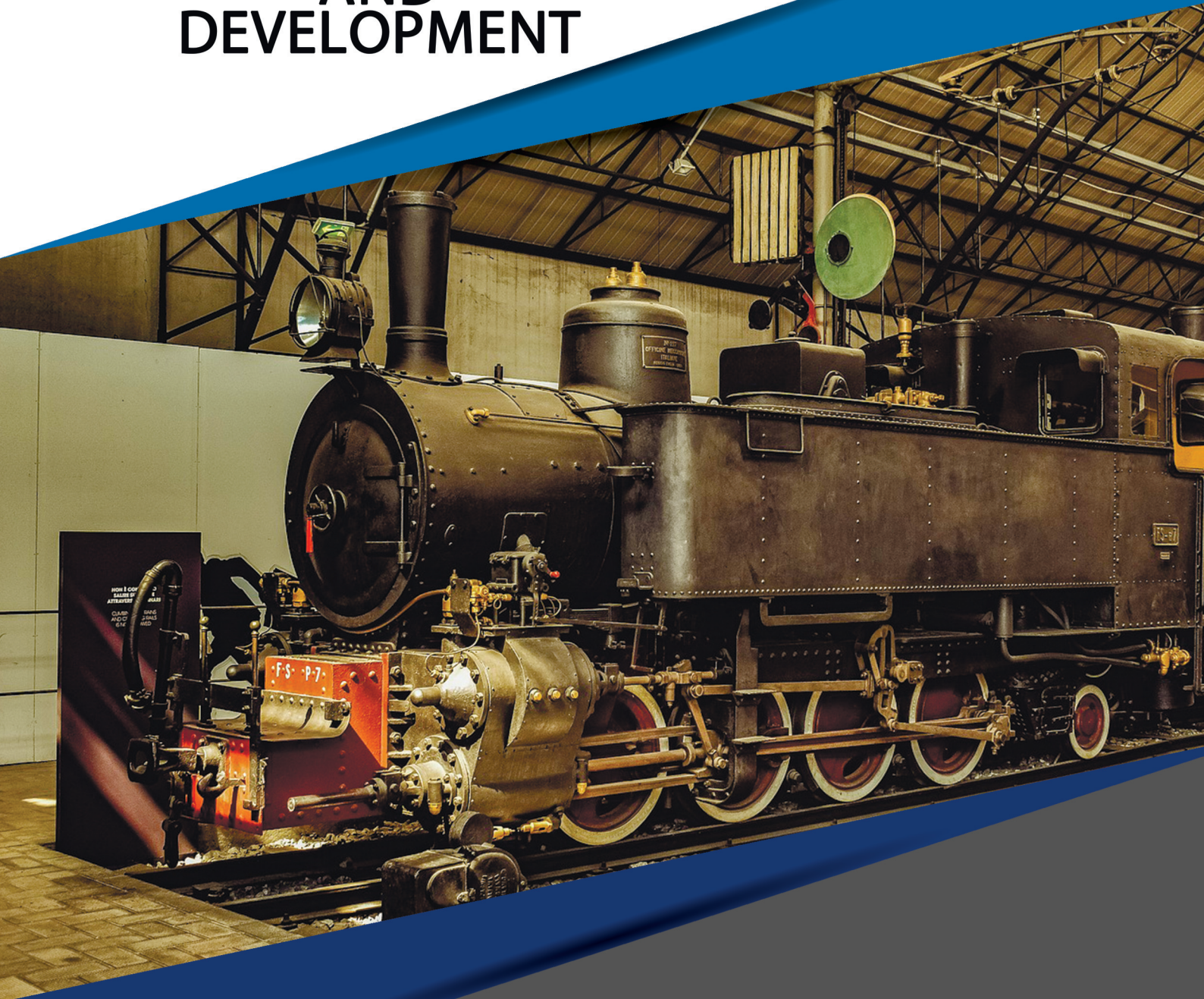


MONOGRAPH

TECHNICAL RESEARCH AND DEVELOPMENT



DOI 10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.I
ISBN 978-1-63732-136-2
BOSTON (USA) – 2021
ISG-KONF.COM

Розділ: Technical research and development/Технічні дослідження і розробки (Технічні науки).

ВИВЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО НАГРІВУ НАФТОПРОДУКТІВ

І. Л. Бошкова

Н. В. Волгушева

О.С. Тітлов

Е. І. Альтман

І. І. Мукмінов

Розглядається задача оптимізації нагріву нафтопродуктів при зливі з залізничних цистерн при використанні мікрохвильового нагрівання. Встановлено, що мікрохвильовий нагрів дозволяє значно спростити технологічну схему, виключивши всі процеси і апарати, пов'язані з підготовкою теплоносія. Визначено, що в даний час існуючі патенти і технічні рішення, запропоновані до застосування мікрохвильового нагріву для розігріву нафтопродуктів, припускають, що мікрохвильова енергія падає на вільну поверхню рідини. Стверджується, що недоліком подібних схем є істотна нерівномірність нагріву внаслідок того, що мікрохвильова енергія швидко згасає при просуванні вглиб цистерни. Відзначається, що при нагріванні від поверхні рідини в цистерні відстань від джерела до зливного отвору досить велика, внаслідок чого неможливе ефективне використання мікрохвильового нагріву. Запропоновано спосіб вирішення цієї проблеми, що полягає в установці мікрохвильового пристрою всередині порожнистої труби, яка безпосередньо приєднується до верхнього люка при підготовці до відкачування і занурюється в нафтопродукт на глибину, що корелюється з глибиною проникнення мікрохвильового поля в конкретному продукті. Проведено оцінку глибини проникнення мікрохвильової енергії в досліджуваний нафтопродукт - мазут, на підставі якої рекомендовано встановлювати відстань від

випромінювача до зливного отвору. Стверджується, що моделювання мікрохвильового нагрівання доцільно проводити на основі диференціального рівняння теплопровідності з урахуванням внутрішніх джерел теплоти. Представлено математичну модель, що описує нагрівання об'єму високов'язких нафтопродуктів як процес теплопровідності в необмеженому масиві при дії мікрохвильового випромінювання. На прикладі мазуту проведені розрахунки з використанням методу кінцевих різниць, які показали розподіл температур в масиві в різні моменти часу.

Ключові слова: мікрохвильова енергія, температура, теплопровідність, глибина проникнення, потужність, злив нафтопродукту, цистерна

1. Вступ

При створенні ресурсо- та енергозберігаючих, екологічно безпечних технологій застосування мікрохвильового випромінювання є одним з найперспективніших напрямів. Нагрівання в мікрохвильовому полі характеризується високою швидкістю і великою ефективністю. Застосування енергії мікрохвиль замість використовуваних в даний час в більшості промислових установок теплоносіїв дозволяє 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 нагріву є нагрів 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, з залізничних цистерн. Злив ведуть з використанням декількох способів: більш текучим розчинником, за допомогою підігріву продукту насиченою водяною парою, з використанням мікрохвильових установок, циркуляційним методом з

використанням змієвикових підігрівачів, а також модифікаціями і комбінуванням цих методів. Підігрів продукту насиченою водяною відкритою парою неможливий для деяких продуктів, що не допускають обводнення, наприклад, мазуту, тому що в результаті обводнення знижується ефективність горіння 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 привести до викиду продукту в люк. Вважається перспективним застосування енергії мікрохвильового поля, однак недоліком цього методу є нерівномірний нагрів, також пов'язаний з низькою теплопровідністю продукту і практично повною відсутністю конвекції нафтопродукту в цистерні.

2. Аналіз літературних джерел

Для розвитку методу мікрохвильового нагріву нафти проводиться вивчення теплових ефектів і температурних полів в продукті. Дослідження [1] направлено на підвищення ефективності теплопередачі в'язкої нафти і рішення проблем нерівномірного розподілу температури і поглинання енергії в процесі нагрівання нафти в нафтовому резервуарі. Розподіл температури нафтопродукту більш збалансований при комбінованому впливі джерел нагріву. Результати цього дослідження можуть надати теоретичну основу для вивчення закону теплопередачі в процесі комбінованого нагріву парою нафтових цистерн і мікрохвильового нагріву. В [2] розглядаються особливості нагріву нафтопродуктів в мікрохвильовому полі і представлена базова теорія ефективного нагріву. При цьому слід уникати перегріву нафти в локальних її областях [3], що збільшує 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], Маканьян і інші [6], Ху [7], Чжу та інші [8] досліджували зміну характеристик поля температури і витрати методами чисельного моделювання та отримали характеристики процесу нагріву нафтопродуктів.

Розроблені технології мікрохвильового нагріву характеризуються високою інтенсивністю і ефективністю. Ці переваги дозволяють використовувати мікрохвильовий нагрів при сушінні харчових продуктів, зниження в'язкості масла, 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 маслом викличе регіональні відмінності в розподілі поля температури. З точки зору аналізу процесу теплопередачі [1], під час мікрохвильового нагріву молекули масла 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 нагріву нафтоналивних танкерів є здійсненним і його доцільно досліджувати для подальшого застосування в промисловості. Однак існує необхідність проведення аналітичних і експериментальних досліджень процесу нагріву нафтопродуктів в мікрохвильовому полі для вирішення окремих завдань, однією з яких є інтенсифікація зливу високов'язких нафтопродуктів з залізничних цистерн.

Аналітичне дослідження процесу мікрохвильового нагріву високов'язких нафтопродуктів

Для опису процесу нагріву циліндричного резервуара з нафтопродуктами, що піддаються впливу високочастотного електромагнітного випромінювання, в [13] застосовано рівняння теплопровідності в циліндричних координатах. Аналіз роботи дозволяє зробити висновок, що запропонований метод математичного моделювання мікрохвильового нагрівання нафтопродуктів може бути прийнятий за основу. Моделювання мікрохвильового нагріву

високов'язких нафтопродуктів доцільно проводити на основі диференціального рівняння теплопровідності з урахуванням внутрішніх джерел теплоти. Однак безпосередньо використовувати запропоновані результати неможливо, тому що в даній роботі розглядається процес нагріву 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 приймає наступний вигляд:

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

де a - коефіцієнт температуропровідності, ρ - густина нафтопродукту, c_p - його теплоємність.

Умови однозначності прийняті наступні:

- нафтопродукт представляє необмежений масив;
- початковий розподіл температури масиву є однорідним.

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

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

Граничною умовою є $\left(\frac{\partial t}{\partial r} \right)_{r=\infty} = 0$, де $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ (Початок

координат поміщено в розглянутий об'єм).

При розрахунку температур застосовувався метод кінцевих різниць.

У розрахунках були використані наступні значення фізичних характеристик: $\rho = 950 \text{ кг/м}^3$, $c_p = 3 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$, $L = 300 \text{ кДж/кг}$, $\lambda = 0.125 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ [13]. Відповідно до [14], для мазуту відносна діелектрична проникність $\varepsilon' = 3,5-4,5$ і глибина проникнення $\text{tg}\delta = 0,013-0,03$, що характерно для діелектриків, які досить ефективно поглинають мікрохвильову енергію.

При моделюванні мікрохвильового нагріву 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 (3):

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[\frac{1}{2} \cdot \varepsilon' \left[\sqrt{1 + \text{tg}\delta^2} - 1 \right] \right]^{1/2} = \frac{2\pi}{12,24 \cdot 10^{-2}} \left[\frac{1}{2} \cdot 4,5 \left[\sqrt{1 + 0,03^2} - 1 \right] \right]^{1/2} = 2,45 \text{ м}^{-1}, \quad (3)$$

тоді глибина проникнення (4):

$$\Delta = \frac{1}{2\alpha} = \frac{1}{2 \cdot 2,45} = 0,20 \text{ м}. \quad (4)$$

На такій відстані потік електромагнітної енергії зменшиться в e раз. Приймаємо відстань до зливного отвору рівним полуторному значенню Δ - 30 см.

При проведенні розрахунків передбачалося, що на початковому етапі злив не проводиться, йде нагрів нерухомого об'єму нафтопродукту (мазут). Після досягнення температури мазуту 60°C (рекомендована для зливу) близько зливного отвору, починається його відкачування. При цьому до випромінювача починають підходити потоки не розігрітого продукту. Процес нагріву може тривати до тих пір, поки нафта не опуститься до рівня зливного отвору. Існують рекомендації [15], згідно з якими при об'ємах матеріалу, що розігрівається

понад 20 м^3 і температурах навколишнього середовища нижче 10°C , доцільно використання мікрохвильових установок потужністю не менше 50 кВт . На відміну від цих рекомендацій, при установці магнетрона на невеликій висоті щодо зливного отвору потужність магнетрона може бути істотно знижена, оскільки немає необхідності розігріву всього об'єму нафтопродукту.

Розрахунки температур мазуту проведені на відстані від 0 (джерело мікрохвильової енергії) до 30 см (зливний отвір). На рис. 1 представлено температурне поле в нафтопродукті для різних проміжків часу.

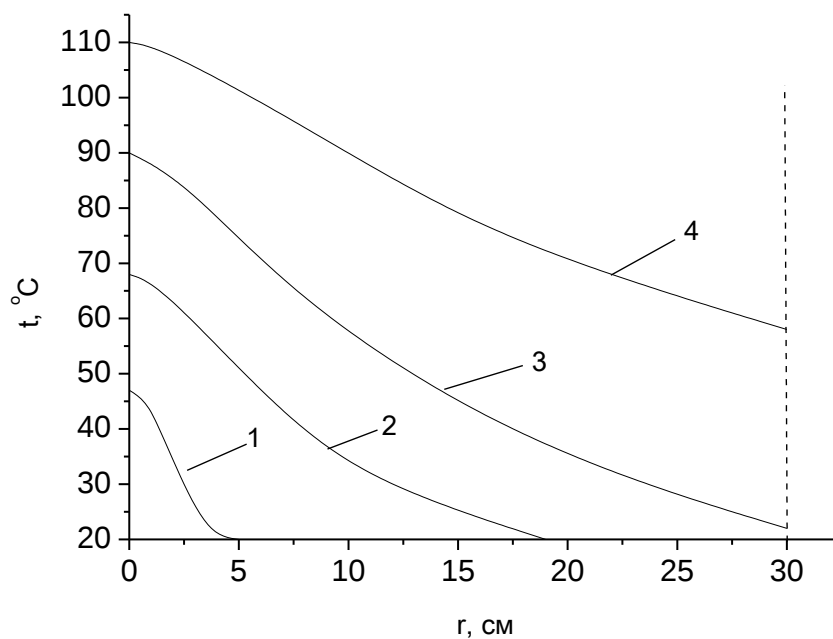


Рисунок 1 - Розрахункова зміна температури мазуту в цистерні при мікрохвильовому нагріванні.

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

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. 1 видно, що температура мазуту 60°C у зливного отвору буде досягнута через 116 хв. Витрата мазуту при його відкачуванні з урахуванням того, що довколишні шари є більш нагрітими, складе $0,17 \text{ кг/с}$. 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.

При розробці пристрою для мікрохвильового нагріву має враховуватися наступне [15]: об'єм продукту в цистернах може змінюватися в широких межах, і, відповідно, змінюється опір навантаження (об'єму, що нагрівається), тому виникає необхідність узгодження останнього з мікрохвильовим генератором щоб уникнути пошкоджень магнетрона, який повинен бути надійно захищений від неузгодження навантаження.

Аналіз застосовності мікрохвильового нагріву до інтенсифікації зливу високов'язких нафтопродуктів

Існуючі патенти і технічні рішення, запропоновані до застосування мікрохвильового нагріву для розігріву нафтопродуктів, припускають, що мікрохвильова енергія падає на вільну поверхню рідини. Приклад такого схемного рішення представлений на рис. 2. В даному патенті предмет винаходу є випромінювач у вигляді спрямованої антени, встановленої похило до поверхні загустілого або застиглого нафтопродукту, при цьому передаюча лінія забезпечена додатковим прямим хвилеводом, встановленим між хвилеводним зломом і кришкою-екраном. У конструкції передбачається нагрів продукту в цистерні потоком мікрохвильового випромінювання, сформованим під гострим кутом до продукту в протилежному від внутрішніх сходів напрямку, що підвищує ефективність нагріву продукту, надійність роботи магнетрона і в цілому мікрохвильового генератора.

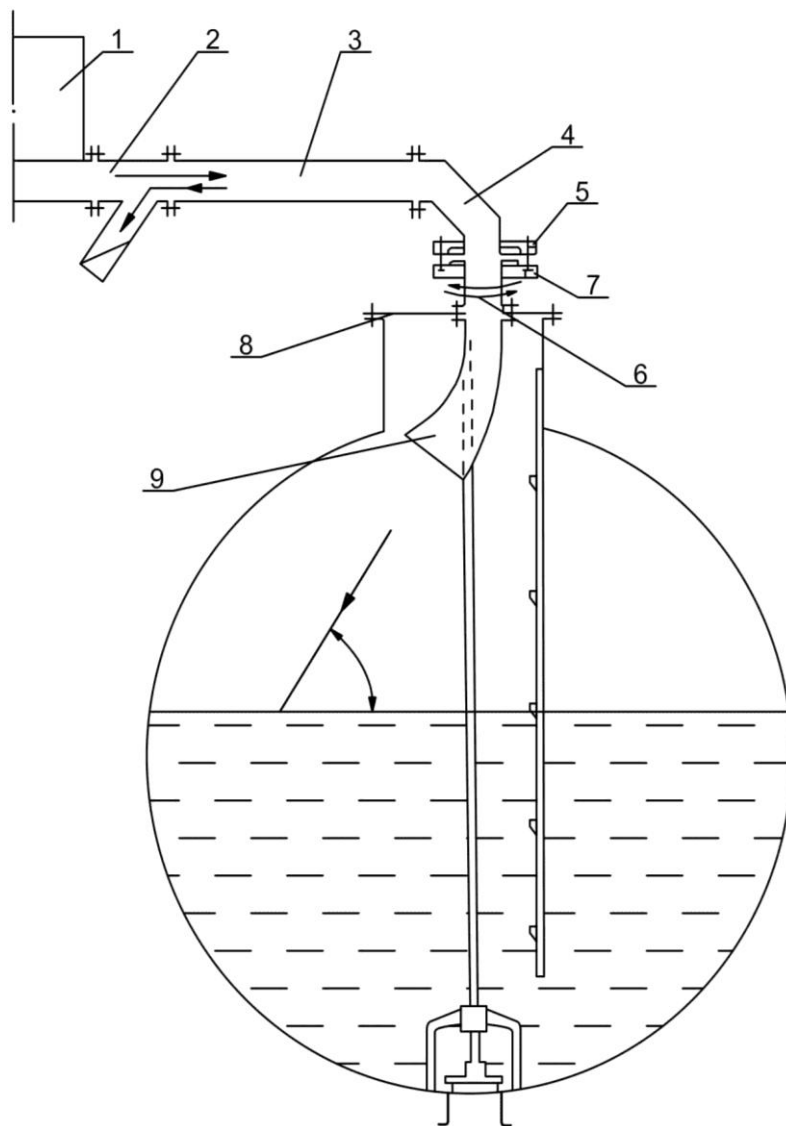


Рисунок 2 - Схема розташування мікрохвильового пристрою в цистерні з нафтопродуктами [15]

1 - мікрохвильовий модуль, 2 - циркулятор, 3 - прямий хвилевід, 4 - хвилеводний злам, 5 - фланець, 6 - додатковий прямий хвилевід, 7 - фланець, 8 - кришка-екран, 9 - випромінювач

Недоліком подібних схем є те, що мікрохвильова енергія, падаюча на поверхню нафтопродукту, швидко згасає внаслідок перетворення її в теплову при просуванні вглиб цистерни. Як було показано вище, глибина проникнення для мазуту становить 20 см, і це значення можна порівняти з глибиною проникнення інших високов'язких нафтопродуктів. Оскільки діаметр залізничної цистерни становить 3 м., ясно, що на відносно невеликій відстані

від поверхні нафтопродукт не буде нагрітий. Ця проблема частково вирішена в [16]. Для забезпечення більш рівномірного нагріву передбачений відбір холодного нафтопродукту з донної частини ємності, розігрів його в зовнішньому теплообміннику і подачу розігрітого нафтопродукту за допомогою насоса в донну частину ємності з використанням сопел, використання попередньо підігрітого нафтопродукту на початковому циклі відбору холодного нафтопродукту, і безперервну циркуляцію нафтопродукту. Мікрохвильовий нагрів [17] важкої нафти показує, що в'язкість значно знижується, завдяки чому забезпечується істотна інтенсифікація її притоку. Специфіка об'ємного поглинання мікрохвильової енергії виражаються також в тому, що складно забезпечити рівномірність нагріву, особливо великих об'ємів. Пропонується використання магнетронів великої потужності, щоб забезпечити рухливість шарів, віддалених від джерела. Однак відстань від джерела до зливного отвору досить велике, що не дозволяє ефективно використовувати особливості перетворення мікрохвильової енергії діелектричними матеріалами. Тому одним із завдань даної роботи було знайти можливість розташувати джерело випромінювання в безпосередній близькості до зливного отвору. Рішення завдання полегшувалося тим, що люк для заправки цистерни розташований безпосередньо над зливним отвором. Тому є можливість через люк опустити випромінювач до зливного отвору. Для цього можна виготовити порожню трубу, яка може бути приєднана до верхнього люка, і в якій буде розташовуватися мікрохвильовий пристрій. Як показали розрахунки, вихідна потужність магнетрона повинна бути не менше 3 кВт. Тоді для охолодження анодного блоку магнетрона повинна бути передбачена система водяного охолодження. У порожню трубу поміщається магнетрон, випромінювач якої виходить з основи труби і розташовується безпосередньо над зливним отвором. У повітряному каналі також розташовуються основні компоненти мікрохвильового пристрою: високовольтні конденсатор і трансформатор, елементи системи управління. Схематично розташування знімної повітряної

труби для мікрохвильового пристрою в залізничній цистерні представлено на рис. 3.

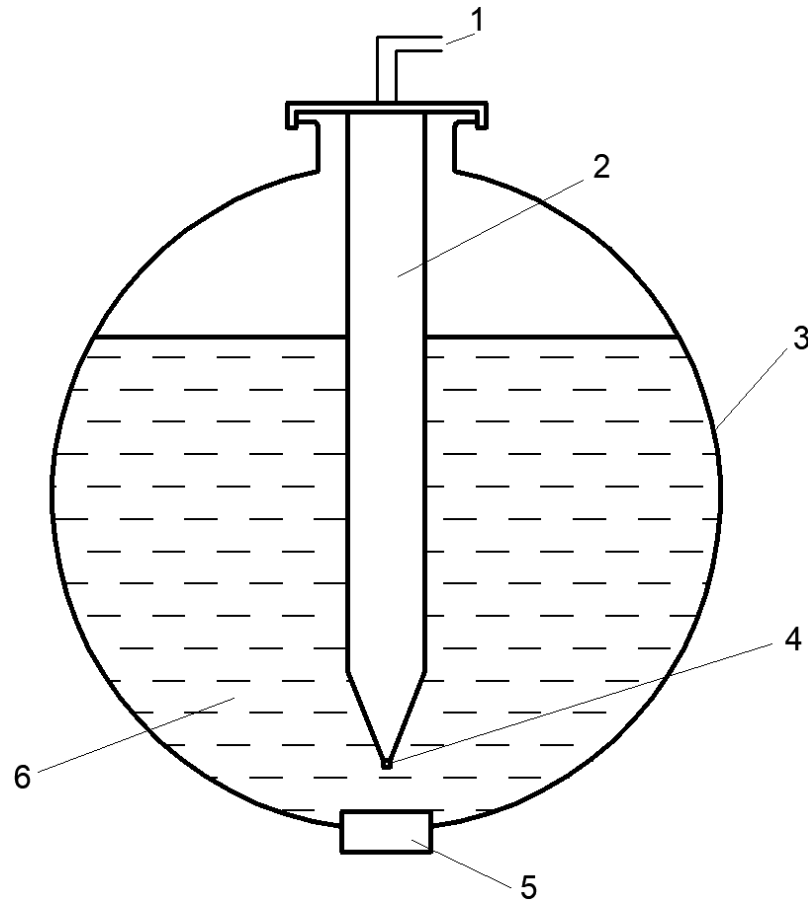


Рисунок 3 - Схема поздовжнього перерізу цистерни з мікрохвильовим пристроєм

1 - канал для пристрою системи управління магнетроном і системи охолодження магнетрона, 2 - повітряний канал, 3 - цистерна з нафтопродуктом, 4 - випромінювач мікрохвильової енергії, 5 - вихідний отвір, 6 - нафтопродукт

Випромінювач електромагнітної енергії для виключення контакту його з нафтопродуктом пропонується покривати радіопрозорим ковпачком. Таким чином, метод мікрохвильового нагріву нафти в безпосередній близькості від зливного отвору може бути практично реалізований при використанні пропонованої схеми. При такому розташуванні джерела (рис. 3) щодо зливного отвору нагрів, і, відповідно, зниження в'язкості нафтопродукту, буде спостерігатися в зоні зливу, що здатне істотно інтенсифікувати процес і знизити витрати енергії на нагрів.

Висновки

Проведено аналітичне дослідження процесу мікрохвильового нагріву нафтопродукту на прикладі мазуту. Отримано, що температура мазуту в часі зростає, фронт нагрітої області розширюються. Для початкової температури 20 °С через 65 хв. гарячий фронт досягає зливного отвору, однак температура нафти недостатня для запуску процесу відкачування. При заданих умовах (початкова температура 20 °С, вихідна потужність магнетрона 3 кВт, відносна діелектрична проникність $\epsilon' = 4,5$ і тангенс кута втрат $\tan \delta = 0,03$) 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, 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.

Схемне рішення для мікрохвильового пристрою дозволяє розташувати джерело випромінювання в безпосередній близькості до зливного отвору. Пропонується помістити мікрохвильове 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 нагрів, і, відповідно, зниження в'язкості нафтопродукту, буде спостерігатися в зоні зливу, що здатне істотно інтенсифікувати процес і знизити витрати енергії на нагрів.

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. И.Ф. Домнин, М.М. Резинкина. Расчетное исследование тепловых процессов при высокочастотном нагреве нефтепродуктов. *Вісник НТУ "ХПІ"*. 2013. № 33. С. 51-55.
14. Э.Васильев, О.Морозов, С.Степанов, В.Цыбко. СВЧ-разогрев загустевших нефтепродуктов в железнодорожных цистернах. *Электроника для ТЭК*. 1999. № 6. 9 с.
15. Б. Ф. Афанастев. Устройство для нагрева загустевших и застывших нефтепродуктов в железнодорожных цистернах. *Патент RU 2 224 387 C2* от 11.14.2001.
16. Д. А. Боднарчук. Устройство для разогрева и слива высоковязких нефтепродуктов из цистерны. *Патент RU 2 538 657 C2* от 07.12.2012.
17. 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.