

НАГРЕВ И РАЗРУШЕНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ В НЕФТЕПРОВОДАХ ДВИЖУЩИМСЯ ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

М. А. Фатыхов, В. А. Абдуллина

*Башкирский государственный педагогический университет им.М.Акмуллы,
г.Уфа, Россия*

Одним из методов удаления пробок парафина и газогидратов в скважинах и трубопроводах является воздействие высокочастотного (ВЧ) или сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного (ЭМ) поля. При этом методе воздействия на среду происходит объёмное поглощение энергии ЭМ волн, преобразование её в тепловую энергию, появление распределённых источников тепла. В результате температура среды повышается, если это твёрдое вещество, достигается температура его плавления или разрушения. После расплавления или разрушения вещество может быть удалено.

Лучше всего передавать ЭМ энергию посредством ТЕМ волн, которые могут распространяться в межтрубном пространстве скважины, т.к. у этого типа волн нет ограничений на частоту ЭМ поля. Поэтому расплавление твёрдых отложений в скважине может быть произведено на большую глубину. Иное дело трубопровод, в электродинамическом отношении представляющий собой круглый волновод, в котором могут распространяться только волны типа E или H и существуют критические частоты, ниже которой ЭМ волны не могут распространяться. В таком случае, если нефтепровод имеет небольшой радиус, в нём могут распространяться ЭМ волны очень большой частоты, которые быстро затухают. Вследствие этого расплавление образовавшейся пробки может быть только на небольшую глубину. Поэтому в работе [2] предлагается разрушать асфальто-парафиновые отложения в нефтяных трубопроводах с помощью движущегося источника ВЧ ЭМ излучения – «ЭМ крота». При этом методе источник ВЧ ЭМ излучения передвигается по мере перемещения поверхности раздела твёрдой и жидкой фаз, проплавление диэлектрической пробки получается более эффективным. Рассмотрен случай распространения в волноводе волны типа E_{01} .

Однако не всегда возможно или даже не возможно возбуждение в волноводе желаемого типа волны, особенно если используется движущийся источник ВЧ ЭМ излучения. Обычно в волноводе распространяется сразу несколько типов волн. Поэтому необходимо рассмотрение процесса расплавления пробки и другими типами волн. В предлагаемой работе рассматривается процесс разрушения пробки волной типа H_{01} .

Постановка задачи. Основные уравнения. Так же, как в работе [2], полагается, что диэлектрик (парафин) полностью заполняет волновод, решается уравнение теплопроводности. Рассматривается процесс расплавления пробки в нефтепроводе такого же диаметра, что в работе [2]. У волны типа H_{01} цилиндрические составляющие напряженности ЭМ поля $E_r = H_\varphi = 0$. Остаются компоненты поля:

$$E_\varphi = i \frac{\omega \mu_0}{\chi} H_0 J'_0(\chi r) e^{-i\alpha(z-z_0)}; \quad (1)$$

$$H_r = -i \frac{\alpha}{\chi} H_0 J'_1(\chi r) e^{-i\alpha(z-z_0)}; \quad (2)$$

$$H_z = H_0 J_0(\chi r) e^{-i\alpha(z-z_0)}. \quad (3)$$

Как видно из выражений (1) – (3), ЭМ поле имеет единственную составляющую напряженности электрического поля E_φ . Она и определяет распределение тепловых источников, т.к. плотность тепловых источников пропорциональна квадрату напряженности электрической составляющей ЭМ поля. Используя форму написания выражения плотности тепловых источников для неподвижного источника работы [2], получаем:

$$Q_0 = \frac{\varepsilon_0''}{\pi \operatorname{Re}(k_z \varepsilon_0)} \frac{\mu_n^2}{R^4} P \left[\frac{|k_z|^2 R^2}{\mu_n^2} J_1^2 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) \right]. \quad (4)$$

В выражении (4) использована формула дифференцирования: $J_0'(\chi r) = -J_1(\chi r)$.

Как видно из выражений (1) – (3), задача аксиально-симметричная. Как и в работе [2], задача решается численно методом сквозного счёта без явного выделения фаз. Уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\rho c_T \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(r, z, t). \quad (5)$$

Плотность и теплопроводность нефти считаются не зависящими от температуры, а теплоёмкость при температуре фазового перехода T_S имеет δ -образную особенность

$$c_T = c_0 + L\delta(T - T_S), \quad (6)$$

Плотность мощности объёмного тепловыделения записывается в виде [2]:

$$Q = Q_0 \Theta(z - z_0(t)) \exp(-\alpha(z - z_0(t))). \quad (7)$$

Формула учитывает передвижение источника ЭМ волн по закону $z = z_0(t)$. Явный вид Q_0 приведён в выражении (4). В формуле (7)

$$\Theta(z - z_0) = \begin{cases} 1, & z \geq z_0 \\ 0, & z < z_0 \end{cases}.$$

Значение P в выражении (4) не отображает действительную поглощаемую мощность ЭМ энергии. Чтобы определить её, методом трапеций определяется объёмный интеграл

$$Q_{\text{общ}} = 2\pi \int_0^H \int_0^R Q(r, z) r dr dz,$$

вычисляется коэффициент, показывающий насколько действительная поглощаемая мощность отличается от задаваемой мощности, затем выражение (4) умножается на этот коэффициент.

Для решения уравнения (5) принимались граничные условия. На торце пробки $z=0$ задавался конвективный теплообмен по закону Ньютона [2]:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \kappa_1 (T - T_0), \quad (8)$$

На удалённом торце пробки $z=H$ теплообмен отсутствует:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0. \quad (9)$$

На боковой поверхности цилиндра $r=R$ граничное условие также записывалось в виде конвективного теплообмена, но с другим коэффициентом теплообмена κ :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \kappa(T - T_0), \quad (10)$$

В точке $r=0$ теплообмен отсутствует:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0. \quad (11)$$

Скорость движения источника ЭМ волн ν вдоль координаты z задавалась постоянной и подбиралась так, чтобы за источником не оставалось зон с нерасплавленным парафином (в расчётах использовалось значение $\nu=1,44$ м/час).

Анализ результатов вычислений. При проведении расчётных исследований использовались параметры высокопарафинистой нефти [2]: $\rho=950$ кг/м³; $c_0=3$ кДж/(кг·К); $\lambda=0,125$ Вт/(м·К); $L=300$ кДж/кг; $\kappa=1,613$ Вт/(м²·К); $Nu=1$ (труба в сухом грунте); $\kappa_1=0,2$ Вт/(м²·К); $T_0=20$ °С; $T_S=50$ °С; $H=5$ м; $P=9,34$ кВт; $R=0,0775$ м; $\varepsilon'_0=2,3$; $\text{tg}\delta=\varepsilon''_0/\varepsilon'_0=0,012$; $\sigma=3,4 \cdot 10^6$ Ом⁻¹·м⁻¹. Задача решалась неявным методом переменных направлений с равномерной прямоугольной сеткой. Дельта-функция в выражении для теплопроводности аппроксимировалась ступенькой с полушириной равной $0,6$ °С.

На рис. 1 приведена зависимость мнимой части продольного волнового числа k_z'' от частоты ЭМ поля. Критическая частота H_{01} волны для рассматриваемого цилиндрического волновода $f_0 \approx 1,556 \cdot 10^9$ Гц. Мнимая часть продольного волнового числа имеет минимум $k_z'' \approx 0,5967$ м⁻¹ на частоте $f_0 \approx 2,2 \cdot 10^9$ Гц. На рис. 2 приведены распределения $Q(r, z=0)$, нормированные на мощность источника ЭМ волн, в поперечном сечении волновода для различных частот при неподвижном источнике. Как видно из рис. 2, распределение тепловых источников в поперечном сечении волновода очень не равномерно и неравномерность увеличивается с ростом частоты. Максимум плотности тепловых источников находится приблизительно в середине между осью и стенкой волновода. В продольном направлении плотность тепловых источников падает по экспоненциальному закону. С ростом частоты скорость спада тепловых источников в продольном направлении увеличивается.

Результаты численного моделирования процесса ликвидации парафиновой пробки «ЭМ кротом» приведены на рис. 3 – 6 ($f=1,6 \cdot 10^9$ Гц), рис. 7 – 8 ($f=2 \cdot 10^9$ Гц), рис. 9 – 10 ($f=3 \cdot 10^9$ Гц) для различных моментов времени. На рис. 3 – 10 для удобства изображения все значения вдоль координаты r умножены на 100. Как видно из рисунков, процесс проплавления пробки сильно зависит от распределения плотности тепловых источников. Местоположение первоначального проплавления пробки полностью определяется максимумом плотности тепловых источников. С течением времени максимум температуры смещается к оси волновода.

Наиболее эффективно удаление пробки ЭМ полем с частотой $f=2 \cdot 10^9$ Гц. В этом случае наблюдается наименьший перегрев парафина в точках максимума температуры, который приходится допускать ради расплавления парафина возле стенки трубопровода. На

этой частоте раньше можно начинать движение источника ЭМ волн (через 5 минут после начала нагрева), т.к. через это время уже происходит процесс проплавления парафина возле стенки волновода. При других рассмотренных частотах движение источника ЭМ волн приходится начинать позже – через 70 минут после начала нагрева. Иначе возле стенки волновода парафин остаётся не расплавленным. Но к этому времени уже наблюдается сильный перегрев парафина в некоторых точках. Раз позже приходится начинать движение источника ЭМ волн, то дольше приходится и греть парафин ради расплавления его по всей длине пробки.

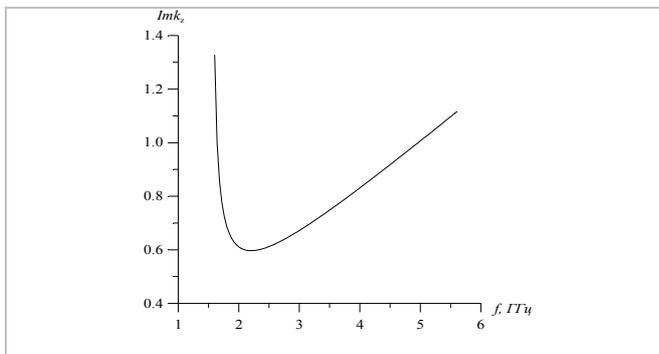


Рис. 1. Мнимая часть продольного волнового числа, как функция частоты для металлического цилиндрического волновода, заполненного парафином.

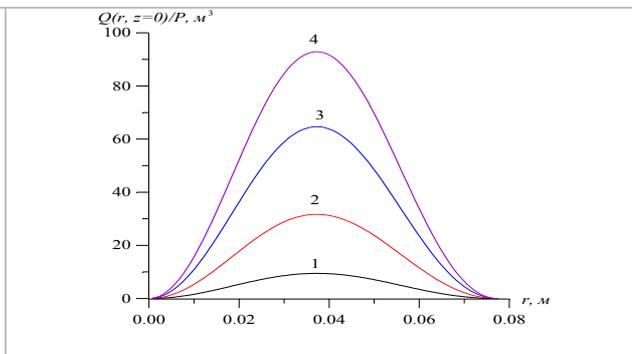


Рис. 2. Поперечное распределение плотности мощности тепловых потерь, нормированной на мощность источника в цилиндрическом волноводе, заполненном парафином $f, 10^9$ Гц; 1 – 1,6; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4.

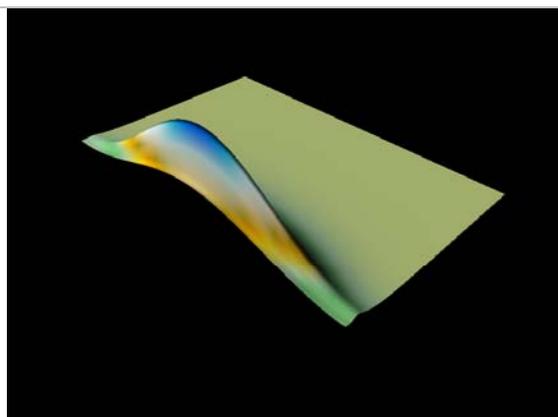


Рис. 3. Распределение температуры в цилиндрическом волноводе, заполненном парафином. $f=1,6 \cdot 10^9$ Гц; $t=15$ мин.

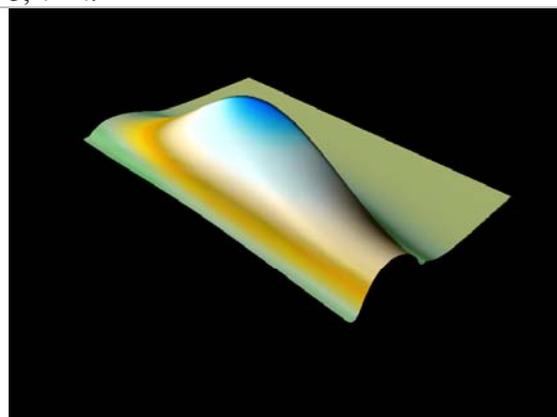


Рис. 4. Распределение температуры в цилиндрическом волноводе, заполненном парафином. $f=1,6 \cdot 10^9$ Гц; $t=75$ мин.

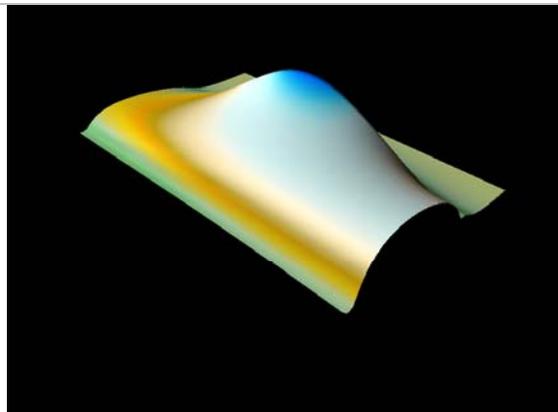


Рис. 5. Распределение температуры в цилиндрическом волноводе, заполненном парафином. $f=1,6 \cdot 10^9$ Гц; $t=135$ мин.

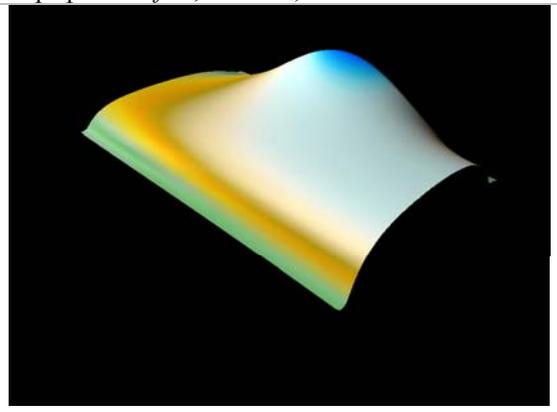
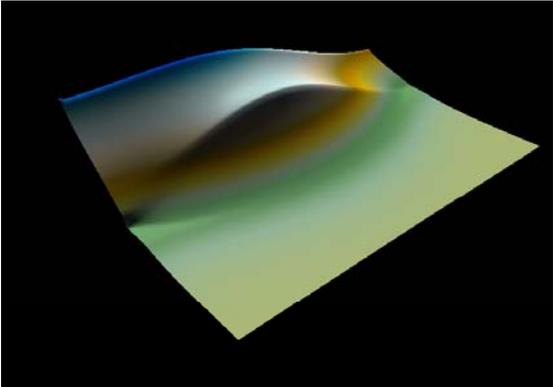
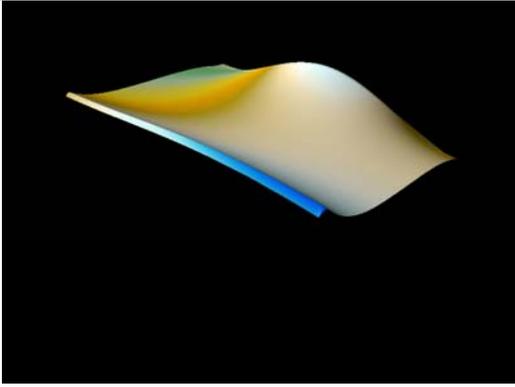
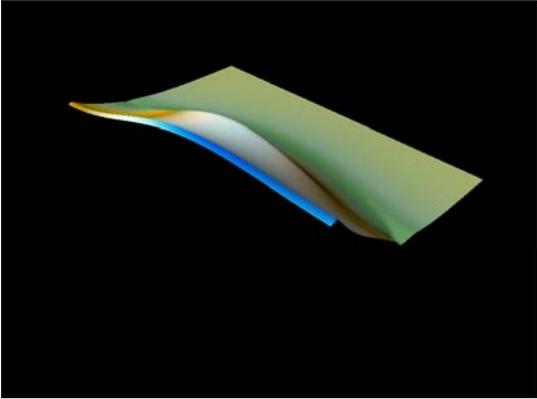
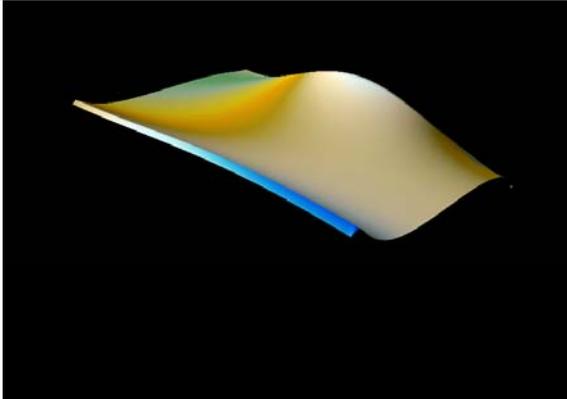


Рис. 6. Распределение температуры в цилиндрическом волноводе, заполненном парафином. $f=1,6 \cdot 10^9$ Гц; $t=195$ мин.

	
<p>Рис. 7. Распределение температуры в цилиндрическом волноводе, заполненном парафином. $f=2 \cdot 10^9$ Гц; $t=135$ мин.</p>	<p>Рис. 8. Распределение температуры в цилиндрическом волноводе, заполненном парафином. $f=2 \cdot 10^9$ Гц; $t=4,5$ час.</p>
	
<p>Рис. 9. Распределение температуры в цилиндрическом волноводе, заполненном парафином. $f=3 \cdot 10^9$ Гц; $t=135$ мин.</p>	<p>Рис. 10. Распределение температуры в цилиндрическом волноводе, заполненном парафином. $f=3 \cdot 10^9$ Гц; $t=4,5$ час.</p>

Обозначения

i – мнимая единица; ω – круговая частота ЭМ поля, рад/с; μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; $\chi = \frac{\mu_n}{R}$ – поперечный волновой коэффициент; $\alpha = \alpha_V + \alpha_S = 2k_z''$ – коэффициент затухания мощности ЭМ волн вдоль волновода, ось которого совпадает с осью цилиндрической системы координат r, φ, z , m^{-1} ; $\alpha_V = \frac{\omega^2 \varepsilon_0''}{c^2 k_z'}$ – коэффициент затухания, обусловленный объёмными потерями в диэлектрической пробке, m^{-1} ; $\alpha_S = \frac{\omega \varepsilon_0'}{c R k_z'} \sqrt{\frac{\omega}{2\pi\sigma}}$ – коэффициент затухания, обусловленный поверхностными потерями в металлических стенках цилиндрического волновода, m^{-1} ; c – скорость света, м/с; $\varepsilon_0', \varepsilon_0''$ – действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости парафина $\varepsilon_0 = \varepsilon_0' + i\varepsilon_0''$; k_z', k_z'' – действительная и мнимая части продольного волнового числа $k_z = k_z' + ik_z''$; σ – проводимость металла, из которого сделаны стенки труб, $Om^{-1}m^{-1}$; H_0 – амплитуда напряженности магнитной составляющей поля; J_0, J_1 – функции Бесселя нулевого и первого порядка; ' – знак производной; z_0 – координата подвижного источника ЭМ волн; в начале ЭМ воздействия источник расположен в точке $z=0$; μ_n – значение n -го корня функции Бесселя; R

– радиус волновода, м; P – мощность источника ЭМ волн, Вт; ρ – плотность, кг/м³; c_T – удельная теплоёмкость, Дж/(кг К); λ – теплопроводность высокопарафинистой нефти, Вт/(м К); H – длина парафиновой пробки, м; L – скрытая теплота фазового перехода, Дж/кг; $\delta(T - T_s)$ – дельта-функция, T_0 – начальная температура окружающей среды и парафиновой пробки, К; κ_1 – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К); $\kappa = Nu \cdot \lambda / R$ – коэффициент теплообмена с внешней средой; Nu – число Нуссельта.

Литература

1. Ахметов А.Т., Дьячук А.И., Кислицын А.А., Нигматуллин Р.И. Способ ликвидации ледяных, газогидратных и парафиновых пробок в выкидных линиях скважин и трубопроводах А.с. 1344756 СССР. // Б.И. 1992. №3. С.120.
2. Кислицын А.А. Численное моделирование высокочастотного электромагнитного прогрева диэлектрической пробки, заполняющей трубу // Прикладная механика и техническая физика. 1996. № 3. С. 75.
3. Фатыхов, М.А. Особенности нагрева и плавления парафина в коаксильной трубе высокочастотным электромагнитным излучением // Теплофизика высоких температур. 2002. Т.40. №5. С. 802.
4. Семенов Н.А. Техническая электродинамика. М.: Связь, 1973. 480 с.
5. Балакирев В.А., Сотников Г.В., Ткач Ю.В., Яценко Т.Ю. ВЧ метод устранения парафиновых пробок в оборудовании нефтяных скважин и нефтепроводах // Электромагнитные явления. 1998. Т. 1. № 4. С. 552.
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. выпуск 9. С. 1.
7. Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции (Формулы, графики, таблицы). М.: 1964. 344 с.