УДК 536.242; 536.4

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ НАГРІВАННЯ ТА ПЛАВЛЕННЯ ВУГЛЕВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ З ПРИМУСОВИМ ВИДАЛЕННЯМ РОЗПЛАВУ

Ободович О.М., д.т.н., Іваницький Г.К., д.т.н., Степанова О.Є.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2021.11>

Для способу плавлення речовини, розміщеної в циліндричній ємності, що ґрунтується на русі дискового нагрівального елемента під дією сили тяжіння в процесі плавлення і перетікання розплавленої речовини через зазори між диском і стінками ємності проведено моделювання. Представлено моделювання течії розплаву в кільцевому зазорі, що описує ламінарну течію під дією перепаду тиску і швидкістю руху стінки ємності відносно нагрівача, та течії розплаву під нагрівачем.

Для способа плавления вещества, размещенного в цилиндрической емкости, основанного на движении дискового нагревательного элемента под действием силы тяжести в процессе плавления и перетекания расплавленного вещества через зазоры между диском и стенками емкости проведено моделирование. Представлено моделирование течения расплава в кольцевом зазоре, описывающее ламинарное течение под действием перепада давления и скорости движения стенки емкости относительно нагревателя, и течения расплава под нагревателем.

For the method of melting a substance placed in a cylindrical tank, based on the movement of a disc heating element under the action of gravity during melting and overflow of molten substance through the gaps between the disc and the walls of the tank, simulation has been carried out. Simulation of the melt flow in the annular gap is presented, which describes the laminar flow under the influence of the pressure drop and the velocity of the vessel wall relative to the heater, and the melt flow under the heater.

Бібліографія 12, рис. 4.

Ключові слова: нагрівання, плавлення, вуглеводневі суміші, кільцевий зазор, дисковий зазор, математичне моделювання.

C_p – теплоємність;

G_m – масова витрата;

L_{melt} – тепловий потік;

Q – тепловий потік;

p – тиск;

R – радіус;

S – площа поперечного перерізу;

T – температура;

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

δ – ширина зазору;

λ – коефіцієнт теплопровідності;

μ – в'язкість;

v_z – швидкість;

ρ – густина;

τ – час;

τ_{rz} – напруження зсуву;

w_0 – швидкість руху стінки;

Нижні індекси:

δ – розплав;

cl – переріз зазору;

h – нагрівач;

m – масова;

vs – вазелін;

z – зазор.

Вступ. Процеси нагрівання і плавлення органічних речовин з низьким коефіцієнтом теплопровідності, насамперед, вуглеводнів (вазелін, парафін, церезин, віск, нафтопродукти, тверді жири тощо), а також різного типу полімерних матеріалів та окремих видів харчових продуктів широко розповсюджені в хімічній, нафтопереробній, фармацевтичній, харчовій та інших галузях промисловості [1-4]. Кожен з таких продуктів

є складною сумішшю твердих, рідких та напіврідких вуглеводнів із різною молекулярною масою і тому не має визначеної температури переходу з одного агрегатного стану в інший. Усі ці речовини є неньютонівськими рідинами і характеризуються сильною залежністю в'язкості від температури [5,6]. Вплив температури на реологічні показники та на агрегатний стан таких продуктів відіграє важливу роль при їх транспортуванні

та експлуатації, що робить промислові процеси нагрівання та плавлення занадто трудомісткими та енерговитратними.

Продукти перегонки нафти, що складаються в основному із суміші граничних вуглеводнів, широко застосовуються в якості вуглеводневих основ у виробництві м'яких лікарських форм зовнішньої дії – кремів, мазей тощо. На підприємствах фармацевтичної промисловості для нагрівання та плавлення основ для виготовлення косметичних і лікарських препаратів застосовують теплообмінні апарати періодичної дії з мішалками. Передача тепла в цих апаратах здійснюється в нестационарному 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.

Аналіз публікацій, присвячених нагріванню та плавленню речовин з низьким коефіцієнтом теплопровідності, засвідчує потребу в розробці сучасних методів та новітнього обладнання для більш ефективної реалізації цих технологічних процесів із зменшенням енергетичних витрат. З цієї точки зору перспективним вважається метод термоконтактного плавлення з примусовим видаленням розплаву із зони контакту. Такий принцип застосовується при обробці полімерних матеріалів та композитів із застосуванням черв'ячних та дискових екструдерів [7, 8]. Видалення розплаву відбувається за рахунок двох фізичних механізмів: течії, що виникає внаслідок тертя стінок та течії під дією

нормального тиску металевого нагрівача на поверхню твердого полімеру. Комплексному дослідженню цих процесів присвячена велика кількість зарубіжних та вітчизняних публікацій [8-10].

Схожа задача примусового виведення розплаву із зони вирішувалася також при розробці методу термоконтактного проникнення джерела тепла в глибинні надра за допомогою автономного пристрою – термозонду, що містить потужний малогабаритний автономний теплогенератор з метою визначення швидкості руху термозонду, товщини шару розплаву на лобовій поверхні термозонду та інших параметрів перебігу процесу термопроникнення [11]. Враховувалася сукупність двох аспектів задачі: поширення тепла від термозонду через розплави до породи для її прогрівання з подальшим плавленням та перетікання розплаву від лобової частини термозонду в напрямку протилежному руху.

До останнього часу метод термоконтактного плавлення вуглеводнів у виробництві косметичних і фармацевтичних препаратів не застосовувався. При використанні традиційних методів нагрівання та плавлення матеріалу за рахунок теплопровідності тривалість процесу плавлення вазеліну або парафіну складала від 12 до 24 годин, а питомі витрати теплової енергії становлять 0,25...0,37 кВт•год/кг.

В ІТТФ НАНУ було розроблено спосіб плавлення вуглеводнів за рахунок контактного та конвективного переносу тепла із примусовим видаленням розплаву [12, 13] і створено експериментальний стенд для визначення раціональної конструкції апарату та оптимальних режимів його роботи (рис. 1).

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

**1 – ємність з речовиною; 2 – електричний нагрівач; 3 – регулятор напруги;
4 – тягар; 5 – аналогово-цифровий перетворювач**

Спосіб плавлення твердої вуглеводневої основи, полягає у підведенні теплоти безпосередньо до фронту фазового перетворення за допомогою дискового нагрівача, який контактує із зовнішньою границею нерозплавленої речовини і поступово переміщується в ній під дією сили тяжіння. При цьому температура дискового нагрівача в зоні контакту з основою підтримується нижчою температури її деструкції.

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 [8].

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 температур та необхідністю врахування її неньютонівських властивостей.

Цим, зокрема, пояснюється та обставина, що на теперішній час відсутні публікації, пов'язані з моде-

люванням 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.

Моделювання процесів нагрівання та плавлення. Експериментальні дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводів проводилися на лабораторному стенді, схематично представленому 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.

Моделними 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 (1)-(5).

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

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

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

Рівняння нерозривності

$$G_m = \rho S v = \text{const}.$$

Рівняння збереження кількості руху

Рис. 2. 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

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

Рівняння нагрівання та плавлення речовини

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

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.

Течія розплаву в кільцевому зазорі під дією перепаду тиску і руху стінки. 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 в напрямку протилежному градієнту тиску (рис. 3а). Потрібно знайти розподіл напруження зсуву і швидкості потоку по ширині зазору.

Задачу течії рідини в кільцевому зазорі доцільно вирішувати в циліндричній системі координат. Але 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 до плоско-паралельної моделі. В цьому ви-

падку задача вирішується в аналітичному вигляді і для неньютонівської і для неньютонівської рідини.

Як і в циліндричній системі координат, напрямок руху рідини в зазорі позначається z , а напрямок вздовж ширини зазору позначимо y . Перехід від циліндричної до декартової системи координат схематично представлено на рис. 2. Як видно з рисунку, напрямок координати r в декартовій системі співпадає з напрямком координати в циліндричній системі. Початок координат $(0, z)$ 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. Швидкість течії розплаву через зазор, яка в циліндричній системі позначається $v_z(r)$, а в декартовій системі – $v_z(0)$, в обох системах мають ті ж самі значення.

В плоско-паралельній моделі швидкість $v_z(0)$ 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 $w_0 \equiv v_h$.

Рис. 3. Схема течії розплаву в кільцевому зазорі (а) та розподіл швидкості $v_z(\delta)$ і зсувних напружень $\tau_{rz}(\delta)$ по ширині зазору (б)

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 .

Рішення для ламінарної течії в циліндричних координатах. 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:

$$\frac{d(r\tau_{rz})}{dr} = -\frac{dp}{dz} = \frac{p_1 - p_2}{H}. \quad (7)$$

Залежність напруження тиску від радіусу завжди пряма лінія (рис. 3б), 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 (8), 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. 3б).

Для ньютонівської рідини рівняння в'язкості має вигляд:

$$\tau_{rz}(r) = -\mu \frac{dv_z}{dr}. \quad (8)$$

Рівняння напруження зсуву

$$\tau_{rz}(r) = \frac{\Delta p}{H_h} (r - r_0). \quad (9)$$

В нашій задачі в рівнянні (9) для $\tau_{rz} = f(r)$ міститься невідомий параметр r_0 (рис. 3б), 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 .

$$v_z(r) = \frac{\Delta p}{\mu H_h} \left(r_0 r - \frac{r^2}{2} \right) \text{ при } r \leq r_0; \quad (10a)$$

$$v_z(r) = w_0 - \frac{\Delta p}{\mu H_h} \cdot \left(r_0(\delta - r) - \frac{\delta^2 - r^2}{2} \right) \text{ при } r_0 \leq r \leq \delta. \quad (10b)$$

Рівняння (10a) описує ліву гілку параболи (зліва від r_0), а рівняння (10b) – праву гілку (рис. 3). Обидва ці рівняння містять невідомий параметр r_0 . Але, як видно з рисунку в точці $r = r_0$ значення швидкості по рівнянню (10a) і (10b) будуть однаковими. Тому прирівнюючи швидкості ми знаходимо r_0 і далі вирішуємо задачу.

$$r_0 = \frac{\delta_{cl}}{2} + \frac{\mu H}{\Delta p \cdot \delta_{cl}} w_0. \quad (11)$$

Розраховуємо середню швидкість розплаву в зазорі:

$$\bar{v}_z = v_{cl} = w_0 \frac{(\delta - r_0)}{\delta} + \frac{(p_1 - p_2)}{\mu H_h} \left[\frac{\delta^2}{3} - (\delta - r_0) \cdot r_0 \right]. \quad (12)$$

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.

Течія розплаву в дисковому зазорі під нагрівачем.

Моделювання течії розплаву в дисковому зазорі (рис. 4a) 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.

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 роз-

Рис. 4. Схема течії розплаву в дисковому зазорі під нагрівачем (а) та схема розбиття дискового зазору на елементарні зони (б)

плавленого 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. 4б):

$$\rho \frac{v^2(r)}{2} + p(r) = \rho \frac{v^2(r+dr)}{2} + p(r+dr) + dW_{fr}. \quad (13)$$

Витрата енергії на в'язке тертя на цій ділянці:

$$dW_{fr} = \mu \frac{v(r)}{\delta_m} \cdot \frac{dS_z}{dS_r} = \mu \frac{w_0 r}{2\delta_m^3} dr. \quad (14)$$

Швидкість течії в зазорі:

$$v(r) = \frac{w_0 r}{2\delta_m}. \quad (15)$$

З урахуванням (14) та (15) рівняння руху має вигляд:

$$-\frac{dp}{dr} dr = \rho \cdot \frac{w_0^2 \cdot \pi r \cdot dr}{4\delta_m^2} + \mu \frac{w_0 r}{2\delta_m^3} dr. \quad (16)$$

Після інтегрування в межах від 0 до r одержимо:

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

Підставляючи в (17) $r = R_1$, знаходимо тиск p_1 на виході із-під нагрівача:

$$p_1 = p_0 - \rho \cdot \frac{w_0^2 \cdot \pi R_1^2}{8\delta_m^2} - \mu \frac{w_0 R_1^2}{4\delta_m^3} = p_0 - \frac{w_0 R_1^2}{4\delta_m^2} \left(\frac{\pi \rho w_0}{2} + \frac{\mu}{4\delta_m} \right). \quad (18)$$

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 (13)-(17) в останньому рівнянні (18) визначено тиск p_1 , який можливо далі застосовувати.

Висновки

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.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Бойченко Н.Б., Колесников В.А. Мягкие лекарственные формы. Технология приготовления и особенности прописи рецептов: метод. указания [Электронный ресурс]. Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2016 – 30 с.
2. Луць В.В., Гладышев В.В., Лисянская А.П., Бирюк И.А. Изучение влияния основ-носителей на высвобождение активных фармацевтических ингредиентов из комбинированных мазей антимикотического действия // Актуальні питання фармацевтичної і медичної науки та практики. – 2018. – Т. 11, №1(26) – С. 57-63.
3. Толепбергенов Е.К. Новые подходы к переработке амбарной нефти на месторождениях “Узень” и “Карамандыбас” // НИПИ «Нефтегаз». – Баку, 2012. – № 4. – С. 43-52.
4. Пат. 48964 (RU), МПК7 В 67 D 5/04, В 65 G 69/20. Установка для выгрузки из железнодорожной цистерны высоковязкого мазута с твердым остатком / заявитель и патентообладатель: Колыхалин В.М. – № 2005116214/22; заявл. 20.05.05; опубл. 10.11.05.
5. 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.
6. Грабов Л.М., Грабова Т.Л., Мусаелян Л.Ю. Теплофизические свойства жидких энергетических топлив // Энергетика та електрифікація – №2 (318). – 2010. – С. 16-20.
7. Кузьяев И.М., Свидерский В.А., Петухов А.Д. Моделирование экструзии и экструдеров при переработке полимеров: монография. Ч.2. – Киев: НТУУ «КПИ» Изд-во «Политехника», 2016. – 276 с.
8. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. Пер. с англ. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
9. 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.
10. Геллер Б.Э., Геллер А.А., Чиртузов В.Г. Практическое руководство по физикохимии волокнообразующих полимеров. Уч. пособие для вузов. – М.: Химия, 1996. – 432 с.
11. Писаренко Т.В. Разработка метода контактной термопроникновения в глубинные недра с помощью технических автономных средств: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.14.06 / Писаренко Татьяна Васильевна; Институт технической теплофизики. – К., 2000. – 20 с.
12. 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.
13. Грабов Л.М., Посулько 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.

**MODELING OF HEATING AND MELTING
PROCESSES OF HYDROCARBON MIXTURES
WITH FORCED REMOVAL OF THE MELT**

Obodovych O.M., Ivanitsky, G.K., Stepanova O.E.

*Institute of Engineering Thermophysics of the National
Academy of Sciences of Ukraine, Marii Kapnist str., 2a,
Kyiv, 03680, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2021.11>

Analysis of the work, which considered the mathematical modeling of the melting process in various industries, currently does not pay attention to modeling the processes of heating and melting of hydrocarbon mixtures, such as vaseline, paraffin, fats, lanolin and others. The issue of optimization of heating and melting processes, calculations of necessary process parameters (speed and depth of thermal front penetration, etc.) and equipment, avoidance of repetition for each hydrocarbon mixture of experimental studies shows the need to develop a mathematical model of these processes. For the method of melting a substance placed in a cylindrical tank, based on the movement of a disc heating element under the action of gravity during melting and overflow of molten substance through the gaps between the disc and the walls of the tank, simulation has been carried out. Simulation of the melt flow in the annular gap is presented, which describes the laminar flow under the influence of the pressure drop and the velocity of the vessel wall relative to the heater, and the melt flow under the heater.

Bibliography 12, fig. 4

Key words: heating, melting, hydrocarbon mixtures, annular gap, disk gap, mathematical modeling.

1. *Bojchenko N.B., Kolesnikov V.A.* [Soft dosage forms. Cooking technology and recipe features]: metod. ukazaniya [Elektronnyj resurs]. Krasnoyar. gos. agrar. un-t. – Krasnoyarsk [Krasnoyarsk], 2016. 30 c. (Rus.)

2. *Luc V.V., Gladyshev V.V., Lisyanskaya A.P., Biryuk I.A.* [Study of the effect of carrier bases on the release of active pharmaceutical ingredients from combined antimycotic ointments]. Aktualni pitannya farmaceutichnoï i medichnoï nauki ta praktiki [Actual nutrition of pharmaceutical and medical science and practice]. 2018. V. 11, № 1(26). C. 57-63. (Rus.)

3. *Tolebergenov E.K.* [New approaches to the processing of granular oil at the Uzen and Karamandybas fields]. NIPI “Neftegaz” [NIPI “Neftegaz”]. Baku, 2012. № 4. C. 43-52. (Rus.)

4. *Patent 48964 (RU)*, MPK7 B 67 D 5/04, B 65 G 69/20. [Installation for unloading of high-viscosity fuel oil with solid residue from a railway tank car]. zayavitel i patentoobladatel: Kolykhalin V.M. – № 2005116214/22; zayavl. 20.05.05; opubl. 10.11.05. (Rus.)

5. *Luzgin N.E., Utolin V.V., Kochenov V.V., Chekajkin S.V.* [Investigation of the dynamic viscosity of molten beeswax]. Innovacionnaya tekhnika i tekhnologiya [Innovative technology and technology]. 2018. № 2. C.33-37. (Rus.)

6. *Grabov L.M., Grabova T.L., Musaelyan L.YU.* [Thermophysical properties of liquid energy fuels]. Energetika ta elektrifikaciya [Energy and electrification]. №2 (318). 2010. C. 16-20. (Rus.)

7. *Kuzyaev I.M., Sviderskij V.A., Petuhov A.D.* [Modeling extrusion and extruders in polymer processing]: monografiya. Chast 2. Kyiv: NTUU “KPI” Izd-vo “Politehnika” [NTUU “KPI” Publishing house “Polytechnic”]. 2016. 276 p. (Rus.)

8. *Tadmor Z., Gogos K.* [Theoretical foundations of polymer processing]. Per. s angl. Moscow: Himiya [Chemistry]. 1984. 632 p. (Rus.)

9. *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.

10. *Geller B.E., Geller A.A., Chirtuzov V.G.* [A practical guide to the physical chemistry of fiber-forming polymers]. Uch. posobie dlya vuzov. – Moscow: Himiya [Chemistry]. 1996. 432 p. (Rus.)

11. *Pisarenko T.V.* [Development of method of contact thermal penetration in deep bowels of the Earth by autonomous technical means]: avtoref. dis. kand. tehn. nauk: 05.14.06 / Pisarenko Tetyana Vasilivna; Institute of Technical Thermophysics [Institut tehničnoyi teplofiziki]. Kyiv. 2000. 20 p. (Ukr.)

12. *Dolinskij A.A., Grabov L.M., Stepanova O.E.* [Heat transfer during heating and melting of bases for the manufacture of cosmetics and pharmaceuticals]. Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial heating technology]. 2011. T. 33, № 3. C. 12–19. (Ukr.)

13. *Grabov L.M., Posunko D.V., Stepanova O.E.* [Application methods of thermocontact heating and discrete pulse input energy in technologies of obtaining suppositories]. Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial heating technology]. 2016. T. 38, № 1. C. 31-40.

Отримано 04.02.2021

Received 04.02.2021