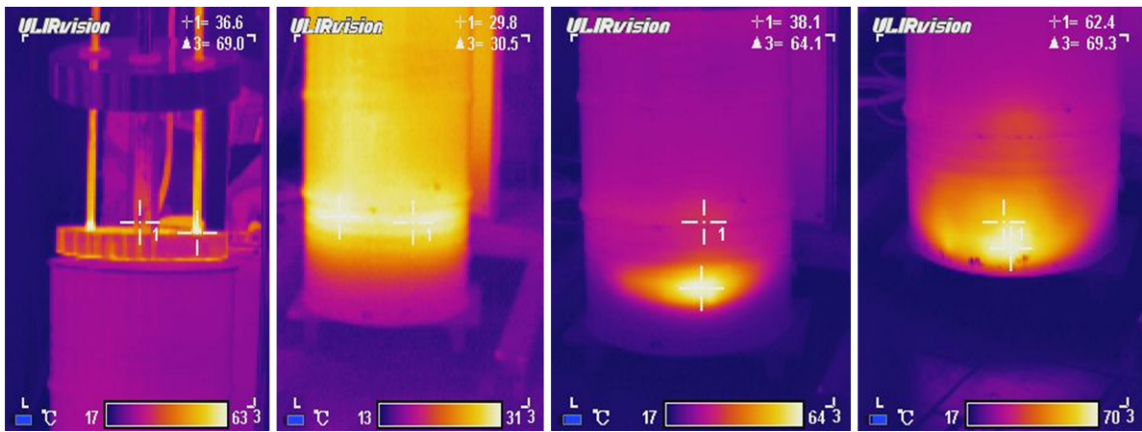


Рис. 5.8. Залежність об'єму розплаву від температури нагрівача

Дослідження нагрівання та плавлення ємності вазеліну 200 л при температурі нагрівача 70...90 °C та температурі оточуючого середовища 16...20 °C. На графіку видно, що при температурі нагрівача 70...80 °C процес плавлення є довготривалим, а інтенсифікувати процесу можливо при 85...90 °C. Враховуючи ці дослідження, випробовування установки при впровадженні на території замовника проводились при температурі 90 °C.

При дослідженнях з використанням тепловізора марки Ti-160 вдалося простежити рух нагрівача по довжині ємності, а також розподілення температур на поверхні термоконтактного нагрівача та всередині металевих ємностей (рис. 5.9). Термограми показують рівномірний прогрів термоконтактного нагрівача (рис. 5.9, а) та всього об'єму розплаву при його русі до низу ємності і плавлення основи (рис. 5.9, б-г). Завдяки низькому коефіцієнту теплопровідності основ вона знаходиться у початковому в'язкому стані, а нагрівається та плавиться при контакті з нагрівачем (рис. 5.9, в). Вкінці процесу (рис. 5.9, г) спостерігаються конвективні потоки, що сприяє підтриманню температури розплаву на заданому рівні.



а б в г
Рис. 5.9. Термограми плавлення вазеліну в ємності:

прогрів термоконтактного нагрівача (а); початок нагрівання та плавлення (б);
прогрів в процесі опускання термоконтактного нагрівача (в);
закінчення нагрівання та плавлення
(термоконтактний нагрівач опустився на дно ємності) (г).

Фахівцями ІТТФ НАНУ був проведений монтаж і пуско-налагоджувальні роботи установки “Термобат-М” на ТОВ “Тернофарм”, м. Тернопіль, проведені випробування на території фабрики (додаток В) та отриманий акт впровадження (додаток Д). Також підготовлений і переданий повний комплект документації, в який входить комплект документів, необхідний для валідації по GMP [108]:

1. Комплект технічної документації:

- Технічні вимоги
- Комплект креслень на установку
- Паспорт
- Інструкція по експлуатації
- Інструкція по технічному обслуговуванню
- Схема електрична принципова

2. Комплект документації, що необхідний для валідації по GMP:

- Протокол заводських випробувань установки № 1 від 26.06.2014 р.
- Сертифікат якості № 401524 від 28.03.2014 р.
- Сертифікат якості № JSL-JSSLG/2012-13/ED09024 від 31.03.2013 р.
- Сертифікат якості № 12213/13 від 26.11.2013 р.
- Сертифікат якості № 140127C0158 від 24.01.2014 р.
- Сертифікат якості № 140215C0040 від 13.02.2014 р.
- Сертифікат на зварні шви № 10 від 20.05.2014 р.

- Сертифікат відповідності науково-технічної продукції № 2605 від 31.05.2014 р.
- Журнал зварних швів № РЖ/10 від 20.05.2014 р.
- Посвідчення зварника № СК-3/746 від 03.04.2009 р.

Промислові 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) (рис. 5.10) [104].

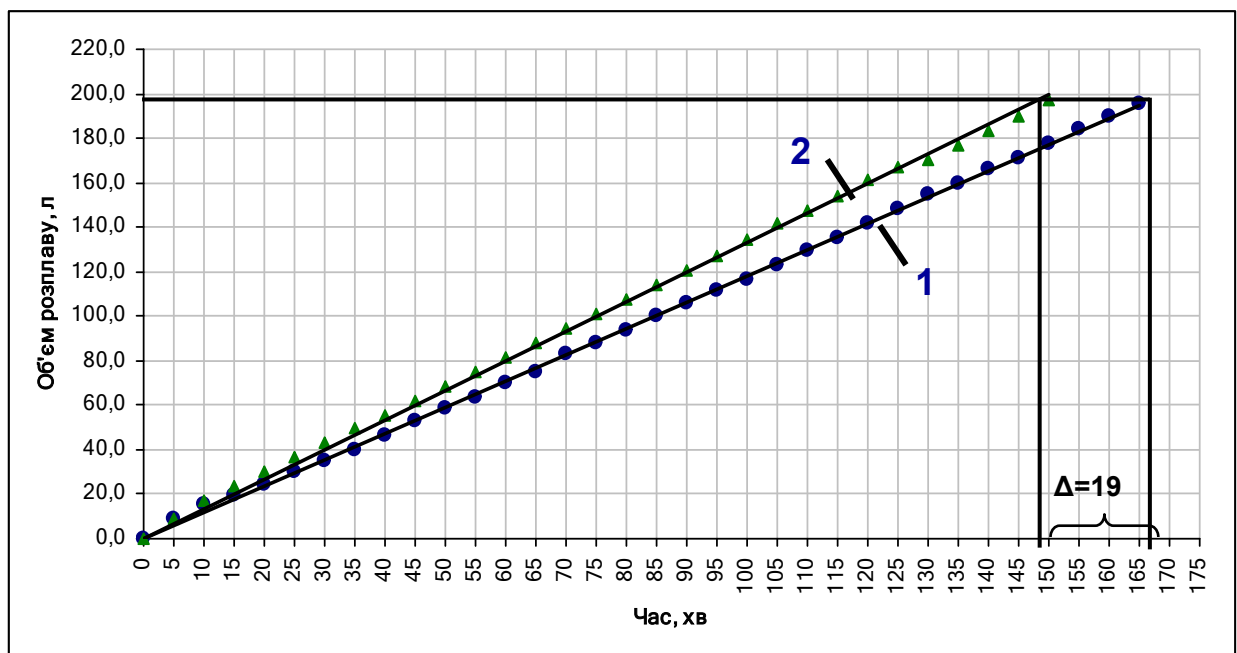


Рис. 5.10. Залежність об'єму розплаву від початкової температури вазеліну:
1 – $t_0 = 13\text{ °C}$, 2 – $t_0 = 30\text{ °C}$ при температурі нагрівача 90 °C

Випробовування установки для нагрівання та плавлення на території замовника ТОВ “Тернофарм” 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 (рис. 5.11).



а)



б)

Рис. 5.11. Модельна речовина:

а) вазелін білий фармацевтичний MERKUR 500 (Німеччина),

б) розплавлений вазелін на установці “Термобат-М”.

Порівняння енергетичних показників прискореної технології з традиційною (рис. 5.12).

За традиційною технологією речовину з ємності вивантажують у ванну з грючою оболонкою та змішувачами або розміщують у нагрівальну камеру і витримують до повного розплавлення всього об’єму речовини. Вуглеводневі суміші мають низький коефіцієнт теплопровідності і, тому, процес нагрівання та плавлення йде дуже повільно і займає 12...24 години. В таких плавильних установках за години плавлення велика кількість теплової енергії втрачається в оточуюче середовище і в розрахунку на 1 кг речовини сумарні енергозатрати можуть складати 0,25...0,37 кВт·год., що у 1,5...2 рази більше теоретичної величини теплоти плавлення. В розробленій установці тепла енергія підводиться безпосередньо до зони плавлення і рідка речовина зразу відводиться, що дозволяє не перегрівати розплав. Завдяки цьому енергозатрати складають 0,2 кВт·год., що тільки на 8 % більше значення теплоти плавлення.

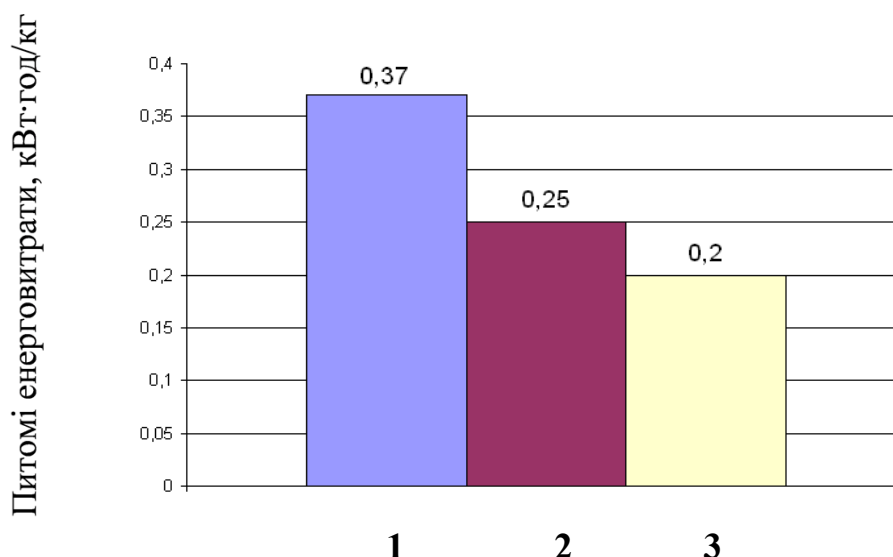


Рис. 5.12. Порівняння енергетичних показників прискореної технології з традиційною

Таблиця 5.2
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 методу нагріву за допомогою заглибного нагрівача можливо отримати необхідну кількість продукту, що плавиться, скоротити час отримання розплаву і зменшити енерговитрати, а також визначити температуру плавлення продукту для більш ефективного проведення процесів диспергації та гомогенізації без перегріву.

Для нагрівання нафтопродуктів в залізничних цистернах з низьким коефіцієнтом теплопровідності був використаний досвід ІТТФ НАНУ для розробки способу для нагрівання та плавлення в'язких систем в цистернах з використанням методів локального термоконтактного нагріву та дискретно-імпульсного введення енергії (рис. 5.13), що забезпечить підвищення ефективності роботи установки, прискорення розплавлення системи та

повний злив її з ємності, а також зменшення втрат тепла в оточуюче середовище за рахунок низького коефіцієнта теплопровідності системи [109-112].

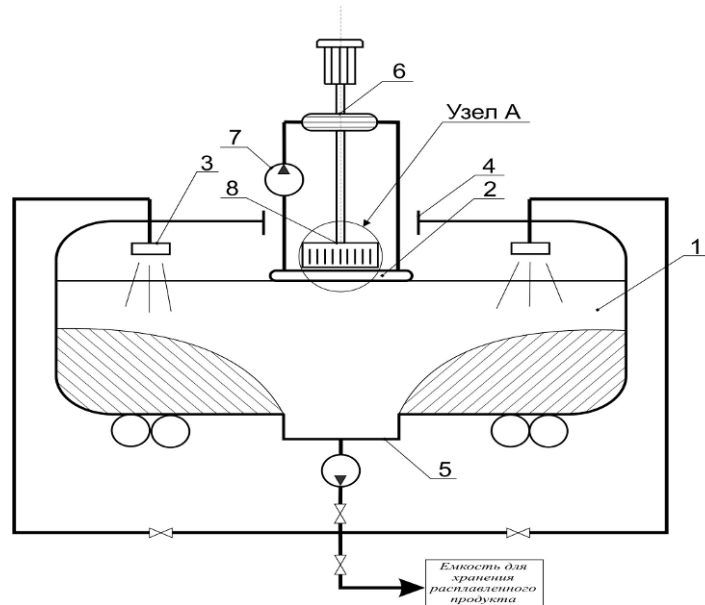


Рис. 5.13. Установка для розігрівання та плавлення в'язких систем:

1 – ємність з речовиною; 2 – нагрівач; 3 – форсунки;

4 – завантажувальний люк; 5 – зливний отвір; 6 – теплообмінник;

7 – циркуляційний насос; 8 – заглибний диспергатор.

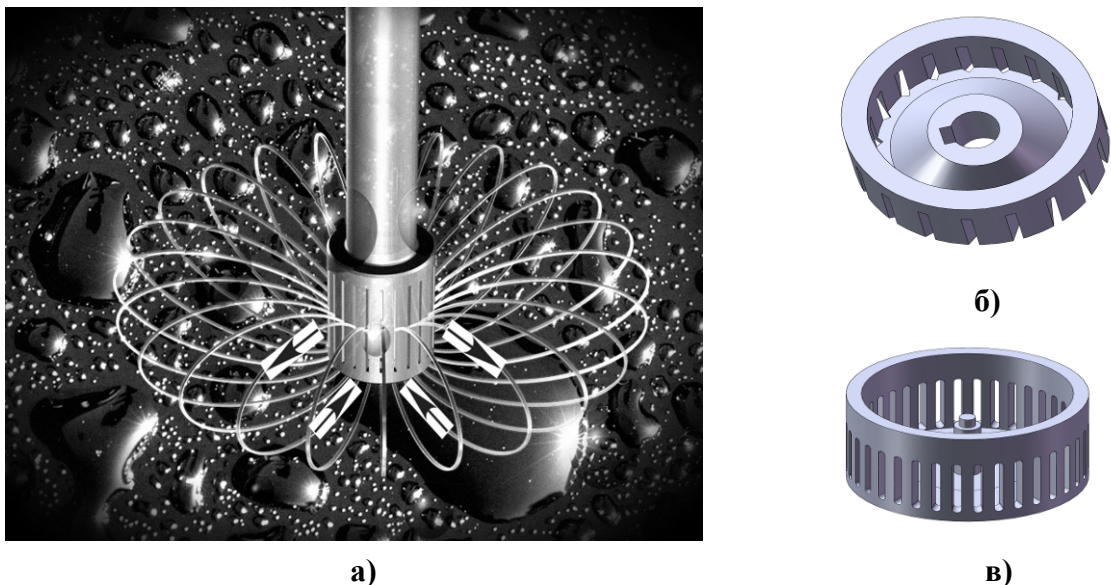


Рис. 5.14. Вузол А (а), ротор (б) та статор (в) диспергатора

Установка для розігріву та плавлення в'язких систем (рис. 5.13) містить горизонтальну циліндричну ємність з в'язкою системою 1, систему нагрівання 2, яка включає нагрівач з циркулюючим в середині теплоносієм,

теплообмінник 6, циркуляційний насос 7, систему трубопроводів з арматурою, форсунки 3, які розташовані у верхній частині ємності, завантажувальний люк 4 та зливний отвір 5. Також над дисковим нагрівачем додатково розташовується заглибний диспергатор 8, до складу якого входить циліндричний ротор (рис. 5.14, б) та статор (рис. 5.14, в), а також електричний двигун. Циліндричний ротор, що закріплений на обертовому валу, має прорізи, які розташовані рівномірно по колу під кутом від 25 до 40 градусів відносно осі. Статор має від 30 до 50 прорізів шириною $\delta = 3-6$ мм та довжиною $\ell = 50-200$ мм, що розміщені рівномірно по колу паралельно осі, який виконує функцію направляючого апарата струменів розплаву у потрібному напрямку.

Через завантажувальний люк 4 в горизонтальну циліндричну ємність 1, заповнену в'язкою системою, встановлюється нагрівач 2 з циркулюючим у середині теплоносієм. Над нагрівачем розташовується заглибний диспергатор 8, який містить циліндричну пару ротор-статор з прорізами. Проходячи по системі трубопроводів, теплоносій циркуляційним насосом 7 подається в теплообмінник 6 і нагрівається. Поверхня нагрівача 2, контактуючи з в'язкою системою, розігріває і розплавляє її поступово опускаючись до низу ємності. Розплавлена нагрівачем система через нижній торець надходить до ротору диспергатора. Завдяки похилим прорізам ротора, що виконує роль насоса, система направляється у прорізи внутрішньої сторони статора. При перекритті робочою поверхнею ротора цих прорізів в диспергаторі утворюється пульсація тиску. Диспергація системи здійснюється за рахунок пульсацій тиску, механічного впливу в зазорі між ротором, що обертається та нерухомим статором та змінних гідродинамічних умов в зазорах, що призводить до додаткового нагрівання системи. Після проходження через прорізи зовнішньої сторони статора струмені розплаву розбризкуються у потрібному напрямку, розплавляючи в'язку систему у бокових частинах ємності. Частина розпавленої речовини насосом через зливний отвір 5 по трубопроводам подається на форсунки 3 для додаткового розмиву системи,

що залишилась в торцях ємності, а решта – в ємність для зберігання розплавленої системи.

Висновки до розділу 5

1. На основі проведених досліджень розроблена та виготовлена установка для нагрівання та плавлення в'язких і низькотеплопровідних субстанцій “Термобат-М”. Підготовлена вся технічна документація та кваліфікаційні документи для валідації по GMP.

2. При застосуванні термоконтактного методу нагріву за допомогою заглибного нагрівача можливо отримати необхідну кількість продукту, що плавиться, скоротити час отримання розплаву і зменшити енерговитрати.

3. Проведені випробування в ІТТФ НАНУ і заводські випробування на території ТОВ “Тернофарм” показують, що вдалося досягнути високої продуктивності установки (в залежності від температури нагріву становить 52...83 л/год.). По результатам заводських випробувань установка “Термобат-М” передана в експлуатацію на ТОВ “Тернофарм” в м. Тернопіль (акт впровадження від 9 липня 2014 року).

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 дисковий нагрівач, 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 (моделі течії розплаву в кільцевому зазорі під дією перепаду тиску і руху стінки та 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).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Герд Кутц Косметические кремы и эмульсии: состав, получение, методы испытаний // ООО “Фирма Клавель” / Изд.дом “Косметика и медицина”. Москва, 2004. 272 с.
2. Еремина И.А., Лузина Н.И., Кригер О.В. Микробиология продуктов растительного происхождения // Учебное пособие – Кемерово: КемТИПП, 2003. 87 с.
3. Чуешов В.И., Гладух Е.В., Ляпунова О.А., Сайко И.В., Сичкарь А.А., Рубан Е.А., Крутских Т.В. Промышленная технология лекарств: электронный учеб. [Электронный ресурс]: [Веб сайт] – Електронні дані. – Харьков, 2010. – Режим доступа: <http://ztl.pp.ua/html/medication/index.html>.
4. Реактор объемом 125 л. для косметической промышленности [Электронный ресурс]: [Веб сайт] – Електронні дані. – Промвит™ (НПК Промфарм), 2008-2020 – Режим доступа: <https://promvit.com.ua/reaktor-obemom-125-l-kosmeticheskaya-promyshlen-nost/>.
5. Плавитель жира объемом 50 л из стали AISI 304 [Электронный ресурс]: [Веб сайт] – Електронні дані. – Промвит™ (НПК Промфарм), 2008-2020 – Режим доступа: <https://promvit.com.ua/plavitel-obemom-50-l/>.
6. Нагрев бочек и контейнеров [Электронный ресурс]: [Веб сайт] – Електронні дані. – ПромНагрев, 2000-2021 – Режим доступа: <https://www.promnagrev.ru/nagrev-bochek-i-konteynerov/>.
7. Сайт корпорации “BRISKHEAT” [Электронный ресурс]: [Веб сайт] – Електронні дані. – BriskHeat, 2021. – Режим доступа: <http://www.briskheat.com/>.
8. 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.

9. Створення та впровадження в промисловість нових високоефективних технологій та устаткування для виробництва фармацевтичних препаратів на основі енергозберігаючих принципів / Грабов Л.М., Мерщій В.І., Павлович О.М., Фіалко Н.М. та ін. – К.: Інститут технічної теплофізики НАН України, 2000. Т. 2, Ч. 1. С. 98-122. (Робота на здобуття державної премії України в галузі науки і техніки).

10. Fabtech Pharmaceutical Machines [Електронний ресурс]: [Веб сайт] – Електронні дані. – Fabtech Technologies International Limited. – Режим доступу: <https://www.fabtech-technologies.com/fabtech-pharmaceuticalmachines.html>.

11. Нагревательные камеры для бочек [Електронний ресурс]: [Веб сайт] – Електронні дані. – Компанія “Арфитек”, 2020. – Режим доступу: <http://www.arfitek.ru/shop/264/Nagrevatelnye-kamery-dlya-bochek>.

12. DENIOS Thermotechnology [Електронний ресурс]: [Веб сайт] – Електронні дані. – DENIOS onlineshop – Режим доступу: <https://www.denios.co.uk/storage-process-technology/thermotechnology/>.

13. The 'Sahara Hot Box Heater'. Drum Heating by Benko Products [Електронний ресурс]: [Веб сайт] – Електронні дані. – Benko Products Inc, 1983-2021. – Режим доступу: <https://benkoproducts.com/products/drum-heaters-drum-ovens/>.

14. 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. вип. 41. Т. 2. С. 50-55.

15. Жиротопки (плавители масла, жиру) [Електронний ресурс]: [Веб сайт] – Електронні дані. – Агромаш, 2007. – Режим доступу: http://www.agromash.ru/0811_jirot_vit.htm.

16. Apparatus for melting fat with steam heating [Електронний ресурс]: [Веб сайт] – Електронні дані. – “Shtolverk”, 2015. – Режим доступу:

<http://shtolverk.com/tehnologicheskoe-oborudovanie/ziroplaviteli/jiroplavitel-kruglii-s-parovim-nagrevom.html>.

17. Fat melting systems and fat oil station [Электронный ресурс]: [Веб сайт] – Електронні дані. – “Kasag Swiss AG”, 2021. – Режим доступу: <http://shtolverk.com/tehnologicheskoe-oborudovanie/ziroplaviteli/jiroplavitel-kruglii-s-parovim-nagrevom.html>.

18. Фишман К.Е., Хрузин Н.А. Производство капронового шелка. М: Госхимиздат, 1961. 200 с.

19. Тихонова А.Г., Хаджинов И.В. Основные направления и возможности реализации транзитного потенциала Украины. Вісник студентського наукового товариства ДонНУ імені Василя Стуса, 2013. Т. 2, № 5. С. 286-290. Режим доступу: <https://jvestnik-sss.donnu.edu.ua/article/view/1327>.

20. Киселев В.В. Транзитный потенциал Украины: проблемы и перспективы [Электронный ресурс]. Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, 2009. № 851. Сер.: Економіка. 261 с. Режим доступу: <http://ekhnuir.univer.kharkov.ua/handle/123456789/4472>.

21. Ж/д перевозка нефтепродуктов и природного газа [Электронный ресурс]: [Веб сайт] – Електронні дані. – ООО “ТЭК “МГ-Транс”, 2012. – Режим доступу: <http://mg-trans.com.ua/perevozka-nefteprodyctov/>.

22. Вагон-цистерна для нефтепродуктов. Модель: 15-956. [Электронный ресурс]: [Веб сайт] – Електронні дані. – ПАО “СВЗ”, 2011. – Режим доступу: <http://www.stakhanovvz.com/view.php?id=22>.

23. Адамов В.А. Сжигание мазута в топках котлов. Л.: Недра, 1989. 304 с.: ил.

24. Грабов Л.Н., Посулько Д.В., Степанова О.Е. Методы разогрева тяжелых нефтепродуктов при транспортировке в железнодорожных цистернах. Энергетика та електрифікація. 2013. № 5. С. 2-6.

25. Утилизация подтоварных вод [Электронный ресурс]: [Веб сайт] – Электронні дані. – НПП “ЭкоЭнергоМаш”, 2006-2021. – Режим доступа: <http://www.eemkzn.ru/articles/article11-utilizatsiya-podtovarnyh-vod>.

26. Оборудование разогрева мазута и битума [Электронный ресурс]: [Веб сайт] – Электронні дані. – ОКБ Энергия, 2014-2019. – Режим доступа: <http://kben.ru/perevalka-nefteproduktov/>.

27. Устройства разогрева нефтепродуктов УРВС [Электронный ресурс]: [Веб сайт] – Электронні дані. – “КВАРК ПромЭнергоСистемы”, 1994-2020. – Режим доступа: <https://kwark.ru/ustrojstva-razogreva-nefteproduktov>.

28. Установка для выгрузки из железнодорожной цистерны высоковязкого мазута с твердым остатком: пат. № 48964 Россия: МПК⁷ В 67 D 5/04, В 65 G 69/20. № 2005116214/22; заявл. 20.05.05; опубл. 10.11.05.

29. Слив мазута, нефти и других особо вязких нефтепродуктов из железнодорожных цистерн – установка УНСМ-15 [Электронный ресурс]: [Веб сайт] – Электронні дані. – ЗАО “ЭКСПО”, 1998-2015. – Режим доступа: <http://expo.chinese-company.ru/oborudovaniye/neftenalivnoye+zheleznodorozhnykh+estakad/sliv+vyazkikh+nefteproduktov.html>.

30. Матвеев С. УНСМ-15 производства компании “ЭКСПО” – решение проблем по сливу вязких нефтепродуктов из железнодорожных цистерн. Информационно-аналитический журнал “Топливный рынок”. Нефть. Газ, сентябрь-октябрь 2010. Режим доступа: <http://www.top-r.ru/journal/19919.html>.

31. Грабов Л.Н., Мерщій В.И., Ващенко В.Н., Писаренко Т.В. Оптимизация процесса термоконтактного плавления материалов. Промышленная теплотехника. 2000. Т. 22, № 1. С. 94-99.

32. Грабов Л.М., Мерщій В.И., Грабова Т.Л., Посунько Д.В. Нове обладнання для теплової обробки харчових продуктів. Харчова і переробна промисловість. 08-09/2005. С. 24-25.

33. 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.
34. Спосіб плавлення речовини та пристрій для його здійснення: пат. № 31435 Україна: МПК7 В 01 J 6/00. № 98094668; заявл. 01.09.98; опубл. 17.12.01. Бюл. № 11.
35. Паулик Ф., Паулик Й., Эрдеи Л. Дериватограф системы. Теоретические основы. Будапешт: Венгерский оптический завод, 1974. 146 с.
36. Берг Л.Г. Введение в термографию / 2-е доп. изд. Москва: Наука, 1969. 395 с.
37. Иванов В.П., Касатов Б.К., Красивина Т.Н., Розинова Е.Л. Термический анализ минералов и горных пород. Ленинград: Недра, 1974. 399 с.
38. Топор Н.Д., Огородникова Л.П., Мельчакова Л.В. Термический анализ минералов и неорганических соединений. Москва: Изд-во МГУ, 1987. 190 с.
39. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник / ред. А.А. Потехин. 3-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Химия. Ленингр. отделение, 1991. 432 с.
40. Дифференциальный сканирующий микрокалориметр ДСМ-2М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Пушкино: СКБ БП АН СССР, 1978. 40 с.
41. Хеммингер В., Хёне Г. Калориметрия: теория и практика / пер. с англ. О.Б. Саламатин. Москва: Химия, 1989. 176 с.
42. Олейник Б.Н. Точная калориметрия / 2-е изд., перераб. Москва : Изд-во стандартов, 1973. 208 с.
43. "Brookfield" digital viscometer. Model DV-E/ Operating Instructions Manual No. M/98-350-D0902. 31 p.

44. Бартон Д., Оллис У.Д. Общая органическая химия. – В 12 т. Стереохимия, углеводороды, галогеносодержащие соединения. Т. 1 / Под ред. Дж. Ф. Стоддарта. М., 1981. 736 с.
45. Ir. Hendrik A. Romp. Oil Burning. Springer-science+business media, b.v. 1st ed., 1937/ 336 p.
46. Лузгин Н.Е., Утолин В.В., Коченов В.В., Чекайкин С.В. Исследование динамической вязкости расплавленного пчелиного воска. Инновационная техника и технология. 2018. № 2. С.33-37.
47. Грабов Л.М., Грабова Т.Л., Мусаелян Л.Ю. Теплофизические свойства жидких энергетических топлив. Энергетика та електрифікація. 2010. № 2 (318). С. 16-20.
48. Atume Emmanuel Terhemen, Absolute Prediction of the Melting and Freezing Points of Saturated Hydrocarbons Using Their Molar Masses and Atume's Series, Adv. J. Chem. A, 2020, 3(2), 122-130.
49. Фридман Р.А. Технология косметики. М.: Пищевая промышленность, 1964. 487 с.
50. Муравьев И.А. Технология лекарственных форм. Учебник. М.: Медицина, 1988. 480 с.
51. Ланолин [Электронный ресурс]: [Веб сайт] – Електронні дані. – “Woolsoft”, 2016-2021. – Режим доступа: <http://woolsoft.ru/lanolin>.
52. Сировина для косметики, фармацевтики, ветеринарії [Электронный ресурс]: [Веб сайт] – Електронні дані. – ТОВ “БІОЛАЙН”, 2021. – Режим доступа: <https://biolin.ub.ua/goods/view/17690655/all/lanolin-farm/>.
53. ГОСТ 2488-79 ЦЕРЕЗИН. Технические условия. (Ceresin. Specifications). [Дата введения 1981-01-01]. М.: ИПК Издательство стандартов, 2005. 11 с.
54. Церезин. Фармацевтична енциклопедія [Электронный ресурс]: [Веб сайт] – Електронні дані. – Національний фармацевтичний університет,

2021. – Режим доступа: <https://www.pharmencyclopedia.com.ua/article/7656/cerezin>.

55. Клапчук В.М. Розвиток озокеритової галузі у Галичині XIX–XX ст. Мандрівець, 2012. № 4 (100). С. 50-59.

56. Барановський Н.Ф., Сухарев М.Ф. Озокерит. М.: ГОСТОПТЕХИЗДАТ, 1959. 206 с.

57. ГОСТ 21179-2000 Воск пчелиный. Технические условия. [Дата введения 2002-01-01]. М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. 15 с.

58. Быстрова Н.А. Перспективы замены минеральных восков на растительные в производстве косметики. Техника. Технологии. Инженерия, 2018. № 4 (10). С. 24-27. URL: <https://moluch.ru/th/8/archive/102/3588/>.

59. Захаров Н.М., Бурмистров Л.С., Белобородова А.И. Разработка способа получения гранулированного полиэтиленового воска. Электронный научный журнал “Нефтегазовое дело”, 2012. № 5. С. 537-546.

60. Dimethyl Sulfoxide (DMSO) Health and Safety Information. Gaylord Chemical Company, L.L.C. Your Global Leader For DMSO Solutions, Oct 2007. Bulletin № 106. 15 с.

61. Диметилсульфоксид (ДМСО). Физические свойства. Gaylord Chemical Company, L.L.C. Your Global Leader For DMSO Solutions, Oct 2007. Bulletin № 101. 16 с.

62. Жири та олії [Електронний ресурс]: [Веб сайт] – Електронні дані. – Інформаційний портал про харчовому і кондитерському виробництві, 2021. – Режим доступа: <https://uk.baker-group.net/raw-materials-and-semi-finished-products/raw-materials-and-ingredients/fats-and-oils.html>.

63. ГОСТ 31757-2012 Масла растительные, жиры животные и продукты их переработки. Определение содержания твердого жира методом импульсного ядерно-магнитного резонанса. [Дата введения 2013-07-01]. М.: Стандартиформ, 2014. 15 с.

64. Товбин И.М., Меламуд Н.Л., Сергеев А.Г. Гидрогенизация жиров. – М: “Легкая и пищевая пром-сть”, 1981. 296 с.

65. Растительные масла [Электронный ресурс]: [Веб сайт] – Електронні дані. – Химик, 2008-2020. – Режим доступа: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia /2/3827.html>.

66. Michael Bockisch Fats and Oils Handbook. Academic Press and AOCS Press, 1998. 848 p.

67. Р.О'Брайен. Жиры и масла. Производство, состав и свойства, применение / Р.О'Брайен: пер. с англ. 2-изд. В.Д. Широкова, Д.А. Бабейкиной, Н.С. Селивановой, Н.В. Маглы. СПб.: Профессия, 2007. 752 с.: табл., ил.

68. Кнунянц И.Л. и др. Химическая энциклопедия. М.: Изд-во "Советская энциклопедия", 1990. 671 с.: ил.

69. Геллер З.И. Мазут как топливо / З.И. Геллер. М.: Недра, 1965.

70. Herbert Curl, Jr. Kevin O'Donnell Chemical and physical properties of refined petroleum products. Marine Ecosystems Analysis Program. NOAA Technical Memorandum ERL MESA-17. Boulder, Colorado, October 1977. 31 p.

71. Ляндо И.М. Эксплуатация мазутного хозяйства котельной промышленного предприятия. М.: Энергия, 1968. 152 с.

72. Michael D. Kass, Beth L. Armstrong, Brian C. Kaul, Raynella Maggie Connatser, Samuel Lewis, James R. Keiser, Jiheon Jun, Gavin Warrington, and Dino Sulejmanovic. Stability, Combustion, and Compatibility of High-Viscosity Heavy Fuel Oil Blends with a Fast Pyrolysis Bio-Oil. *Energy & Fuels* 2020, 34, 8403-8413.

73. Elvira R. Zvereva E.R., Railya V. Khabibullina R.V., Gulnara R.A., Makarova A.O. Influence of Nanoadditives on Rheological Properties of Fuel Oil. International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering" 2017 (AIME 2017), January 2017. pp. 914-920.

74. Кузнецов Н.В. и др. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. М.: Энергия, 1973. 296 с. с ил.

75. ГОСТ 3582-84 Вазелин медицинский. Технические условия. (Medical vaseline. Specifications). [Дата введения 1985-07-01]. М.: ИПК Издательство стандартов, 2005. 9 с.

76. ГОСТ 13037-84 Вазелин ветеринарный. Технические условия. (Veterinary vaseline. Specifications). [Дата введения 1986-01-01]. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. 10 с.

77. ГОСТ 5774-76 Вазелин конденсаторный. Технические условия. (Condenser vaselin. Technical requirements). [Дата введения 1977-07-01]. М.: ИПК Издательство стандартов, 2005. 7 с.

78. Сеницын В.В. Пластичные смазки. Вазелин технический. Второе издание, перераб. и доп. Справочник. М.: Химия, 1984. 192 с.

79. ГОСТ 3164-78 Масло вазелиновое медицинское. Технические условия. (Medical petrolatum. Specifications). [Дата введения 1980-01-01]. М.: Стандартинформ, 2011. 12 с.

80. Пугачев И.А. Вазелин [Электронный ресурс]: [Веб сайт] – Электронні дані. – Товарный словарь в 9 томах, 1956-1961 гг. – Режим доступа: <http://tovarslovar.ru/628vazelin.html>.

81. Добрянский, А.Ф. Анализ нефтяных продуктов: практическое пособие. 3-е изд., испр., доп. Ленинград; Москва: ОНТИ НКТП СССР, 1936. 455 с.

82. Полный медицинский справочник фармацевта. М.: Эксмо, 2013. 784 с.

83. Анисимов И.Г., Бадыштова К.М., Бнатов С.А. и др. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справочник; Под ред. В.М. Школьников. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Издательский центр “Техинформ”, 1999. 596 с.: ил.

84. Uttam Ray Chaudhuri Fundamentals of Petroleum and Petrochemical Engineering. CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, 2011. 380 p.

85. James G. Speight PhD, DSc Handbook of industrial hydrocarbon processes. Gulf professional publishing is an imprint of Elsevier. First edition, 2011. 641 p.
86. ГОСТ 23683-89 Парафины нефтяные твердые. Технические условия. (Petroleum paraffin waxes. Specifications. Technical requirements). [Дата введения 1991-01-01]. М.: Стандартинформ, 2007. 31 с.
87. Озокерит [Электронный ресурс]: [Веб сайт] – Електронні дані. – Физиотерапия, 2021. – Режим доступа: https://www.fizioterapiya.info/?page_id=370.
88. McCarty R. D., Hord J., Roder H. H. Selected proproperties of hydrogen. Washington; Govern. print. off. 1983. 523 p.
89. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины: Справочник; Под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с. ISBN 5-283-04013-5.
90. Уббелоде А. Плавление и кристаллическая структура; пер. с англ. М.: Мир, 1969. 419 с.
91. Грабов Л.М., Базеев Р.Є., Степанова О.Є. Експериментальні дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих систем. Промышленная теплотехника, 2013. Т. 35, № 3. С. 13-21.
92. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. Пер. с англ. М.: Химия, 1984. 632 с.
93. Shapiro J., Halmos A.L., Pearson J.R.A. Melting in single screw extruders. Part 1: The mathematical model Polymer. 1976. Vol. 17, № 10. P. 905-918.
94. Геллер Б.Э., Геллер А.А., Чиртузов В.Г. Практическое руководство по физикохимии волокнообразующих полимеров. Уч. пособие для вузов. М.: Химия, 1996. 432 с.
95. Кузьяев И.М., Свидерский В.А., Петухов А.Д. Моделирование экструзии и экструдеров при переработке полимеров. Ч.2 Монография, Киев. НТУУ “КПИ”, 2016. 276 с.

96. Перцев И.М., Гуторов С.А., Загорий Г.В., Халеева Е.Л. Контроль качества и производство мягких лекарственных средств в свете требований Государственной фармакопеи Украины. Провизор, 2002. № 8. С. 29-31.
97. Перцев И.М., Гриценко И.С., Чуешов В.И. Мази в современной фармакотерапии. Сучасні проблеми розробки складу та технології мазей, гелів, кремів та інше. Вісник фармації, 2002. 2 (30). С. 3-6.
98. Перцев И.М., Котенко А.М., Чуешов О.В., Халеева Е.Л. Монография. Х.: НФаУ, Золотые страницы, 2003. 288 с.
99. Аркуша А.А. Исследование структурно-механических свойств мазей с целью определения оптимума консистенции: автореф. дис....канд. фарм. наук: спец. 15.00.01 / А.А. Аркуша. Харьков, 1982. 23 с.
100. Тенцова А.И. Современные аспекты исследования и производства мазей / А.И. Тенцова, В.М. Грецкий. М.: Медицина, 1980. 191 с.
101. Melgardt M De Villiers A Practical Guide to Contemporary Pharmacy Practice Ointment Bases Edition: 3 Chapter: 23 Lippincott Williams & Wilkins, 2009. С. 277-290.
102. James Bennett Petrolatum/Petroleum Jelly [Электронный ресурс]: [Веб сайт] – Електронні дані. – Cosmetics and skin, 2021. – Режим доступу: <http://www.cosmeticsandskin.com/bcb/petrolatum.php>.
103. Тихонов А.И., Ярных Т.Г. Технология лекарств: Учеб. для фармац. вузов и фак.: Пер. с укр. / Под ред. А.И. Тихонова. Х.: Изд-во НФАУ; Золотые страницы, 2002. 704 с.: 139 ил.
104. 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>.

105. Шматок О.І., Степанова О.Є., Сильнягіна Н.Б. Инновационная технология и оборудование для получения суппозиторий. Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій, 2019. випуск 1, Т. 83. С. 57-61.

106. 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).

107. 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.

108. Надлежащая производственная практика лекарственных средств. Good manufacturing practice for medicinal products / Под ред. Н.А. Ляпунова, В.А. Загория, В.П. Георгиевского, Е.П. Безуглой; Межгос. комис. по стандарт. регистрации и контролю качества лекарств. К.: МОРИОН, 1999. 896 с.

109. 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.

110. Грабов Л.Н., Степанова О.Е. Проблема нагревания нефтепродуктов в железнодорожных цистернах. Промышленная теплотехника, 2011. Т. 33, № 7. С. 69-70.

111. 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.

112. 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.

ДОДАТКИ

Список публікацій здобувачки

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 суппозиториев. 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. Экспериментальные исследования процессов нагревания та плавления углеводневых систем. Промышленная теплотехника. 2013. Т. 35, № 3. С. 13-21. [фахове видання]. *(Авторкою проведено експериментальні дослідження процесів нагрівання та плавлення углеводневых 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 углеводневых 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. Енергетика 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 термоконтактного нагревания и дискретно-импульсного ввода энергии в технологии получения суппозиторий. 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 конференція 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 термоконтактному 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 термоконтактного 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, StepanovaOlesya, 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., Базеев Р.Є. Энергоефективный 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 суппозиторииев. Збірник наукових праць VII міжнародної науково-практичної конференції “Інноваційні енерготехнології”, 9-13 вересня 2019. С. 54-59.

21. Недбайло О.М., Степанова О.Є. Энергоефективный способ та установка для підготовки основи при одержанні супозиторіїв. IX Міжнародна науково-технічна конференція “Наукові проблеми харчових технологій та

промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції” 10-11 листопада 2020 р., м. Київ. К.: НУХТ, 2020 р. С. 39-40.
<https://drive.google.com/file/d/17Q3vnjSIpLXnF8jvF1Cf7dsZoN3fi5B0/view>.

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”, 11-11 грудня 2020 р., м. Київ. 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.

Відомості про апробацію результатів дисертації

Основні положення роботи доповідались на конференціях різного рівня:

1. VII Міжнародній конференції “Проблеми промислової теплотехніки”, (м. Київ, 23-27 травня 2011 р., форма участі – усна доповідь, публікація);

2. VIII Міжнародній конференції “Проблеми промислової теплотехніки”, (м. Київ, 8-11 жовтня 2013 р., форма участі – усна доповідь, публікація);

3. IX Міжнародній конференції “Проблеми промислової теплотехніки”, (м. Київ, 20-23 жовтня 2015 р., форма участі – усна доповідь);

4. XIV Міжнародній науковій конференції “Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв” (м. Одеса, 3-7 вересня 2012 р., форма участі – заочна, публікація);

5. XV Міжнародній науковій конференції “Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв” (м. Одеса, 8-12 вересня 2014 р., форма участі – заочна, публікація);

6. XVII Міжнародній науковій конференції “Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв” (м. Одеса, 3-8 вересня 2018 р., форма участі – заочна, публікація);

7. III Міжнародному медичному конгресі “Впровадження сучасних досягнень медичної науки в практику охорони здоров'я України” на круглому столі “Актуальні питання впровадження і застосування наукових розробок установ НАН України в сфері медицини” (м. Київ, 14-16 жовтня 2014 р., форма участі – усна доповідь);

8. Міжнародній науково-практичній конференції “Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової

промисловості” (м. Київ, 8-10 листопада 2016 р., форма участі – заочна, публікація);

9. IX Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених “Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання” (м. Київ, 18-19 квітня 2016 р., форма участі – заочна, публікація);

10. International Scientific Conference “Chemical Technology and Engineering” (м. Львів, 23-30 червня 2017 р., форма участі – стендова доповідь, публікація);

11. 2nd International Scientific Conference “Chemical Technology and Engineering” (м. Львів, 24-28 червня 2019 р., форма участі – заочна, публікація);

12. Регіональній науково-практичній конференції “Енергія. Бізнес. Комфорт.” (м. Одеса, 26 грудня 2018 р., форма участі – заочна, публікація);

13. VII Міжнародній науково-практичній конференції “Інноваційні енерготехнології” (м. Одеса, 9-13 вересня 2019 р., форма участі – заочна, публікація);

14. IX Міжнародній науково-практичній конференції “Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції” (м. Київ НУХТ, 10-11 листопада 2020 р., форма участі – заочна, публікація);

15. Міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми сучасної теплоенергетики”, присвяченої 100-річчю професора Драганова Б.Х. (м. Київ, 10-11 грудня 2020 р., форма участі – заочна, публікація).

Патенти





ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **69860** (13) **U**
(51) МПК (2012.01)
B01J 6/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2011 14338</p> <p>(22) Дата подання заявки: 05.12.2011</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.05.2012</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.05.2012, Бюл.№ 9</p>	<p>(72) Винахідник(и): Долінський Анатолій Андрійович (UA), Грабов Леонід Миколайович (UA), Степанова Олеся Євгенівна (UA)</p> <p>(73) Власник(и): ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ, вул. Булаховського, 2, м. Київ-146, 03146 (UA)</p>
---	--

(54) УСТАНОВКА ДЛЯ РОЗІГРІВУ ТА ПЛАВЛЕННЯ В'ЯЗКИХ РЕЧОВИН

(57) Реферат:

Установка для розігріву та плавлення в'язких речовин містить ємність з речовиною, систему нагрівання, теплообмінник, циркуляційний насос, систему трубопроводів з арматурою. Верхня частина ємності має завантажувальний люк, а в нижній розташований зливний отвір.

UA 69860 U





ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **77487** (13) **U**

(51) МПК (2013.01)

B01J 6/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2012 11634</p> <p>(22) Дата подання заявки: 08.10.2012</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 11.02.2013</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 11.02.2013, Бюл.№ 3</p>	<p>(72) Винахідник(и): Долінський Анатолій Андрійович (UA), Грабов Леонід Миколайович (UA), Посунько Дмитро Вікторович (UA), Степанова Олеся Євгенівна (UA)</p> <p>(73) Власник(и): ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ, вул. Булаховського, 2, м. Київ-146, 03146 (UA)</p>
---	---

(54) УСТАНОВКА ДЛЯ РОЗІГРІВУ ТА ПЛАВЛЕННЯ В'ЯЗКИХ СИСТЕМ

(57) Реферат:

Установка для розігріву та плавлення в'язких систем містить горизонтальну циліндричну ємність з в'язкою системою, систему нагрівання, яка включає нагрівач з циркулюючим у середині теплоносієм, теплообмінник, циркуляційний насос, систему трубопроводів з арматурою, форсунки, які розташовані у верхній частині ємності, завантажувальний люк та зливний отвір. У горизонтальній циліндричній ємності над дисковим нагрівачем розташований заглиблений диспергатор, до складу якого входять коаксіально встановлені циліндричні ротор, закріплений на обертовому валу з розміщеними рівномірно по колу прорізами, які розташовані під кутом від 25 до 40 градусів відносно осі та статор, що має від 30 до 50 прорізів шириною $\delta = 3 - 6$ мм та довжиною $\delta = 3 - 6$ мм, які розміщені рівномірно по колу паралельно осі.

UA 77487 U

Протоколи заводських випробувань

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ТОВ «Тернофарм»



В.М. Лихород



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ІТТФ НАН України



А.А. Долінський



ПРОТОКОЛ № 1

заводських випробувань установки для нагрівання та плавлення
в'язких і низькотеплопровідних субстанцій «Термобат-М»,
заводський номер 29052014

м. Київ

«26» червня 2014 р.

1. **Назва виробу:** Установка призначена для нагрівання та плавлення в'язких і низькотеплопровідних субстанцій (вазеліну, ланоліну, парафіну і ін.) у фармацевтичній промисловості.
2. **Мета випробувань:** Визначення працездатності установки «Термобат-М».
3. **Час і місце проведення випробувань:** 26 червня 2014 р. в приміщенні ІТТФ НАН України, каркасний корпус 7/3, 03164, м. Київ, вул. академіка Булаховського 2.
4. **Склад учасників випробувань:**
 - 4.1. *Від лабораторії ГТП ІТТФ НАН України:*

Зав. лабораторією ГТП	Л.М. Грабов
Головний конструктор проекту	В.В. Ковальов
Старший наук. співробітник	Д.В. Посунько
Науковий співробітник	О.Є. Степанова
 - 4.2. *Від ТОВ НВП «Тетра»:*

Директор	М.Л. Іванов
Бригадир слюсарів	О.Я. Степашко

5. *Результати випробувань:*

Результати заводських випробувань наведені у протоколі заводських випробувань № 1.

6. *Висновки та пропозиції:*

6.1. Установа для нагрівання та плавлення в'язких і низькотеплопровідних субстанцій «Термобат-М», що розроблена і виготовлена ІТТФ НАН України згідно з договором № 3259 від 18.10.2013 р. і технічним вимогам ТБ 00.00.000 ТВ, відповідає комплекту конструкторської документації та визнана працездатною.

6.2. Установа витримала заводські випробування і може бути використана для нагрівання та плавлення в'язких і низькотеплопровідних субстанцій (вазеліну, ланоліну, парафіну і ін.) на ТОВ «Тернофарм».

Від лабораторії ГТП ІТТФ НАНУ:

Завідуючий лабораторією

 Л.М. Грабов

Головний конструктор проекту

 В.В. Ковальов

Старший науковий співробітник

 Д.В. Посунько

Науковий співробітник

 О.С. Степанова

Від ТОВ «Тернофарм»:

Начальник відділу впровадження
нової техніки

 С.П. Сулік

Від ТОВ НВП «Тетра»:

Директор

 М.Л. Іванов

Бригадир слюсарів

 О.Я. Степашко



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ТОВ «Тернофарм»

В.М. Лихород



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ІТТФ НАН України

А.А. Долінський

**ПРОТОКОЛ № 2**

заводських випробувань установки для нагрівання та плавлення
в'язких і низькотеплопровідних субстанцій «Термобат-М»,
заводський номер 29052014

м. Тернопіль

«9» липня 2014 р.

1. **Назва виробу:** Установка призначена для нагрівання та плавлення в'язких і низькотеплопровідних субстанцій (вазеліну, ланоліну, парафіну і ін.) у фармацевтичній промисловості.
2. **Мета випробувань:** Визначення працездатності установки «Термобат-М».
3. **Час і місце проведення випробувань:** 9 липня 2014 р. на території ТОВ «Тернофарм», м. Тернопіль, вул. Фабрична 4.
4. **Склад учасників випробувань:**
 - 4.1. *Від лабораторії ГТП ІТТФ НАН України:*

Старший науковий співробітник	О.І. Шматок
Старший наук. співробітник	Д.В. Посунько
Науковий співробітник	О.Є. Степанова
 - 4.2. *Від ТОВ «Тернофарм»:*

Начальник відділу впровадження нової техніки	С.П. Сулік
Головний інженер	О.В. Кобліанідзе
Начальник цеху виробництва ТЛФ	І.Д. Цалінський

5. Результати випробувань:

Результати заводських випробувань установки «Термобат-М», заводський номер 29052014, наведені у додатку № 1.

6. Висновки та пропозиції:

6.1. Установка для нагрівання та плавлення в'язких і низькотеплопровідних субстанцій «Термобат-М», заводський номер 29052014, витримала випробування і визнана придатною до експлуатації.

Від ІТТФ НАН України:

Старший науковий співробітник

 Д.В. Посунько

Старший науковий співробітник

 О.І. Шматок

Науковий співробітник


 О.Є. Степанова

Від ТОВ «Тернофарм»:

Начальник відділу впровадження
нової техніки

 С.П. Сулік

Головний інженер

 О.В. Кобліанідзе

Начальник цеху виробництва ТЛФ

 І.Д. Цалінський

Акт впровадження

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Директор ТОВ «Тернофарм»
 В.О. Михайлов



«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Директор ІТТФ НАН України
 А.А. Долінський



Акт промислових випробувань установки для нагрівання та плавлення
 в'язких і низькотеплопровідних субстанцій «Термобат-М»,
 заводський номер 29052014

м. Тернопіль

« 9 » липня 2014 р.

В період з 8 липня до 9 липня 2014 р. на ТОВ «Тернофарм» були проведені промислові випробування установки для нагрівання та плавлення в'язких і низькотеплопровідних субстанцій «Термобат-М», розробленої та виготовленої в ІТТФ НАН України згідно з г/д № 3259 від 18.10.2013 р. на основі результатів науково-дослідної роботи № 1.7.1.852.

Установка «Термобат-М» виготовлена згідно технічних вимог ТБМ.00.00.000 ТВ. В ній використано метод термоконтального нагріву в'язких субстанцій (патент України № 31435А та патент РФ № 2159671).

Випробування проводились разом з фахівцями ТОВ «Тернофарм» у виробничих приміщеннях ТОВ «Тернофарм». Установка для нагрівання та плавлення в'язких і низькотеплопровідних субстанцій «Термобат-М» витримала випробування.

Установку та повний комплект технічної документації за г/д № 3259 передано у промислову експлуатацію на ТОВ «Тернофарм».

Від ТОВ «Тернофарм»:

Начальник відділу впровадження
 нової техніки

С.П. Сулік С.П. Сулік

Начальник цеха

Ч.Д. Шашківський
 Головний інженер
 О.В. Кошманіда

Від ІТТФ НАН України:

Старший науковий співробітник

Д.В. Посунько Д.В. Посунько

Старший науковий співробітник

О.І. Шматок О.І. Шматок

Науковий співробітник

О.Є. Степанова О.Є. Степанова