

**И. Ф. ДОМНИН**, д-р техн. наук, проф., директор, Институт ионосферы, Харьков;

**М. М. РЕЗИНКИНА**, д-р техн. наук, в.н.с., НТЦ МТО НАН Украины, Харьков;

**А. И. РЕЗНИЧЕНКО**, студент, НТУ “ХПИ”

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ НАГРЕВЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ ДЛЯ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ И КОЛИЧЕСТВА ИСТОЧНИКОВ**

С помощью компьютерного моделирования электротепловых процессов при действии высокочастотного электромагнитного поля на нефтепродукты, которые находятся в железнодорожной цистерне, оценены значения оптимальных частот и количества источников, необходимых для достижения температуры нагрева от 10°C до 60°C. Показано, что использование 4-х источников ЭМП суммарной мощности  $P_{\Sigma}$ , расположенных вдоль длины цистерны, позволяет существенно уменьшить продолжительность нагрева по сравнению с использованием одного источника той же мощности  $P_{\Sigma}$ .

**Ключевые слова:** микроволновой нагрев, электромагнитное поле, теплоемкость, оптимальная частота, эффективность.

За допомогою комп'ютерного моделювання електротеплових процесів при дії високочастотного електромагнітного поля на нафтопродукти, які знаходяться у залізничній цистерні, оцінені значення оптимальних частот та кількості джерел щодо досягнення температур нагріву від 10°C до 60°C. Показано, що використання 4-х джерел ЕМП сумарної потужності  $P_{\Sigma}$ , розташованих уздовж довжини цистерни, дозволяє суттєво зменшити тривалість нагріву у порівнянні з використанням одного джерела тієї ж потужності  $P_{\Sigma}$ .

**Ключові слова:** мікрохвильовий нагрів, електромагнітне поле, теплоємність, оптимальна частота, ефективність.

The levels of the optimum frequencies and numbers of EMF sources for heating petrol from 10°C to 60°C have been estimated with the help of electrical-heating processes computer modeling for the case of radio-frequency EMF action on petrol, located in a railway cistern. It is shown that usage of four EMF sources with total power  $P_{\Sigma}$ , located along a cistern length allows reducing greatly heating duration in comparison with the case of one source with the same power.

**Keywords:** microwave heating, electromagnetic field, heat, optimal frequency, efficiency.

**Введение.** В конце XX – начале XXI вв. появились публикации, посвященные использованию высокочастотного электромагнитного излучения для нагрева нефтепродуктов с целью интенсификации добычи высоковязкой нефти за счет повышения ее текучести при разогреве и возрастания притока в скважину [1 – 3]. Предлагалось также использовать данную технологию для борьбы с выпадением парафинов и газогидратов, которые при определенных условиях закупоривают нефтяные и газовые

© И. Ф. Домнин, М. М. Резинкина, А. И. Резниченко, 2013

скважины или трубопроводы в процессе их эксплуатации [4, 5]. Наконец, была рассмотрена возможность реализации идеи использования передвижного источника высокочастотного электромагнитного излучения для создания “электромагнитного крота”, расплавляющего и ликвидирующего асфальто-парафиновые и газогидратные пробки в нефтепроводах [6]. Однако данные технологии все еще не доведены до промышленного применения. В большой степени это связано с тем, что для достижения ощутимого нагрева длительность обработки электромагнитным полем (ЭМП) должна составлять до десятков суток [3, 5].

Традиционно источники ЭМП размещают в торце цилиндрических резервуаров (например, нефтепроводов, скважин, цистерн), в которых находится обрабатываемая нефть. При этом увеличение частоты используемого излучения вызывает повышение эффективности нагрева, однако одновременно происходит усиление затухания ЭМП по длине протяженных цилиндрических резервуаров, что приводит к резкой неравномерности нагрева (из-за весьма теплопроводности нефтепродуктов), для выравнивания которой требуются весьма длительные периоды времени.

**Целью данной работы** является использование компьютерного моделирования электротепловых процессов при высокочастотном нагреве нефтепродуктов для выбора частоты и количества источников ЭМП, обеспечивающих снижение периода нагрева до приемлемых значений. При этом рассмотрен случай, когда необходимо расплавить образовавшиеся в нефтепродуктах тяжелые фракции при перевозке в железнодорожных цистернах.

**Уравнения, описывающие электротепловые процессы микроволнового нагрева нефтепродуктов.** Учитывая аксиальную симметрию задачи, для описания процесса нагрева в объеме цилиндрического резервуара, полностью заполненного нефтепродуктами, подвергающимися воздействию высокочастотного электромагнитного излучения, используем двумерное уравнение теплопроводности [3]:

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

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

Будем полагать, что показатель поглощения  $\alpha$  не зависит от температуры, поскольку рассматривается случай приложения ЭМП частотой  $f$  не меньшей десятков мегагерц [3]. Если принять, что мощность излучения распределяется равномерно по сечению цилиндра, то  $Q$  можно записать в виде [3]:

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

где  $P$  – мощность ЭМП;  $R$  – радиус цилиндрического резервуара;  $\alpha = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon' \operatorname{tg} \delta}$  [4, 5];  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь;  $\varepsilon'$  – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с;  $\omega$  – круговая частота приложенного ЭМП.

Как показано в [4, 5], потери в стенках металлического резервуара малы по сравнению с высокочастотными потерями в объеме обрабатываемых нефтепродуктов, поэтому они могут не учитываться.

Рассмотрен случай теплоизолированной трубы, тогда граничные условия при  $r = R$ ,  $z = 0$ ,  $z = H$  (где  $H$  – длина 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 полагалось, 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]):

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

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

Решение задачи расчета нагрева нефтепродуктов в цистерне находилось с помощью метода конечных разностей [8]. Для этого расчетная область, представляющая собой сечение, проходящее через ось заполненной нефтепродуктами цистерны, разбивалась прямоугольной расчетной сеткой. Использовалась цилиндрическая система координат с осями  $r$ ,  $z$  и учитывалась осевая симметрия. При этом ось  $Oz$  совпадала с осью цилиндра. Уравнения вида (1) записывались для всех узлов расчетной сетки и решались с помощью прогонки методом переменных направлений [8].

При численном моделировании электротепловых процессов использовались следующие значения констант:  $\rho = 950$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_0 = 3$  кДж/(кг·К),  $T_S = 50$  °С,  $L = 300$  кДж/кг,  $\lambda = 0.125$  Вт/(м·К),  $\varepsilon' = 2.3$ ,  $\operatorname{tg} \delta = 0.012$  [4, 5].

**Выбор оптимальной частоты и количества источников при высокочастотном нагреве нефтепродуктов.** Будем моделировать электротепловые процессы при нагреве нефти, перевозимой в железнодорожной цистерне, представляющей собой цилиндр длиной 20 м с

диаметром внутреннего сосуда 2.5 м [9]. Определим расчетным путем время, необходимое для нагрева нефти от  $T_0 = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $T_{н1} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  – температуры, превышающей температуру растворения кристаллов парафина [10].

В известных работах (см., например, [1 – 6]) описаны случаи, когда источник излучения размещается в торце цилиндрического резервуара. При этом прогрев по длине резервуара оказывается весьма неравномерным, а температура, необходимая для разогрева нефти, вследствие ее низкой теплопроводности достигается за весьма длительные промежутки времени – до десятков суток [3, 5]. Для решения данной проблемы предлагается размещать несколько источников электромагнитного излучения по длине резервуара. Для оценки оптимального количества источников ЭМП рассмотрим идеализированный случай применения источников, генерирующих плоские волны в обе стороны вдоль оси цистерны.

На рис. 1 показаны рассчитанные зависимости времени, требуемого для достижения минимальной температуры нефти  $T_{н1}$  в исследуемом объеме, от частоты приложенного ЭМП для случая использования одного источника, расположенного посередине длины цистерны и излучающего ЭМП в обе стороны, при различных величинах мощности источника  $P$ . Расчеты показали, что при  $P \leq 150\text{ кВт}$  время нагрева в заданном интервале температур превышает 100 ч, поэтому для данного случая мощности ниже 200 кВт при моделировании не рассматривались.

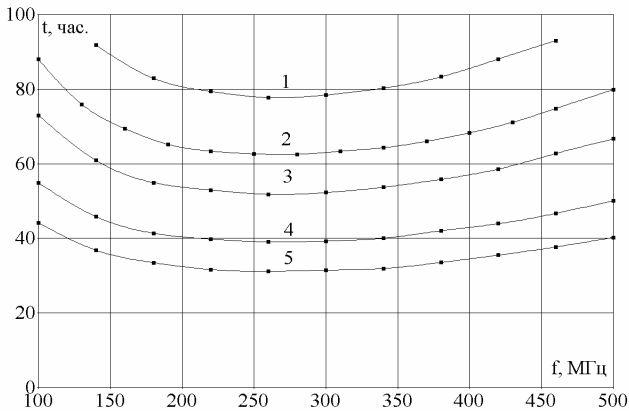


Рис. 1 – Рассчитанные зависимости  $t$  – времени, требуемого для увеличения температуры нефти от  $T_0 = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  до температуры, не ниже  $T_{н1} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  в объеме цистерны, от частоты приложенного ЭМП при различной мощности источника излучения  $P$  (1 –  $P = 200\text{ кВт}$ , 2 –  $P = 250\text{ кВт}$ , 3 –  $P = 300\text{ кВт}$ , 4 –  $P = 400\text{ кВт}$ , 5 –  $P = 500\text{ кВт}$ )

Результаты компьютерного моделирования электротепловых процессов для рассматриваемого температурного диапазона (от  $T_0 = 10^\circ\text{C}$  до  $T_{н1} = 60^\circ\text{C}$ ) при использовании 2-х одинаковых источников, расположенных на различном расстоянии от краев цистерны, показаны на рис. 2. При этом полагалось, что первый источник расположен на расстоянии  $L_1$ , а второй – на расстоянии  $L_2$  от одного из краев цистерны. Как видно из рисунка, наименьшее время нагрева достигается при расположении источников на расстояниях  $L_1=3.5$  м,  $L_2=16.5$  м (кривая 5, рис. 2). Дальнейшее приближение источников к краям цистерны приводит к возрастанию времени нагрева (см. кривую 6, рис. 2).

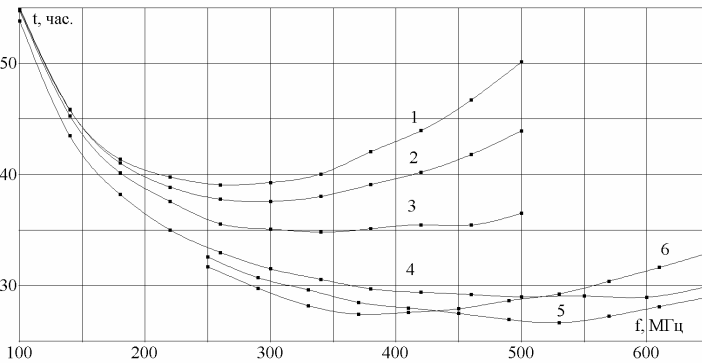


Рис. 2 – Рассчитанные зависимости  $t$  - времени, требуемого для достижения температуры нефти от  $T_0 = 10^\circ\text{C}$  до температуры, не ниже  $T_{н1} = 60^\circ\text{C}$  в объеме цистерны, от частоты приложенного ЭМП при расположении 2-х источников на различном расстоянии от краев цистерны при суммарной мощности источников  $P_\Sigma = 400$  кВт (1 – один источник, расположенный посередине цистерны; 2 –  $L_1 = 6.5$  м,  $L_2 = 13$  м; 3 –  $L_1 = 5.5$  м,  $L_2 = 15$  м; 4 –  $L_1 = 4$  м,  $L_2 = 16$  м; 5 –  $L_1 = 3.5$  м,  $L_2 = 16.5$  м; 6 –  $L_1 = 3$  м,  $L_2 = 17$  м)

На рис. 3 представлены результаты компьютерного моделирования процессов нагрева нефти в цистерне от  $T_0 = 10^\circ\text{C}$  до  $T_{н1} = 60^\circ\text{C}$  при использовании одного (кривая 1), двух (кривая 2), трех (кривая 3), четырех (кривая 4) и пяти (кривая 5) одинаковых источников, расположенных по линии цистерны на расстояниях  $L_1 \dots L_5$  от ее левого края при одной и той же суммарной мощности источников  $P_\Sigma = 300$  кВт.

Как видно из результатов проведенных вычислений, наименьшее время нагрева в заданном диапазоне температур обеспечивается при использовании четырех – пяти источников (см. кривые 4, 5 рис. 3).

Как видно из рис. 1 – 3, все зависимости  $t(f)$  имеют минимумы, величины которых составляют от 300 до 1000 МГц.

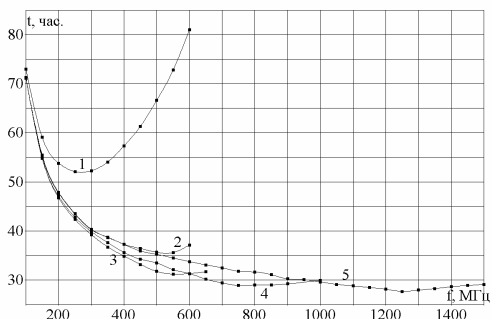


Рис. 3 – Рассчитанные зависимости  $t$  - времени, требуемого для достижения температуры нефти от  $T_0 = 10^\circ\text{C}$  до температуры, не ниже  $T_{н1} = 60^\circ\text{C}$  в объеме цистерны, от частоты приложенного ЭМП при расположении  $N$  источников на различном расстоянии от края цистерны при суммарной мощности источников  $P_\Sigma = 300$  кВт (1 –  $N = 1$ ,  $L_1 = 10$  м; 2 –  $N = 2$ ,  $L_1 = 3.5$  м,  $L_2 = 16.5$  м; 3 –  $N = 3$ ,  $L_1 = 1.5$  м,  $L_2 = 10$  м,  $L_3 = 18.5$  м; 4 –  $N = 4$ ,  $L_1 = 1$  м,  $L_2 = 7$  м,  $L_3 = 13$  м,  $L_4 = 19$  м; 5 –  $N = 5$ ,  $L_1 = 1$  м,  $L_2 = 5.5$  м,  $L_3 = 10$  м,  $L_4 = 14.5$  м,  $L_5 = 19$  м).

**Закключение.** С помощью математического моделирования электротепловых процессов нагрева нефтепродуктов, перевозимых в железнодорожной цистерне, от  $10^\circ\text{C}$  до  $60^\circ\text{C}$  – температуры, превышающей температуру растворения кристаллов парафина, показано, что использование четырех – пяти источников электромагнитного излучения, расположенных по длине цистерны и излучающих электромагнитные волны в обе стороны, время нагрева может быть уменьшено почти в 2 раза по сравнению со случаем применения одного источника, расположенного в центре цилиндрической емкости, при одинаковой суммарной мощности.

**Список литературы:** 1. *Bridges J.E., Krstansky J.J., Taflove A., et. al.* The ITRI in-situ RF fuel recovery process // *J. Microwave Power.* – 1983. – Vol. 18, № 1. – P. 3-14. 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., Нигматулин Р.И.* Численное моделирование процесса нагрева нефтяного пласта высокочастотным электромагнитным излучением // *ПМТФ.* – 1990. – № 4. – С. 59-64. 4. *Кислицын А.А.* Численное моделирование высокочастотного электромагнитного прогрева диэлектрической пробки, заполняющей трубу // *ПМТФ.* – 1996. – Т. 37, № 3. – С. 75-82. 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. *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. 7. *Вайнштейн Л.А.* Электромагнитные волны. – М.: Радиосвязь, 1988. – 440 с. 8. *Самарский А.А.* Теория разностных схем. – М.: Наука, 1989. – 616 с. 9. [Электронный ресурс]: <http://www.ngpedia.ru/id365000p1.html>. 10. [Электронный ресурс]: <http://www.findpatent.ru/patent/228/2288401.html>.

Поступила в редколлегию 05.04.2013