

## ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСОВНОСТІ МІКРОХВИЛЬОВОГО НАГРІВАННЯ НАФТОПРОДУКТІВ У ЗАЛІЗНИЧНИХ ЦИСТЕРНАХ

І. Л. Бошкова\*, Н. В. Волгушева, О. С. Тімлов, Е. І. Альтман, А. В. Арику

Одеська національна академія харчових технологій; 65039, Україна, Одеса, вул. Канатна, 112,  
e-mail: tte\_onaft@ukr.net

Аналітично досліджується процес нагрівання в'язких нафтопродуктів у мікрохвильовому полі. Практична цінність роботи пов'язана з необхідністю розігріву високов'язких нафтопродуктів при зливанні із залізничних цистерн. Визначено, що застосування мікрохвильового випромінювання є одним з найперспективніших напрямів при створенні енергозберігаючих та екологічно безпечних технологій. Застосування енергії мікрохвиль замість використовуваних на даний час в більшості промислових установок теплоносіїв дозволяє значно спростити технологічну схему, виключивши всі процеси і апарати, пов'язані з підготовкою теплоносія. Сучасним напрямком застосування мікрохвильового нагріву є нагрівання високов'язких нафтопродуктів, що забезпечує значне зниження в'язкості. На даний час недоліком цього методу є нерівномірний нагрівання. Внаслідок цього існує потреба у раціональному схемному рішенні для підведення мікрохвильової енергії та відповідних математичних моделей для розрахунку температури нафтопродукту. Проведено аналітичне дослідження процесу нагрівання в наближенні сферичного тіла при безперервно діючих внутрішніх джерел теплоти, що виникають внаслідок дії мікрохвильового поля. Прийняті граничні умови I роду та припущення незмінності теплофізичних властивостей рідини. Наведено алгоритм рішення диференціальних рівнянь методом сіток при заміні диференціальних операторів різницевиими співвідношеннями. За рекуррентною формулою для тривимірної задачі теплопровідності виконано розрахунки температурного поля при нестационарному нагріванні. При моделюванні мікрохвильового нагрівання нафтопродуктів для даної схеми визначено відстань від мікрохвильового випромінювача до зливного отвору на підставі розрахунку глибини проникнення мікрохвильової енергії. При проведенні розрахунків приймалися теплофізичні характеристики для мазуту. Визначено, що використання мікрохвильової енергії здатне істотно інтенсифікувати процес і знизити витрати енергії на нагрівання.

Ключові слова: зливання нафтопродуктів, математична модель, теплопровідність, сітковий метод, глибина проникнення, температура

Аналитически исследуется нагрев вязких нефтепродуктов в микроволновом поле. Практическая ценность работы связана с необходимостью разогрева высоковязких нефтепродуктов при сливе из железнодорожных цистерн. Определено, что применение микроволнового излучения является одним из наиболее перспективных направлений при создании энергосберегающих и экологически безопасных технологий. Применение энергии микроволн вместо используемых в настоящее время в большинстве промышленных установок теплоносителей позволяет упростить технологическую схему, исключив все процессы и аппараты, связанные с подготовкой теплоносителя. Современным направлением применения микроволнового нагрева является нагрев высоковязких нефтей и нефтепродуктов, что обеспечивает значительное снижение вязкости. В настоящее время недостатком этого метода является неравномерный нагрев. В результате существует необходимость рационального схемного решения для подвода микроволновой энергии и соответствующих математических моделей для расчета температуры нефтепродукта. Проведено аналитическое исследование процесса нагрева в приближении сферического тела при непрерывно действующих внутренних источниках теплоты, возникающих под воздействием микроволнового поля. Приняты граничные условия первого рода и допущение неизменности теплофизических свойств жидкости. Приведен алгоритм решения дифференциальных уравнений методом сеток при замене дифференциальных операторов разностными соотношениями. По рекуррентной формуле для трехмерной задачи теплопроводности выполнены расчеты температурного поля при нестационарном нагреве. При моделировании микроволнового нагрева нефтепродуктов для данной схемы определено расстояние от микроволнового излучателя до сливного отверстия из расчета глубины проникновения микроволновой энергии. При проведении расчетов принимались теплофизические свойства для мазута. Определено, что использование микроволновой энергии способно существенно интенсифицировать процесс и снизить расход энергии на нагрев.

Ключевые слова: сливание нефтепродуктов, математическая модель, теплопроводность, сеточный метод, глубина проникновения, температура.

*The heating of viscous petroleum products in a microwave field has been analytically investigated. The practical value of the work is related to the need to heat high-viscosity petroleum products when draining from railway tanks. It has been determined that the use of microwave radiation is one of the most promising areas in the creation of energy-saving and environmentally friendly technologies. The use of microwave energy instead of the currently used in most industrial installations of coolants can greatly simplify the technological scheme, eliminating all processes and devices associated with the preparation of the coolant. A modern area of application of microwave heating is the heating of high-viscosity oils and petroleum products, which significantly reduces viscosity. Currently, the disadvantage of this method is uneven heating. As a result, there is a need for a rational scheme solution for the supply of microwave energy and appropriate mathematical models for calculating the temperature of the petroleum product. An analytical study of the heating process in the approximation of a spherical body with continuously operating internal heat sources arising from the action of a microwave field has been carried out. The boundary conditions of the first kind and the assumption of invariance of thermophysical properties of the liquid are accepted. An algorithm for solving differential equations by the grid method when replacing differential operators with difference relations is presented. According to the recurrent formula for the three-dimensional thermal conductivity problem, the temperature field in non-stationary heating calculations have been performed. In the simulation of petroleum products' microwave heating under this scheme, the distance from the microwave emitter to the drain hole has been determined based on the microwave energy penetration depth calculation. Thermophysical characteristics for fuel oil were taken into account during the calculations. It is determined that using microwave energy can significantly intensify the process and reduce energy costs for heating.*

Key words: oil product drainage, mathematical model, thermal conductivity, mesh method, penetration depth, temperature.

### Вступ

Застосування мікрохвильового випромінювання є одним з найперспективніших напрямів створення ресурсо- та енергозберігаючих, екологічно безпечних технологій. Нагрівання в мікрохвильовому полі характеризується високою швидкістю і великою ефективністю. Застосування енергії мікрохвиль замість використання на даний час у більшості промислових установок теплоносіїв дає змогу значно спростити технологічну схему, виключивши всі процеси і апарати, пов'язані з підготовкою теплоносія, а також шкідливі викиди в атмосферу. Проведення досліджень, пов'язаних з визначенням оптимізації впливу мікрохвильового випромінювання на перебіг ряду хімічних і нафтохімічних процесів, є важливим і актуальним напрямком інтенсифікації цих процесів, як на лабораторному рівні, так і в промисловому масштабі. Одним з напрямків застосування мікрохвильового нагрівання є нагрівання високов'язких нафт, що забезпечує значне зниження в'язкості продукту. Актуальним завданням транспортування в'язких нафтопродуктів є їх розвантаження з ємностей зберігання або транспортування, наприклад, із залізничних цистерн. Існує декілька способів зливання нафтопродуктів: більш текучим розчинником, з підігріванням продукту насиченою водяною парою, з використанням мікрохвильових установок, циркуляційним методом з використанням змієвикових підігрівачів, а також модифікаціями і комбінуванням цих методів. Підігрівання насиченою водяною відкритою парою неможливий для деяких продуктів, що не допускають обводнення. Так, обводнення знижує ефективність го-

ріння мазуту в топках котлів. Крім цього, пар погано перемішується з мазутом, а також кипляча вода, що конденсується з пари, на холодному мазуті спінує продукт, що може призвести до викиду продукту в люк. Застосування енергії мікрохвильового поля вважається перспективним, однак недоліком цього методу є нерівномірне нагрівання, що також пов'язане з низькою теплопровідністю продукту і практично повною відсутністю конвекції нафтопродукту в цистерні.

### Аналіз літературних джерел

Для розвитку методу мікрохвильового нагрівання нафти вивчають теплові ефекти і температурні поля у продукті. Дослідження [1] спрямоване на підвищення ефективності теплопередачі в'язкої нафти і вирішення проблем нерівномірного розподілу температури та поглинання енергії в процесі нагрівання нафти у нафтовому резервуарі. Доведено, що розподіл температури нафтопродукту більш збалансований при комбінованому впливі джерел нагрівання. Результати цього дослідження можуть надати теоретичну основу для вивчення закону теплопередачі в процесі комбінованого нагрівання парою нафтових цистерн і мікрохвильового нагрівання. В [2] розглядаються особливості нагрівання нафтопродуктів у мікрохвильовому полі і представлена базова теорія ефективного нагрівання. При цьому слід уникати перегрівання нафти в локальних її областях [3], що підвищує ризик вибуху. Акагі і Като [4] вивчали вплив коефіцієнта конвективної тепловіддачі по теплообміну і розподілу температури при підігріві в'язкої нафти. Вей та інші [5], Ма-

каньян і інші [6], Ху [7], Чжу та інші [8] досліджували зміну характеристик поля температури і витрати методами чисельного моделювання та отримали характеристики процесу нагрівання нафтопродуктів.

Розроблені технології мікрохвильового нагрівання характеризуються високою інтенсивністю і ефективністю. Ці переваги дозволяють використовувати мікрохвильове нагрівання при сушінні харчових продуктів, зниженні в'язкості мастила, поділу емульгування олії і води і т.д. [9-10]. Згідно з аналізом температурного поля в'язкої нафти, нерівномірний розподіл мікрохвильового поля в резервуарі з мастилом викличе регіональні відмінності в розподілі поля температури. З точки зору аналізу процесу теплопередачі [1], під час мікрохвильового нагрівання молекули мастила стрімко рухаються і починають швидко проникати в інші області. Макроскопічно гарячий нафтопродукт переносить енергію до області з більш низькою температурою за рахунок теплопровідності. При цьому ефект теплопровідності є визначальним в порівнянні з природною конвекцією,

Визначено [1, 11-12], що мікрохвильова енергія інтенсивно поглинається в'язким нафтопродуктом. Аналіз літературних даних свідчить, що метод мікрохвильового нагрівання нафтоналивних танкерів є здійсненним, і його доцільно досліджувати для подальшого застосування в промисловості. Однак існує необхідність у проведенні аналітичних і експериментальних досліджень процесу нагрівання нафтопродуктів у мікрохвильовому полі для вирішення окремих завдань, однією з яких є інтенсифікація зливу високов'язких нафтопродуктів із залізничних цистерн.

**Метою досліджень** є аналітичне обґрунтування доцільності мікрохвильового нагрівання високов'язких нафтопродуктів для забезпечення зливу із залізничних цистерн.

### Аналітичне дослідження процесу мікрохвильового нагрівання високов'язких нафтопродуктів

Для опису процесу нагрівання циліндричної цистерни з нафтопродуктами, що піддаються впливу високочастотного електромагнітного випромінювання, в [13] застосовано рівняння теплопровідності в циліндричних координатах. Аналіз роботи дає підстави зробити висновок, що запропонований метод математичного моделювання мікрохвильового нагрівання нафтопродуктів може бути прийнятий за основу. Моделювання мікрохвильового нагрівання високов'язких нафтопродуктів доцільно проводити

відповідно до диференціального рівняння теплопровідності з урахуванням внутрішніх джерел теплоти. Однак безпосередньо використовувати запропоновані результати неможливо, тому що в даній роботі розглядається процес нагрівання великого об'єму, який не може бути описаний циліндричними координатами.

Математична модель нагрівання нафтопродукту в резервуарі від дії мікрохвильового джерела ґрунтується на припущенні, що розповсюдження теплоти здійснюється в необмеженому масиві в процесі теплопровідності в умовах дії внутрішніх джерел енергії. Приймаючи, що теплофізичні властивості постійні і потужність мікрохвильового поля визначається дією внутрішніх джерел теплоти  $q_v$ , диференціальне рівняння теплопровідності набуває такого вигляду:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{\rho c_p}, \quad (1)$$

де  $a$  - коефіцієнт температуропровідності,  
 $\rho$  - густина нафтопродукту,  
 $c_p$  - його теплоємність.

Завдання вирішувалося в сферичних координатах, для яких оператор Лапласа  $\nabla^2$  за умови, що температура змінюється тільки по радіусу  $r$ , має такий вигляд:

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t}{\partial r}. \quad (2)$$

Приймаються граничні умови Іроду. Умови однозначності представлені у вигляді (3):

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } \tau = 0: \quad t(0, r) = t_0 = \text{const}; \\ \text{при } \tau > 0, \quad t(\tau, R) = t_0 = \text{const}; \\ \frac{\partial t(\tau, 0)}{\partial r} = 0 \end{array} \right\} \quad (3)$$

Останнє рівняння відображає умову симетрії. Температуру на межі приймають рівною температурі нафтопродуктів до початку нагрівання. Радіус кулі приймається рівним відстані від джерела випромінювання до дна ємності. Для розрахунку температур використовувався метод кінцевих різниць.

Часткові похідні, що входять до диференціального рівняння теплопровідності, граничні та початкові умови замінюються (апроксимуються) різницевиими відношеннями, які є лінійною комбінацією значень сіткової функції в кількох вузлах. Для нестационарної задачі в області  $\Omega = \{0 \leq r \leq \ell, 0 \leq \tau \leq \tau_k\}$  вводиться просторово-тимчасова сітка  $\Omega_{ht} = \Omega_h \times \Omega_\tau$  (рис. 1). Сукупність точок, що лежать на лінії  $\tau_1$ , називають тимчасовим шаром. Для позначення

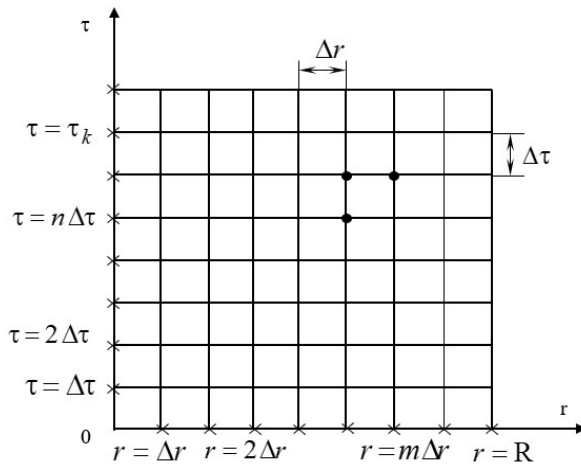


Рисунок 1 – Просторово-тимчасова сітка

сіткової функції у вузлі  $n$  на  $k$ ,  $k+1$  тимчасовому шарі будемо використовувати позначення  $t_n^k, t_n^{k+1}$ .

Перетворимо диференціальне рівняння (1) до скінченно-різницевого вигляду, замінивши диференціальні оператори різницевиими відношеннями. Для точки  $n$ :

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{t_n^{k+1} - t_n^k}{\Delta \tau} + \varepsilon_1, \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial t}{\partial r}\right)_+ \approx \frac{t_n^k - t_{n-1}^k}{\Delta r}, \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial t}{\partial r}\right)_- \approx \frac{t_{n+1}^k - t_n^k}{\Delta r}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} = \frac{t_{n+1}^k + t_{n-1}^k - 2t_n^k}{\Delta r^2} + \frac{q_v}{\rho c_p} + \varepsilon_2. \quad (7)$$

У цих виразах є залишкові доданки  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  (похибки), які враховують перехід від похідних до різницевих відношень. Похибки  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  можуть бути оцінені шляхом розкладання функції в ряд Тейлора [15]. Відкинувши залишок і позначивши число Фур'є  $Fo = \frac{a \Delta \tau}{\Delta r^2}$ , маємо рекурсивну формулу для тривимірної задачі:

$$t_1^{k+1} = Fo(t_2^k + t_3^k + t_4^k + t_5^k + t_6^k + t_7^k) + (1 - 6Fo)t_1^k. \quad (8)$$

Умова стійкості внутрішніх вузлів для тривимірних задач [15]:  $Fo \leq \frac{1}{6}$ .

Під час розрахунків були використані такі значення фізичних характеристик:  $\rho = 950$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_p = 3$  кДж/(кг·К),  $\lambda = 0.125$  Вт/(м·К) [13]. Відповідно до [14], для мазуту відносна діелектрична проникність  $\varepsilon' = 3,5-4,5$  і глибина прони-

кнення  $\text{tg}\delta = 0,013-0,03$ , що характерно для діелектриків, які досить ефективно поглинають мікрохвильову енергію.

При моделюванні мікрохвильового нагрівання нафтопродуктів для даної схеми необхідно оцінити відстань від мікрохвильового випромінювача до зливного отвору. Оскільки мікрохвильове випромінювання має бути практично повністю поглинене, слід було провести оцінку глибини проникнення, яка, в свою чергу, залежить від коефіцієнта поглинання (9)[16]:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[ \frac{1}{2} \cdot \varepsilon' \left[ \sqrt{1 + \text{tg}\delta^2} - 1 \right]^{1/2} \right] =$$

$$= \frac{2\pi}{12,24 \cdot 10^{-2}} \left[ \frac{1}{2} \cdot 4,5 \left[ \sqrt{1 + 0,03^2} - 1 \right]^{1/2} \right] =$$

$$= 2,45 \text{ м}^{-1},$$

тоді глибина проникнення (10):

$$\Delta = \frac{1}{2\alpha} = \frac{1}{2 \cdot 2,45} = 0,20 \text{ м}. \quad (10)$$

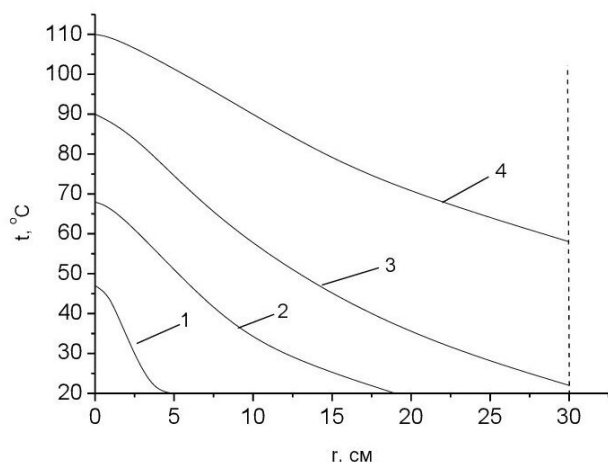
На такій відстані потік електромагнітної енергії зменшиться в  $e$  раз [16]. Приймаємо відстань до зливного отвору рівним полуторному значенню глибини проникнення  $1,5 \cdot \Delta = 30$  см: на такій відстані спостерігається достатній розігрів нафтопродукту від мікрохвильового поля та теплопровідності від шарів, розташованих ближче до джерела мікрохвильової енергії.

У ході проведення розрахунків передбачалося, що на початковому етапі зливання не проводиться, відбувається нагрівання нерухомого об'єму нафтопродукту (мазут). Після досягнення мазутом температури 60 °С (рекомендована для зливання) неподалік зливного отвору, починається його відкачування. При цьому до випромінювача починають підходити потоки нерозігрітого продукту. Процес нагрівання може тривати до тих пір, поки нафта не опуститься до рівня зливного отвору. Існують рекомендації [17], згідно з якими при об'ємах матеріалу, що розігрівається понад 20 м<sup>3</sup> і температурах навколишнього середовища нижче 10 °С, доцільно використовувати мікрохвильові установки потужністю не менше 50 кВт. На відміну від цих рекомендацій, у випадку встановлення магнетрона на невеликій висоті відносно висоти зливного отвору потужність магнетрона може бути істотно знижена, оскільки немає необхідності в розігріванні всього об'єму нафтопродукту.

Розрахунки температур мазуту проведені на відстані від 0 (джерело мікрохвильової енергії) до 30 см (зливний отвір). На рис. 2 представлено температурне поле в нафтопродукті для

різних проміжків часу [18]. Температура мазуту в часі зростає, фронт нагрітої області розширюється. Через 65 хв цей фронт досягає зливного отвору, однак температура нафти недостатня для запуску процесу відкачування.

З рис. 2 видно, що температура мазуту 60 °С поблизу зливного отвору буде досягнута через 116 хв. Витрата мазуту при його відкачуванні з урахуванням того, що довколишні шари є більш нагрітими, за приблизними розрахунками складе 0,17 кг/с. Щоб збільшити витрату, забезпечивши досягнення необхідної температури у зливного отвору 60 °С, можна встановити магнетрон більшої потужності (наприклад, 15 кВт). Тоді витрата збільшиться до 0,93 кг/с.



1 -  $\tau = 1$  хв, 2 -  $\tau = 10$  хв,  
3 -  $\tau = 65$  хв, 4 -  $\tau = 116$  хв

**Рисунок 2 – Розрахункова зміна температури мазуту в цистерні у процесі мікрохвильового нагрівання [18]**

Під час розроблення пристрою для мікрохвильового нагрівання необхідно враховувати таке [17]: об'єм продукту в цистернах може змінюватися в широких межах, і, відповідно, змінюється опір навантаження (об'єму, що нагрівається), тому виникає необхідність в узгодженні останнього з мікрохвильовим генератором, щоб уникнути пошкоджень магнетрона, який повинен бути надійно захищений від неузгодження навантаження.

### **Застосовність мікрохвильового нагрівання до інтенсифікації процесу зливання високов'язких нафтопродуктів**

Існуючі патенти та технічні рішення, запропоновані для використання мікрохвильового нагрівання нафтопродуктів, припускають, що енергія НВЧ падає на вільну поверхню рідини. Приклад такого схемного рішення наведено в [17]. У цьому патенті предметом винаходу є випромінювач у вигляді спрямованої

антени, встановленої похило до поверхні загущеного або замороженого нафтопродукту. Конструкція передбачає нагрівання продукту в резервуарі потоком мікрохвильового випромінювання, що утворюється під гострим кутом до продукту в протилежному від внутрішніх сходів напрямку, що підвищує ефективність нагрівання продукту, надійність магнетрона і мікрохвильового генератора загалом. Недоліком таких схем є те, що мікрохвильова енергія, яка падає на поверхню нафтопродукту, швидко згасає внаслідок перетворення її в тепло при переміщенні вглиб резервуара. Як показано вище, глибина проникнення мікрохвиль частотою 2450 МГц для мазуту становить 20 см, і це значення можна порівняти з глибиною проникнення інших високов'язких нафтопродуктів. Оскільки діаметр залізничної цистерни становить 3 м, то зрозуміло, що на відносно невеликій відстані від поверхні нафтопродукт не буде нагріватися мікрохвилями, зокрема теплопровідністю від верхніх шарів. При реалізації цього методу виникає необхідність в розігріванні всього об'єму нафтопродукту в цистерні, що призводить до великих втрат енергії в навколишнє середовище та збільшує тривалість процесу зливання. Проблема зниження втрат енергії для зливання високов'язких нафтопродуктів частково вирішена в [19] шляхом використання розробленого авторами патенту зливного пристрою, який передбачає локальний розігрів нафтопродукту в області зливного отвору. Вилучення нафтопродукту з нижньої частини цистерни здійснюється завдяки його нагріванню від попередньо нагрітого нафтопродукту із зовнішнього теплообмінника. Недоліком є необхідність виготовлення складного зливного пристрою. Мікрохвильове нагрівання призводить до швидкого зниження в'язкості [20], що забезпечує значну інтенсифікацію зливних операцій. Специфіка об'ємного поглинання мікрохвильової енергії виражається також у тому, що важко забезпечити рівномірність нагрівання, особливо великих об'ємів. Коли відстань від джерела до зливного отвору велика, неможливо ефективно використовувати особливості мікрохвильового перетворення енергії діелектричними матеріалами. Тому одним із технічних завдань було знайти можливість розміщення джерела випромінювання в безпосередній близькості від зливного отвору. Вирішенню цього завдання сприяло те, що люк заправки бака розташований безпосередньо над зливним отвором. Це обумовлює можливість опустити мікрохвильовий нагрівач через люк до зливного отвору, розмістивши його в трубі, яку можна з'єднати з верх-

нім люком [18]. У трубу поміщають магнетрон, випромінювач якої виходить з основи труби і розташований безпосередньо над зливним отвором, а також основні компоненти мікрохвильового пристрою: високовольтний конденсатор і трансформатор, елементи системи управління та система охолодження анодного блоку магнетрона. Щоб уникнути контактування з нафтопродуктами, випромінювач електромагнітної енергії пропонується закрити радіопрозорим ковпаком. Таким чином, метод мікрохвильового нагрівання нафтопродукту в безпосередній близькості від зливного отвору може бути практично реалізований за запропонованою схемою. При такому розташуванні джерела відносно зливного отвору в зоні зливу буде спостерігатися нагрівання і, відповідно, інтенсивне зниження в'язкості нафтопродукту, що може значно прискорити процес і знизити витрати енергії на обігрів за рахунок уникнення втрат у навколишнє середовище, що спостерігається при мікрохвильовому нагріванні від вільної поверхні нафтопродукту в цистерні.

### Висновки

Математична модель теплопровідності в умовах дії внутрішніх джерел енергії дозволяє проводити аналітичне дослідження процесу мікрохвильового нагрівання високов'язких нафтопродуктів, для яких внесок конвективних струмів у процес мікрохвильового нагрівання настільки малий, що ним можна знехтувати. На прикладі мазуту за початкової температури 20 °С, вихідній потужності магнетрона 3 кВт, відносної діелектричної проникності  $\epsilon' = 4,5$  і тангенсу кута втрат  $\text{tg}\delta = 0,03$ , через 65 хв. нагрітий фронт досягає зливного отвору, однак температура нафтопродукту неподалік отвору становить 22 °С, що недостатньо для запуску процесу відкачування. При заданих умовах температура мазуту 60 °С у зливного отвору буде досягнута через 116 хв. Витрата мазуту при його відкачуванні з урахуванням того, що довколишні шари є більш нагрітими, за орієнтовними розрахунками складе 0,17 кг/с. Щоб збільшити витрату, забезпечивши досягнення необхідної температури у зливного отвору 60 °С, можна встановити магнетрон більшої потужності (наприклад, 15 кВт). В цьому випадку витрата збільшиться до 0,93 кг/с. За даною схемою мікрохвильового нагрівання мазуту зміна витрати не впливає на економію енергії внаслідок того, що вся мікрохвильова енергія поглинається шарами нафтопродукту в цистерні в нижньої її частині та втрати в навколишнє середовище відсутні, проте час зливної операції скорочується.

Схемне рішення для мікрохвильового пристрою дозволяє розташувати джерело випромінювання в безпосередній близькості до зливного отвору. Пропонується помістити мікрохвильовий пристрій в порожню трубу, яка може бути приєднана до верхнього люка. Випромінювач мікрохвильової енергії при цьому виходить з нижньої основи труби і розташовується безпосередньо над зливом на відстані 1,5 глибини проникнення. При такому розташуванні джерела щодо зливного отвору нагрівання, і, відповідно, зниження в'язкості нафтопродукту, буде спостерігатися в зоні зливу, що здатне істотно інтенсифікувати процес і знизити витрати енергії на нагрівання в порівнянні зі схемою, за якою енергія мікрохвильового поля падає на вільну поверхню рідини.

### Література

1. Temperature Field Distribution Analysis for Cargo Oil / W. Wenfeng, Z. Jiakuo, L. Jinshu, G. Jialin, S. Fan, D. Jiajia, W. Dongze. *Thermal science*. 2020. Vol. 24, No. 5B. Pp. 3413-3421.
2. Microwave treatment in oil refining / A. Porch, D. Slocombe, J. Beutler, P. Edwards, V. Kuznetsov. *Appl Petrochem Res*. 2012. Vol. 2. Pp. 37-44.
3. Z. H. Jin. Research on Heating and Heat Preservation Process of Tanker Cargo based on fluent Platform. *Dalian Maritime University*. 2006. Pp. 42-46.
4. S. Akagi, H. Kato. Numerical Analysis of Mixed Convection Heat Transfer of a High Viscosity Fluid in a Rectangular Tank with Rolling Motion. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1987. Vol. 30, No. 11. Pp. 2423-2432.
5. S. Wei. Numerical Simulation of Steam Coil Heating Process for Large Floating Roof Oil Tank. *Chemical Engineering*. 2016. No. 7. Pp. 19-23.
6. M. Macagnan. Natural-Convection in a Tank of Oil: Experimental Validation of a Numerical Code with Prescribed Boundary Condition. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2005. Vol. 29, No. 6. Pp. 671-80.
7. W. P. Hu. Heat Transfer and Fluidity of Highly Viscous and Solid Crude-Oil in Shipwreck Tanks. *Ph. D. thesis, Dalian Maritime University, Dalian, China*. 2015. 182 p.
8. X. Zhu et al. Numerical Simulation of Flow Characteristics during Oil Tanker Cargo Heating, *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*. 2018. Vol. 37, No. 1. Pp. 55- 59.
9. R. P. Yan et al. Research Progress of Industrial Microwave Sterilization Technology in the Field of Food Processing. *Science and Technology*

of *Food Industry*.(2018), Vol. 39?No. 8. Pp. 302-308.

10. C. S. Fang, P. Lai. Microwave-Heating and Separation of Water-in-Oil Emulsions. *Microwave Power Electromagnetic Energy*. 1995. Vol. 30, No. 1. Pp. 46-57.

11. R. J. Davidson. Electromagnetic stimulation of Lloydminster heavy oil reservoirs: field test results. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 1995. Vol. 34, No. 4. Pp. 15–24.

12. A. Mukhametshina, E. Martynova. Electromagnetic Heating of Heavy Oil and Bitumen: A Review of Experimental Studies and Field. *Applications Journal of Petroleum Engineering*. 2013. 7 p.

13. Домнин И.Ф., Резинкина М.М. Расчетное исследование тепловых процессов при высокочастотном нагреве нефтепродуктов. *Вісник НТУ "ХПИ"*. 2013. № 33. С. 51-55.

14. Васильев Э., Морозов О., Степанов, Цыбко В. СВЧ-разогрев загустевших нефтепродуктов в железнодорожных цистернах. *Электроника для ТЭК*. 1999. № 6. 9 с.

15. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа. 1967. 600 с.

16. J. Tang, F. Hao, M. Lau. Microwave Heating in Food Processing. *Advances in Bioprocessing Engineering. Advances in Agricultural Science & Technology: Volume 1. World Scientific*. 2002. Pp.1-44.

17. Афанастев Б. Ф.. Устройство для нагрева загустевших и застывших нефтепродуктов в железнодорожных цистернах. *Патент RU 2 224 387C2* от 11.14.2001.

18. Бошкова І. Л., Волгушева Н. В., Тітлов О.С., Альтман Е. І., Мукмінов І. І. Дослідження ефективності застосування мікрохвильового нагрівання у нафтопродуктів. *Холодильна техніка та технологія*. 2021. 57 (2). С. 101-108.

19. Боднарчук Д. А.. Устройство для разогрева и слива высоковязких нефтепродуктов из цистерны. *Патент RU2 538 657C2* от 07.12.2012.

20. A. Sahni, M. Kumar, R.V. Knapp. Electromagnetic heating methods for heavy oil reservoirs // Proc. of Society of Petroleum Engineers SPE/AAPG. *Western Regional Meeting, Long Beach (CA)* 62550. 2000. 12 p.

### References

1. Temperature Field Distribution Analysis for Cargo Oil / W. Wenfeng, Z. Jiakuo, L. Jinshu, G. Jialin, S. Fan, D. Jiajia, W. Dongze. *Thermal science*. 2020. Vol. 24, No. 5B. Pp. 3413-3421.

2. Microwave treatment in oil refining / A. Porch, D.Slocombe, J.Beutler, P. Edwards, V.Kuznetsov. *Appl Petrochem Res*. 2012. Vol.2. Pp. 37–44.

3. Z. H. Jin. Research on Heating and Heat Preservation Process of Tanker Cargo based on fluent Platform. *Dalian Maritime University*. 2006. Pp. 42-46.

4. S. Akagi, H. Kato. Numerical Analysis of Mixed Convection Heat Transfer of a High Viscosity Fluid in a Rectangular Tank with Rolling Motion. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1987. Vol. 30, No. 11. Pp. 2423-2432.

5. S. Wei. Numerical Simulation of Steam Coil Heating Process for Large Floating Roof Oil Tank. *Chemical Engineering*. 2016. No. 7. Pp. 19-23.

6. M. Macagnan. Natural-Convection in a Tank of Oil: Experimental Validation of a Numerical Code with Prescribed Boundary Condition. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2005. Vol. 29, No. 6. Pp. 671-80.

7. W. P. Hu. Heat Transfer and Fluidity of Highly Viscous and Solid Crude-Oil in Shipwreck Tanks. *Ph. D. thesis, Dalian Maritime University, Dalian, China*. 2015. 182 p.

8. X. Zhu et al. Numerical Simulation of Flow Characteristics during Oil Tanker Cargo Heating. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*. 2018. Vol. 37, No. 1. Pp. 55- 59.

9. R. P. Yan et al. Research Progress of Industrial Microwave Sterilization Technology in the Field of Food Processing. *Science and Technology of Food Industry*.(2018), Vol. 39?No. 8. Pp. 302-308.

10. C. S. Fang, P. Lai. Microwave-Heating and Separation of Water-in-Oil Emulsions. *Microwave Power Electromagnetic Energy*. 1995. Vol. 30, No. 1. Pp. 46-57.

11. R. J. Davidson. Electromagnetic stimulation of Lloydminster heavy oil reservoirs: field test results. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 1995. Vol. 34, No. 4. Pp. 15–24.

12. A. Mukhametshina, E. Martynova. Electromagnetic Heating of Heavy Oil and Bitumen: A Review of Experimental Studies and Field. *Applications Journal of Petroleum Engineering*. 2013. 7 p.

13. Domnin I.F., Rezinkina M.M. Raschetnoe issledovanie teplovyih protsessov pri vyisokochastotnom nagreve nefteproduktov. *Vіsник NTU "HPI"*. 2013. No 33. p. 51-55.[in Russian]

14. Vasilev E., Morozov O., Stepanov, Tsyibko V. SVCh-razogrev zagustevshih nefteproduktov v zheleznodorozhnyih tsisternah. *Elektronika dlya TEK*. 1999. No 6. 9 с. [in Russian]

15. Lyikov A. V. Teoriya teploprovodnosti. M.: Vysshaya shkola. 1967. 600 p.

16. J. Tang, F. Hao, M. Lau. Microwave Heating in Food Processing. *Advances in Bioprocessing Engineering. Advances in Agricultural Science & Technology: Volume 1. World Scientific.* 2002. Pp.1-44.

17. Afanastev B. F.. Ustroystvo dlya nagreva zagustevshih i zastyivshih nefteproduktov v zhelezodorozhnyih tsisternah. Patent RU 2 224 387C2 ot 11.14.2001. [in Russian]

18. Boshkova I. L., Volgusheva N. V., Titlov O.S., Altman E. I., Mukminov I. I.. Doslidzhennya efektyvnosti zastosuvannya mikrovilovogo nagrivan'nyau naftoproduktiv. *Holodilna tehnika ta tehnologiya.* 2021. No57 (2). P. 101-108.

19. Bodnarchuk D. A.. Ustroystvo dlya razogreva i sliva vyisokovyazkih nefteproduktov iz tsisternyi. Patent RU2 538 657C2 ot 07.12.2012.

20. A. Sahni, M. Kumar, R.B. Knapp. Electromagnetic heating methods for heavy oil reservoirs // Proc. of Society of Petroleum Engineers SPE/AAPG. *Western Regional Meeting, Long Beach (CA) 62550.* 2000. 12 p.