

**И.Ф. ДОМНИН**, д.т.н., проф., директор, Институт ионосферы, Харьков;  
**М.М. РЕЗИНКИНА**, д.т.н., в.н.с., НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

## РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ НАГРЕВЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Выполнен численный расчет тепловых процессов, которые имеют место при действии электромагнитного поля (ЭМП) на нефтепродукты. С помощью численных экспериментов проанализированные зависимости продолжительности нагрева для достижения заданной температуры от частоты приложенного ЭМП. Показано, что использование нескольких источников ЭМП, расположенных вдоль длины цилиндрической емкости с нефтепродуктами, может позволить существенно уменьшить продолжительность нагрева.

**Ключевые слова:** электромагнитное поле, нагрев, источник, нефтепродукты, тепловой процесс.

**Введение.** Как отмечается в ряде работ (см., например, [1–5]), одним из перспективных методов борьбы с выпадением парафинов и газогидратов, которые при определенных условиях закупоривают нефтяные и газовые скважины или трубопроводы в процессе их эксплуатации, является применение высокочастотного электромагнитного излучения. Однако данная технология еще не доведена до широкого промышленного применения. Целью работы является расчетное исследование тепловых процессов при высокочастотном нагреве нефтепродуктов для выбора оптимальных режимов обработки.

**Постановка задачи математического моделирования процесса микроволнового нагрева.** Для описания процесса нагрева по сечению цилиндрического резервуара с нефтепродуктами, подвергающимися воздействию высокочастотного электромагнитного излучения, используем двумерное уравнение теплопроводности [3]:

$$\rho c_T \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(z, t),$$

где  $T$  – температура;  $\rho$ ,  $c_T$ ,  $\lambda$  – плотность, теплоемкость и теплопроводность нагреваемой среды соответственно;  $Q(z, t)$  – плотность мощности объемного тепловыделения.

Будем полагать, что мощность излучения распределяется равномерно по сечению цилиндра, а показатель поглощения электромагнитного излучения [2, 3, 5]:

$$\alpha = \frac{2\pi f}{3 \cdot 10^8} \sqrt{\varepsilon} \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

где  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь;  $\varepsilon$  – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости независимая от температуры,

поскольку рассматривается случай приложения электромагнитных полей частотой  $f$  не меньшей десятков мегагерц [3]. Тогда  $Q$  можно записать в виде [3]:

$$Q = \frac{P \cdot \alpha \cdot \exp(-\alpha z)}{\pi R^2},$$

где  $P$  – мощность ЭМП;  $R$  – радиус цилиндрического резервуара.

Как показано в [5], потери в стенках металлического резервуара малы по сравнению с высокочастотными потерями в объеме обрабатываемых нефтепродуктов, поэтому поглощение излучения в стенках труб обычно не учитывается [3].

Рассмотрим случай теплоизолированной трубы. Тогда граничные условия при  $r = R$ ,  $z = 0$ ,  $z = H$  (где  $H$  – высота цилиндрического резервуара):  $\partial T / \partial z |_{r=R} = 0$ ,  $\partial T / \partial z |_{z=0} = 0$ ,  $\partial T / \partial z |_{z=H} = 0$ . Граничное условие при  $r = 0$  – условие аксиальной симметрии –  $\partial T / \partial r |_{r=0} = 0$ .

При расчетах будем полагать, что теплопроводность и плотность обрабатываемых нефтепродуктов не зависят от температуры их нагрева, а теплоемкость можно представить в виде функции, имеющей  $\delta$ -особенность при температуре фазового перехода  $T_S$  (см., например, [5]):

$$c_T = c_0 + L \cdot \delta(T - T_S),$$

где  $L$  – скрытая теплота фазового перехода;  $\delta$ -дельта-функция.

**Численные эксперименты по исследованию влияния частоты электромагнитного излучения на характер процесса нагрева нефтепродуктов.** При расчетах были использованы следующие значения констант, которые характеризуют электрофизические параметры нефтепродуктов и для высокопарафинистой нефти имеют следующие значения:  $\rho = 950 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_0 = 3 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ ,  $T_S = 50^\circ\text{C}$ ,  $L = 300 \text{ кДж/кг}$ ,  $\lambda = 0.125 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ,  $\varepsilon = 2.3$ ,  $\text{tg}\delta = 0.012$  [5].

Для того чтобы оценить эффективность применения высокочастотного электромагнитного излучения для разогрева нефтепродуктов, рассмотрим случай, когда нефть перевозится в железнодорожной цистерне, и необходимо расплавить образовавшиеся в ней и выпавшие в осадок тяжелые фракции. Полагалось, что цистерна представляет собой цилиндр длиной 20 м с диаметром внутреннего сосуда 2.5 м [6]. Определим расчетным путем время, необходимое для нагрева нефти от  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  до  $T_{н1} = 49^\circ\text{C}$  – температуры, близкой к температуре фазового перехода. Рассмотрим идеализированный случай применения источников, генерирующих плоские волны. При расчете полагалось, что источник расположен в торце цистерны и генерирует волны в одну сторону. На рис. 1 показаны рассчитанные зависимости времени, требуемого для достижения температуры нефти не ниже  $T_{н1}$  в исследуемом

объеме цистерны, от частоты приложенного ЭМП при различной мощности источника излучения  $P$ .

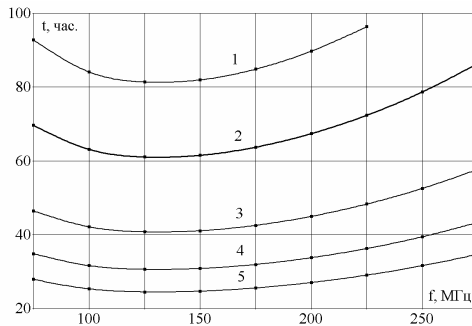


Рис. 1 – Рассчитанные зависимости  $t$  – времени, требуемого для достижения температуры нефти не ниже  $49^{\circ}\text{C}$  в исследуемом объеме цистерны, от частоты приложенного ЭМП  $f$  при различной мощности источника излучения  $P$  (1 –  $P = 75$  кВт, 2 –  $P = 100$  кВт, 3 –  $P = 150$  кВт, 4 –  $P = 200$  кВт, 5 –  $P = 250$  кВт)

Как видно из рис. 1, зависимости  $t(f)$  имеют выраженный минимум, величина которого слабо зависит от уровня  $P$  и составляет для рассмотренных случаев порядка 120 МГц.

Как показало проведенное математическое моделирование процесса прогрева, при размещении источника излучения в торце цилиндрической емкости, содержащей нефтепродукты, как описано в большинстве публикаций (см. например [1–4]), распределение температуры по длине цистерны оказывается весьма неравномерным, а нагрев до  $T_{\text{н1}}$ , близкой к  $T$  фазового перехода ( $49^{\circ}\text{C}$ ) достигается за достаточно большой промежуток времени:  $t > 24$  ч (см. рис. 1). Для решения данной проблемы предлагается размещать несколько источников электромагнитного излучения по длине цистерны. Для оценки эффективности такого подхода рассмотрен идеализированный случай применения источников, генерирующих плоские волны в обе стороны. При этом суммарная мощность источников электромагнитного излучения полагается той же, что и для случая наличия одного источника, расположенного в торце цистерны (см. рис. 1). На рис. 2 представлены рассчитанные зависимости времени, требуемого для достижения минимальной температуры нефти  $T_{\text{н1}}$  в исследуемом объеме, от частоты приложенного ЭМП для случая использования четырех одинаковых источников, расположенных равномерно по длине цистерны (на расстоянии 2.5 м от ее торцов и 5 м друг от друга). Суммарная мощность источников при этом составляла  $P$ .

Как видно из рис. 2, как и для случая использования одного источника (см. рис. 1), зависимости  $t(f)$  имеют минимум, величина которого для рассмотренного случая составляет порядка 500 МГц.

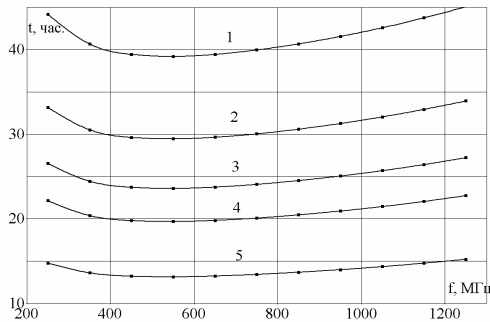


Рис. 2 – Рассчитанные зависимости  $t$  – времени, требуемого для достижения температуры нефти не ниже  $49^{\circ}\text{C}$  в исследуемом объеме цистерны, от частоты приложенного ЭМП при различной суммарной мощности источников излучения  $P$  (1 –  $P = 60$  кВт, 2 –  $P = 80$  кВт, 3 –  $P = 100$  кВт, 4 –  $P = 120$  кВт, 5 –  $P = 180$  кВт)

Из анализа проведенного моделирования электротепловых процессов следует, что использование нескольких источников, расположенных по длине цистерны, оказывается существенно эффективнее, чем при расположении одного источника в ее торце, как предлагается в [1–4].

**Закключение.** Для выбора оптимальных режимов электромагнитного воздействия на нефтепродукты целесообразно использовать математическое моделирование происходящих электротепловых процессов. С помощью такого подхода на примере разогрева нефтепродуктов, перевозимых в железнодорожной цистерне, показано, что использование нескольких источников электромагнитного излучения, расположенных по длине цистерны и излучающих электромагнитные волны в обе стороны, существенно эффективнее, чем нагрев с одного из торцов: время нагрева при этом может быть уменьшено в 2 – 2.5 раза.

**Список литературы:** 1. Кислицын А.А., Нигматулин Р.И. Численное моделирование процесса нагрева нефтяного пласта высокочастотным электромагнитным излучением // ПМТФ. – 1990. – № 4. – С. 59-64. 2. Кислицын А.А. Численное моделирование прогрева и фильтрации нефти в пласте под действием высокочастотного электромагнитного излучения // ПМТФ. – 1993. – № 7. – С. 97-103. 3. Кислицын А.А. Численное моделирование высокочастотного электромагнитного прогрева диэлектрической пробки, заполняющей трубу // ПМТФ. – 1996. – Т. 37, № 3. – С. 75-82. 4. Балакирев В.А., Сотников Г.В., Ткач Ю.В., Яценко Т.Ю. Разрушение асфальто-парафиновых отложений в нефтяных трубопроводах движущимся источником высокочастотного электромагнитного излучения // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71, вып. 9. – С. 1-8. 5. Балакирев В.А., Сотников Г.В., Ткач Ю.В., Яценко Т.Ю. ВЧ метод устранения парафиновых пробок в оборудовании нефтяных скважин и нефтяных трубопроводах // Электромагнитные

явления. – 1998. – Т. 1, № 4. – С. 552-561. 6. Большая энциклопедия нефти и газа [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ngpedia.ru/id365000p1> (дата обращения: 01.11.2013).

*Поступила в редколлегию 19.11.2013*

УДК 621.317.42

**Расчетное исследование тепловых процессов при высокочастотном нагреве нефтепродуктов / И.Ф. Домнин, М.М. Резинкина // Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2013. – № 33 (1066). – С. 51-55. Бібліогр.: 6 назв.**

Виконано чисельний розрахунок теплових процесів, які мають місце при дії електромагнітного поля (ЕМП) на нафтопродукти. За допомогою чисельних експериментів проаналізовані залежності тривалості нагріву щодо досягнення заданої температури від частоти прикладеного ЕМП. Показано, що використання кількох джерел ЕМП, розташованих уздовж довжини циліндричної ємності з нафтопродуктами, може дозволити суттєво зменшити тривалість нагріву.

**Ключові слова:** електромагнітне поле, нагрів, джерело, нафтопродукти, тепловий процес.

Numerical calculations of the heat processes, which occur upon electromagnetic field (EMF) influence on petrol have been performed. Dependencies of heating duration for achievement of the assigned temperature from frequency of the applied EMF have been analyzed with the help of numerical experiments. It is shown that usage of several EMF sources, located along the length of the cylindrical volume containing petrol may allow substantial reduction of the heating duration.

**Keywords:** electromagnetic field, heating, source, petrol, thermal process.