

УДК 536.242; 536.4

## **INTENSIFICATION OF HEAT EXCHANGE PROCESSES DURING THERMAL CONTACT HEATING AND MELTING OF FATS AND OILS**

**A. Nedbailo**

*National University of Food Technologies*

**O. Stepanova, N. Silnyagina**

*Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine*

---

**Key words:**

*Hydrocarbon mixtures*

*Heating*

*Melting*

*Intensification*

*Heat exchange*

*Thermal contact method*

*Phase transition*

---

**Article history:**

Received 22.09.2021

Received in revised form

06.10.2021

Accepted 18.10.2021

---

**Corresponding author:**

O. Stepanova

**E-mail:**

super-olesya2807@

ukr.net

---

**ABSTRACT**

Theoretical and experimental studies of the processes of heating and melting of hydrocarbon mixtures, such as solid fats, oils, vaseline, lanolin, etc. were conducted using the local thermal contact method. The traditional and widely used method of melting hydrocarbon mixtures is their heating through the heat transfer surface. The influence of regime parameters (heater temperature, pressure on the surface of the substance, initial temperature of the hydrocarbon mixture) on the speed of the heating and melting processes to determine the optimal parameters was investigated. This method means supplying heat directly to the front of the phase transformation by means of a disk heater. An experimental stand was created and a research method was developed, which allowed to obtain kinetic regularities of the heating and melting processes. 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.

Based on the obtained data, an innovative energy-efficient installation for heating and melting of hydrocarbon mixtures was created. The plant combines several technological operations, which allows to intensify the melting process and reduce energy consumption. As a result of the conducted researches it was established that the use of the proposed method and installation allows to reduce energy consumption by 1.2...1.7 times in comparison with other methods.

---

**DOI:** 10.24263/2225-2924-2021-27-5-10

---

## ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ТЕРМОКОНТАКТНОМУ НАГРІВАННІ ТА ПЛАВЛЕННІ ЖИРІВ І ОЛІЙ

О. М. Недбайло

Національний університет харчових технологій

О. Є. Степанова, Н. Б. Сильнягіна

Інститут технічної теплофізики НАН України

У статті проведено теоретичні й експериментальні дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей, таких як тверді жири, олії, вазеліни, ланоліни тощо при застосуванні локального термоконтантного методу. Традиційним і широко застосовуваним способом плавлення вуглеводневих сумішей є їх нагрівання через поверхню теплообміну. Досліджено вплив режимних параметрів (температура нагрівача, тиск на поверхню речовини, початкова температура вуглеводневої суміші) на швидкість перебігу процесів нагрівання і плавлення для визначення оптимальних параметрів.

Спосіб полягає у підведенні теплоти безпосередньо до фронту фазового перетворення за допомогою дискового нагрівача. Створено експериментальний стенд і розроблено методіку проведення досліджень, що дало змогу отримати кінетичні закономірності перебігу процесів нагрівання та плавлення. Розроблене моделювання течії розплаву в кільцевому зазорі, що описує ламінарну течію під дією перепаду тиску і швидкістю руху стінки ємності відносно нагрівача дало змогу розрахувати середню швидкість розплаву через зазор. У 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 підставі отриманих даних створено інноваційну енергоефективну установку для нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей. В установці об'єднано декілька технологічних операцій, що дає змогу інтенсифікувати процес плавлення та зменшити витрати енергії. В результаті проведених досліджень встановлено, що використання запропонованого способу та установки дає змогу в 1,2...1,7 рази скоротити витрати енергії порівняно з іншими методами.

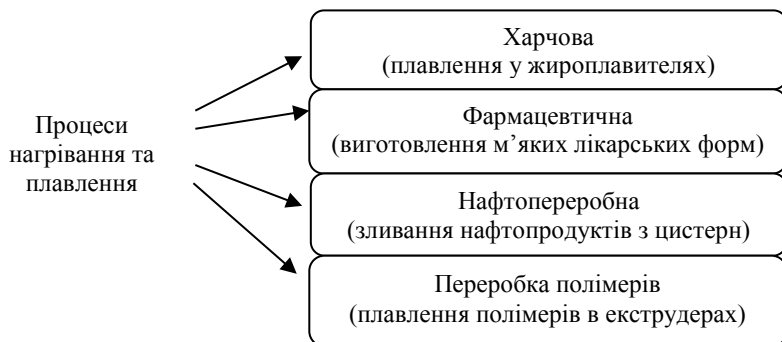
**Ключові слова:** вуглеводневі суміші, нагрівання, плавлення, інтенсифікація, теплообмін, термоконтантний спосіб, фазовий перехід.

**Постановка проблеми.** Теплообмінні процеси мають велике значення для здійснення технологічних операцій у багатьох галузях, зокрема у фармацевтичній, харчовій і нафтопереробній промисловостях (рис. 1). Особливо велике значення проблема інтенсифікації переносу тепла має для створення високоенергоефективного обладнання.

Процеси нагрівання та плавлення є трудомісткими й енергозатратними, тому що необхідно перевести речовини або суміші з твердого стану до достатньо

плинного, щоб забезпечити їх подальше транспортування до наступних стадій виробництва.

Традиційно на підприємствах для нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей використовують реактори з різними конструкціями мішалок, ванни із змійовиками, електротканні нагрівачі, нагрівальні камери тощо.



**Рис. 1. Галузі застосування процесів нагрівання і плавлення**

Такі методи є тривалими й 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 у котли та подальше їх вивантаження. Переважно таке обладнання закуповується за кордоном, на придбання якого витрачаються великі кошти. Враховуючи все це, розробка і впровадження вітчизняних інноваційних технологій та обладнання для здійснення процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей є актуальним завданням.

**Метою статті** є встановлення теплофізичного обґрунтування кінетичних закономірностей перебігу процесів термоконтактного нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей, інтенсифікація теплообміну і розробка енергозберігаючої технології та обладнання.

**Матеріали і методи.** Одним з найпоширеніших процесів у харчовій, фармацевтичній, переробній, хімічній та інших галузях промисловості є процес нагріву і плавлення високов'язких речовин з низьким коефіцієнтом теплопровідності, таких як жири і олії тощо. Більшість олій і жирів є термолабільними речовинами. Вони не витримують високих температур і тривалого нагрівання. Кінетика процесу нагрівання 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 кінцевого продукту. Все це обумовлює різні вимоги до процесу плавлення кожної речовини, а отже, до режиму його проведення, і вимагає розробки відповідного обладнання (Ободович, 2021).

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 спе-

цифічними вимогами, які є визначальними, — збереження початкових властивостей продукту: зовнішнього вигляду, кольору, смаку, запаху, біохімічних та харчових властивостей, збільшення терміну зберігання, забезпечення відповідних бактеріальних норм.

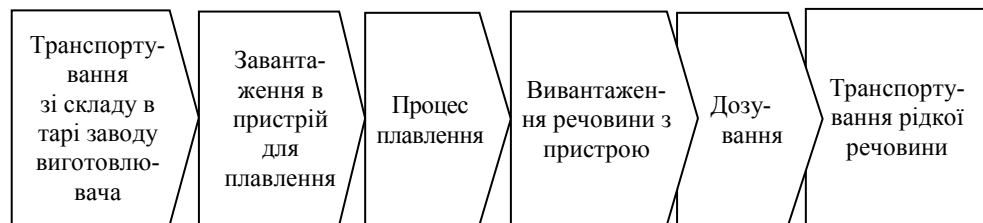
Отже, основні параметри теплового впливу на речовину, в тому числі і тривалість, не можуть бути обрані довільно, а повинні встановлюватися для кожної конкретної речовини на основі досліджень процесів тепломасообміну, які відбуваються в процесі нагрівання та плавлення.

Вуглеводні, такі як тверді жири, олія, вазелін, парафін, церезин, віск, нафтопродукти 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 (Hendrik, Rompr., 1937; Лузгин та ін., 2018; Грабов та ін., 2010). 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 (Atume Emmanuel Terhemem, 2020).

На підприємствах для нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей застосовують теплообмінні апарати періодичної дії з мішалками. Передача теплоти в цих апаратах здійснюється в нестационарному режимі з великим перепадом температур, що призводить до небажаних змін властивостей кінцевого продукту і самих речовин. При роботі на такому обладнанні неможливо домогтися рівномірного прогрівання всієї маси речовини, а отже, і якісної теплової обробки.

Традиційна технологія виготовлення жирів складається з таких стадій: підготовка основи, підготовка водно-молочної фази, введення їх в основу та отримання готової продукції.

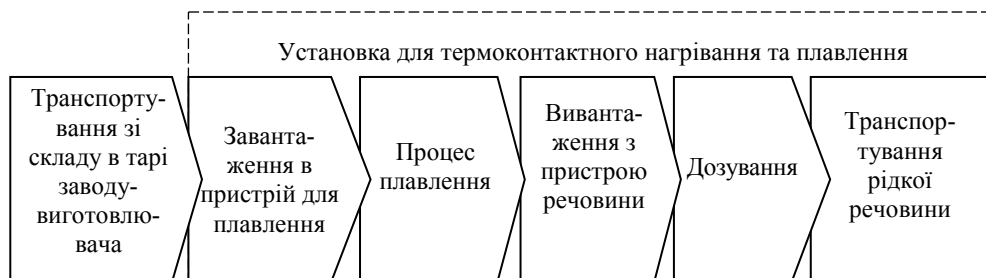
На стадії підготовки основи здійснюються процеси нагрівання та плавлення. Вона складається з таких етапів (рис. 2): транспортування зі складу в тарі заводу-виробника, завантаження в пристрій для плавлення, процес плавлення, вивантаження речовини з пристрою, дозування, транспортування рідкої речовини.



**Рис. 2. Традиційна технологічна схема нагрівання та плавлення на стадії підготовки вуглеводневої основи**

В Інституті технічної теплофізики розроблено технологію й установку прискореного нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей з низьким коефіцієнтом теплопровідності за рахунок контактного та конвективного переносу тепла,

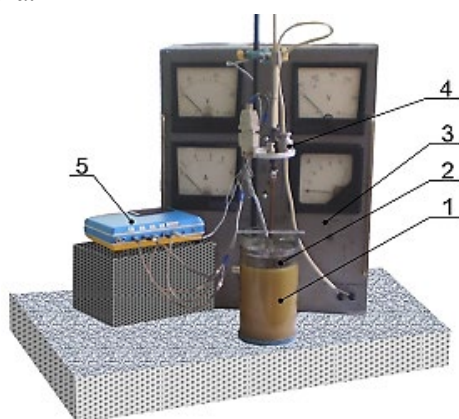
що дає змогу інтенсифікувати процес і призводить до зменшення енерговитрат завдяки поєднанню процесів завантаження, плавлення, дозування, вивантаження і транспортування розплавленої речовини в одному технологічному циклі (рис. 3).

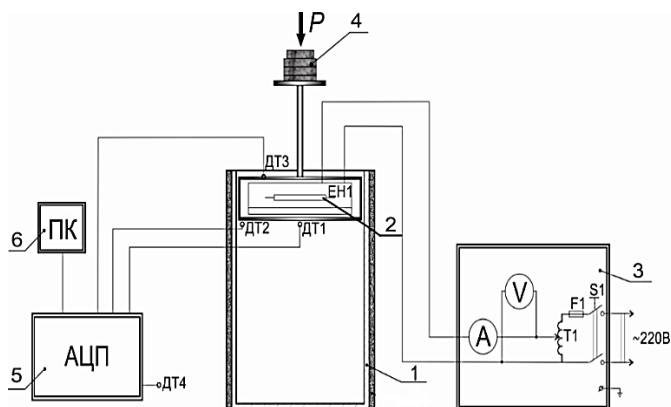


**Рис. 3. Технологічна схема прискореного нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей**

Створено експериментальний стенд (Грабов та ін., 2005; Долінський та ін., 2011) для визначення раціональної конструкції установки та оптимальних режимів її роботи (рис. 4). Стенд складається з таких елементів: ємність для досліджуваної вуглеводневої основи 1, дисковий нагрівач 2, платформа для додаткової наважки 4, пульт керування 3.

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



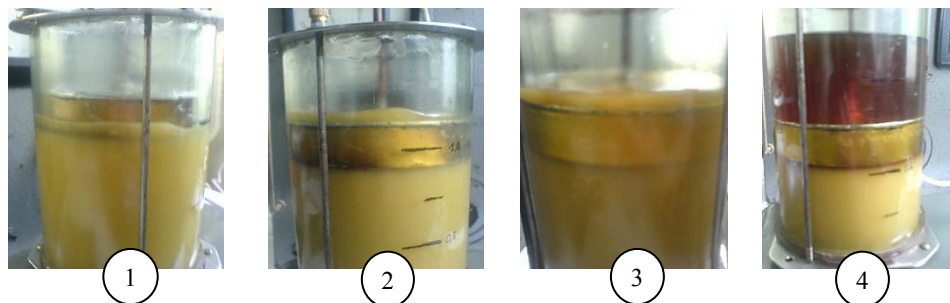


**Рис. 4.** Загальний вигляд станда для експериментального дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей: 1 — ємність з речовиною; 2 — електричний нагрівач; 3 — пульт керування; 4 — платформа для додаткової наважки; 5 — аналогово-цифровий перетворювач; 6 — персональний комп'ютер; ДТ1...ДТ4 — термомпари

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

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

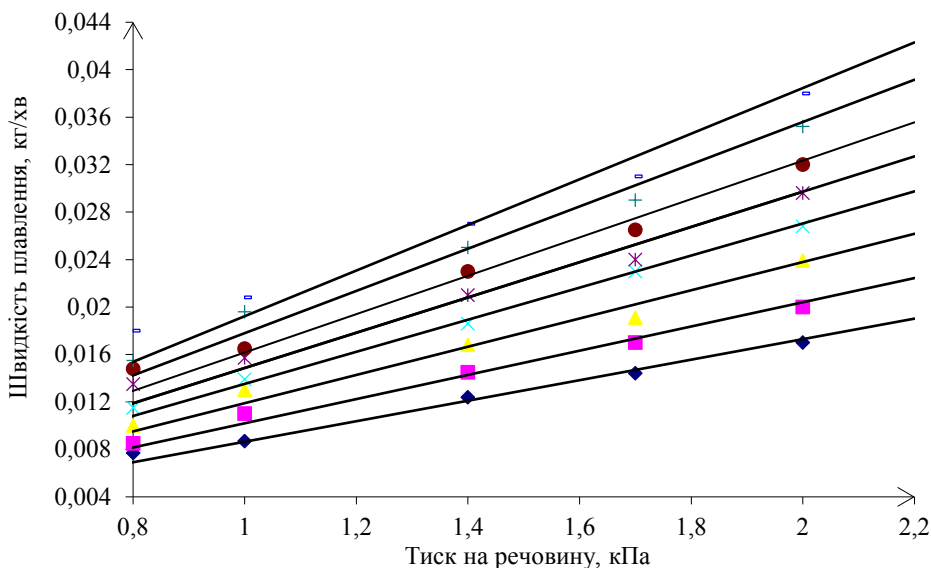
Процеси нагрівання та плавлення можна розділити на 4 етапи (рис. 5).



**Рис. 5.** 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

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

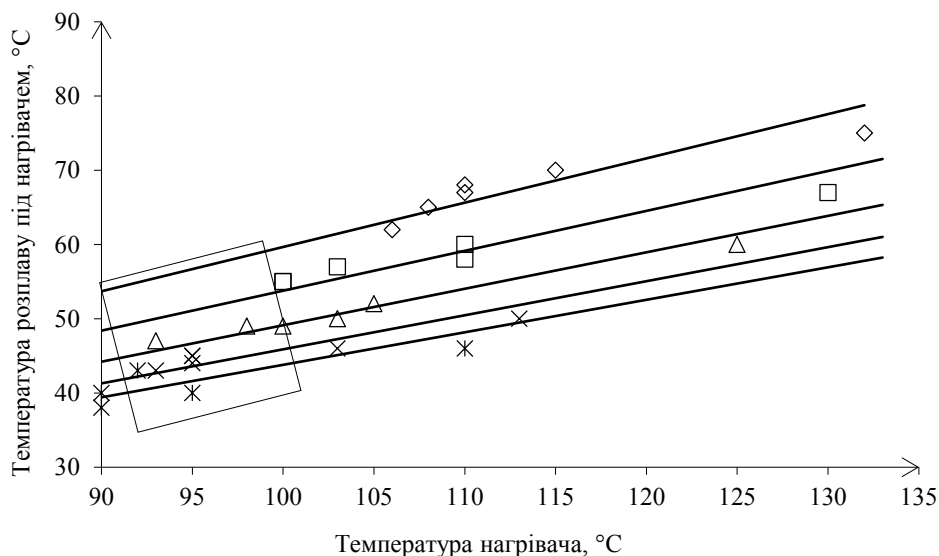
Отримано залежність швидкості плавлення вазеліну від тиску на його поверхню при різних температурах нагрівача (рис. 6). Як видно з рисунка, за рахунок підвищення тиску на поверхню речовини та температури нагрівача можна домогтися інтенсифікації процесу.



**Рис. 6.** Залежність швидкості плавлення вазеліну від тиску на його поверхню при різних температурах нагрівача: 1 —  $T = 60^{\circ}\text{C}$ ; 2 —  $T = 70^{\circ}\text{C}$ ; 3 —  $T = 80^{\circ}\text{C}$ ; 4 —  $T = 90^{\circ}\text{C}$ ; 5 —  $T = 100^{\circ}\text{C}$ ; 6 —  $T = 110^{\circ}\text{C}$ ; 7 —  $T = 120^{\circ}\text{C}$ ; 8 —  $T = 130^{\circ}\text{C}$

Проведено дослідження й отримано залежність температури розплаву під нагрівачем з урахуванням температури нагрівача при різних значеннях тиску (рис. 7). Вкрай важливо, щоб речовина під нагрівачем встигала розплавлятися і утворювалась плівка розплавленої речовини. Якщо нагрівач буде видавлювати речовину, вона не встигатиме до кінця розплавитись або буде перегріватись. З урахуванням того, що температура плавлення вазеліну лежить в інтервалі від  $37$  до  $55^{\circ}\text{C}$ , було визначено оптимальну область температур і режимні параметри, необхідні для того, щоб вуглеводнева суміш під нагрівачем встигала розплавлятися, але не перегрівалась.

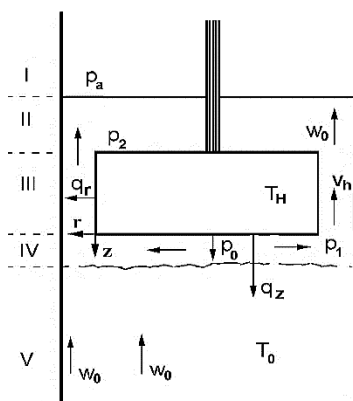
Для підтримання температури плавлення вазеліну в інтервалі від  $37$  до  $55^{\circ}\text{C}$  із застосуванням нагрівача, нагрітого до  $90$ — $100^{\circ}\text{C}$ , достатньо встановити величину тиску від  $0,8$  до  $1,7$  кПа.



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

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

Математична модель базується на таких припущеннях: стаціонарність процесу нагрівання та плавлення; розплав — в'язка нестислива ньютонівська або не-ньютонівська рідина; теплофізичні властивості розплаву постійні; рух розплаву в зазорах — ламінарний ( $Re < 1$ ); на стінках відсутнє прослизання (Ободович, 2021).



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



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

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

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

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

Рівняння нерозривності:

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

Рівняння збереження кількості руху:

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

Рівняння нагрівання та плавлення речовини:

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

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

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

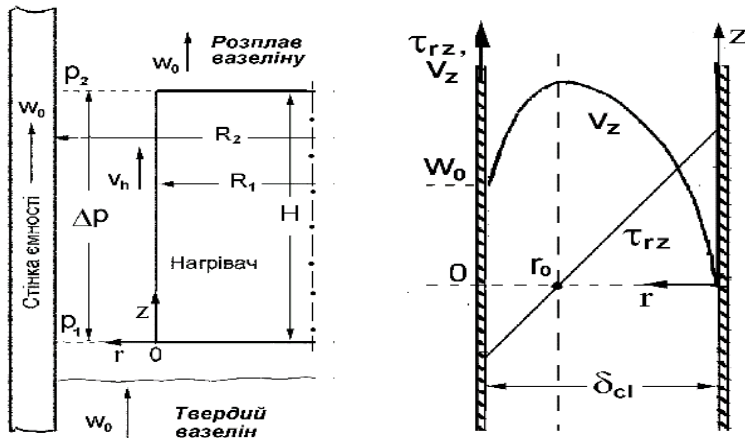


Рис. 9. Схема течії розплаву в кільцевому зазорі (а) та розподіл швидкості  $v_z(\delta)$  і зсувних напружень  $\tau_{rz}(\delta)$  по ширині зазору (б)

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

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

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

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

Для ньютонівської рідини рівняння в'язкості має вигляд:

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

Напруження зсуву визначається з рівняння:

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

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

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

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

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

Рівняння (9а) описує ліву гілку параболи (зліва від  $r_0$ ), а рівняння (9б) — праву гілку (рис. 7, б). Обидва ці рівняння містять невідомий параметр  $r_0$ . Зрозуміло, що в точці  $r = r_0$  значення швидкості з рівнянь (9а) і (9б) будуть однаковими. Тому прирівнюючи швидкості в обох рівняннях знаходимо  $r_0$  і далі розв'язуємо задачу:

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

Розраховуємо середню швидкість розплаву в зазорі:

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

У рівняннях цієї моделі невизначеним залишаються тиск  $p_1$  на вході в зазор, відносні швидкість руху стінки  $w_0$  і в'язкість розплаву  $\mu$ .

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

Моделювання течії розплаву в дисковому зазорі (рис. 10, а) пов'язане з 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 неможливо було розглядати ці течії. Загальне переміщення розплаву в апараті відбувається внаслідок дії відомого тиску з боку нагрівача на вході і атмосферного тиску на виході.

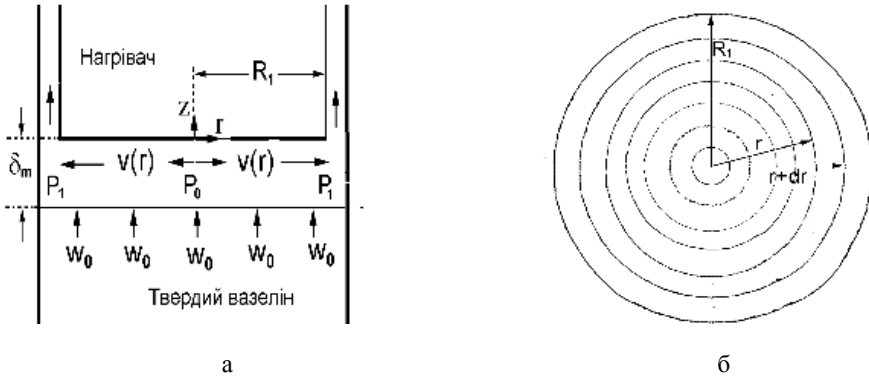


Рис. 10. Схема течії розплаву в дисковому зазорі під нагрівачем (а) та схема розбиття дискового зазору на елементарні зони (б)

Записується стаціонарне рівняння руху розплаву в дисковому зазорі під нагрівачем у вигляді рівняння Бернуллі для стаціонарних потоків. Ширина зазору  $\delta_m$  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  $\delta_m$  на його місце з поверхні твердого вазеліну надходить нова порція розплавленого вазеліну із швидкістю  $w_0$ , тобто з постійною швидкістю опускання нагрівача. Згідно з рівнянням нерозривності кількість вазеліну, що надходить у зазор в одиницю часу, дорівнює кількості вазеліну, яка виходить із зазору. Враховується також втрата напору в течії в зазорі внаслідок тертя на верхній та нижній поверхні зазору.

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

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

Витрата енергії на в'язке тертя на цій ділянці:

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

Швидкість течії в зазорі:

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

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

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

Після інтегрування в межах від 0 до  $r$  одержимо:

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

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

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

Приймається, що в центрі дискового зазору ( $r = 0$ ) на розплаві 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 у рівняннях моделі для кільцевого зазору. В результаті вирішення рівнянь течії в дисковому зазорі (12)—(17) з останнього рівняння (17) остаточно визначаємо тиск  $p_1$ , який входить у систему рівнянь моделі.

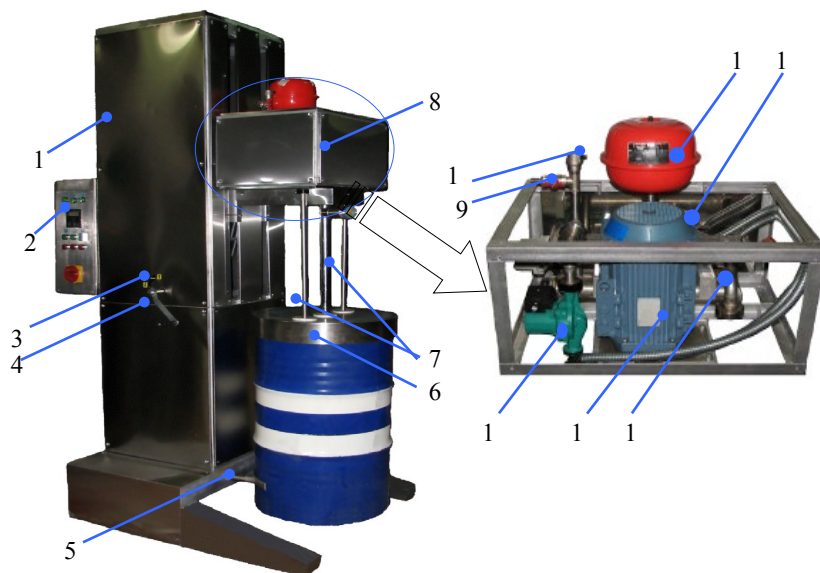
Експериментальні та теоретичні дослідження дали змогу розробити та виготовити установку «Термобат-М» (рис. 11), в якій застосовано спосіб термоконтактного нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей. Установка для плавлення речовин «Термобат-М» складається з таких вузлів: корпус 1 з вантажопідйомним механізмом і упором 5 для центрування бочки з продуктом; щит управління 2; електронагрівальний апарат 8.

У корпусі 1 встановлений вантажопідйомний механізм для підйому та опускання електронагрівального апарата 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.

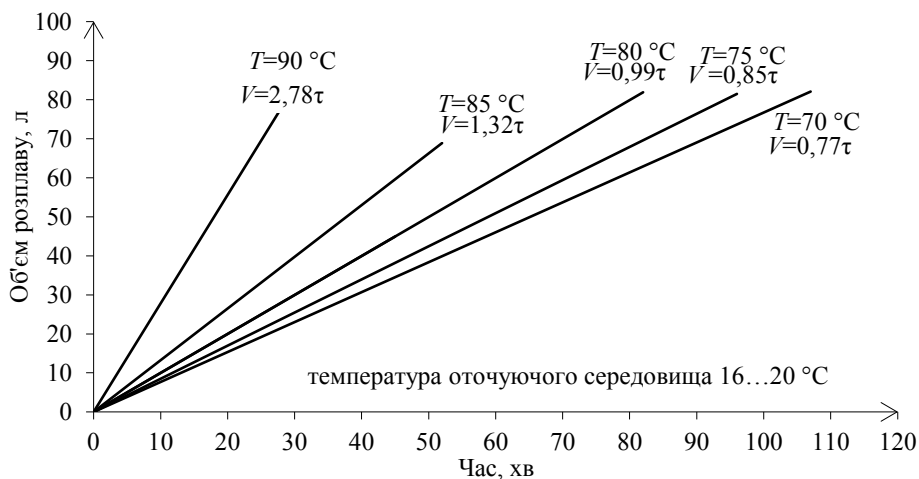
Нагрівальний апарат 8 призначений для нагріву термоконтактного нагрівача 6 і плавлення речовини, а також відбору розплаву із зони контакту. Термоконтактний нагрівач 6 апарата 8 занурюється в речовину при її плавленні на задану глибину. Температура на поверхні розплаву підтримується вище температури плавлення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

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



**Рис. 11. Установка «Термобат-М»:** 1 — корпус с вантажопідйомним механізмом; 2 — щит управління; 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 — повітровідвідник; 11 — розширювальний бачок; 12 — штуцер контролю переливу теплоносія; 13 — електродкотел; 14 — гвинтовий насос; 15 — циркуляційний насос

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



**Рис. 12. Залежність об'єму розплаву від температури нагрівача**

Випробовування установки для нагрівання та плавлення при різних початкових температурах речовини показали високу ефективність роботи установки, тому що, порівняно з існуючими, вдалося розплавити 200 л вазеліну за 2,5...3 год та отримати якісний рівномірно розплавлений вазелін у ємності.

### Висновки

Проведені експериментальні дослідження дали змогу отримати залежність швидкості плавлення від температури нагрівача й тиску на поверхню речовини залежно від температури для розробки моделі.

Проведено моделювання процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей з примусовим видаленням розплаву (модель течії розплаву в кільцевому зазорі під дією перепаду тиску і руху стінки та модель течії розплаву в дисковому зазорі під нагрівачем), що дало змогу розробити та виготовити установку. В установці об'єднано декілька технологічних операцій, що надає можливість інтенсифікувати процес плавлення та зменшити витрати енергії. В результаті проведених досліджень на виготовленій установці встановлено, що використання запропонованого методу та установки в 1,2...1,7 раза скорочує витрати енергії порівняно з іншими методами.

### Література

Грабов, Л. М., Грабова Т. Л. & Мусаелян Л. Ю. (2010). Теплофизические свойства жидких энергетических топлив. *Енергетика та електрифікація*, 2(318), 16—20.

Грабов, Л. М., Мершій, В. І., Грабова, Т. Л. & Посулько, Д. В. (2005). Нове обладнання для теплової обробки харчових продуктів. *Харчова і переробна промисловість*, 24—25.

Грабов, Л. М., Мершій, В. І., Бондарь, С. І. (2001). Спосіб плавлення речовини та пристрій для його здійснення (Патент України № 31435).

Долінський, А. А., Грабов, Л. М. & Степанова О. Є. (2011). Теплообмін при нагріванні і плавленні основ для виготовлення косметичних та фармацевтичних препаратів. *Промышленная теплотехника*, 33(3), 12—19.

Грабов, Л. Н., Мершій, В. И., Ващенко, В. Н. & Писаренко, Т. В. (2000). Оптимизация процесса термодиффузионного плавления материалов. *Промышленная теплотехника*, 22(1), 94—99.

Лузгин, Н. Е., Утолин, В. В., Коченов, В. В., & Чекайкин, С. В. (2018). Исследование динамической вязкости расплавленного пчелиного воска. *Инновационная техника и технология*, 2, 33—37.

Ободович, О. М., Іваницький, Г. К. & Степанова, О. Є. (2021). Моделювання процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей з примусовим видаленням розплаву. *Теплофізика та теплоенергетика*, 43, 1, 89—96.

Atume Emmanuel Terhem, 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.

Ir. Hendrik A. Romp. (1937). *Oil Burning*. Springer-science+business media, b.v. 1st ed., 336 p.