

УДК 537.9

DOI: 10.31040/2222-8349-2026-0-1-34-41

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ТРУБОПРОВОДАХ ДВИЖУЩИМСЯ ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© М.А. Фатыхов

Представлена математическая модель и выполнено теоретическое исследование процесса электромагнитного прогрева парафиновой (асфальто-смолопарафиновой) пробки в трубе. Принято, что теплообмен на внешней поверхности трубы описывается законом Ньютона. Предполагается, что источник электромагнитных волн типа H_{01} движется в трубе по мере перемещения поверхности раздела твердой и жидкой фаз. Раскрыто достижение сложной конфигурации тепловых источников и температуры. Исследовано пространственно-временное изменение температуры в трубе. Результаты представляют практическую ценность для установления динамических особенностей технологии удаления твердых отложений (асфальто-смолопарафиновых пробок) в трубопроводе и нефтяной скважине воздействием электромагнитного излучения.

Ключевые слова: электромагнитные волны, трубопровод, асфальто-смолопарафиновые отложения.

Введение. Трубопроводы круглого сечения представляют собой круглые полые волноводы, по которым могут распространяться электромагнитные (ЭМ) волны. Английский физик Дж. Рэлей еще в 1897 г. теоретически рассмотрел задачу о распространении ЭМ волн в полых волноводах. Однако лишь спустя 40 лет, когда начал осваиваться сантиметровой диапазон радиоволн, волноводы нашли техническое применение [1]. Основная особенность полого волновода состоит в том, что частотный диапазон распространяющихся в нем волн ограничен снизу критической частотой $f_{кр}$. Ей соответствует критическая длина волны $\lambda_{кр} = v_{ем}/f_{кр}$ – верхняя граница диапазона, выраженного в длинах волн. Здесь $v_{ем}$ – скорость распространения в среде ЭМ волн. В полых металлических волноводах распространяются только E - и H -волны. Поперечное сечение такого волновода исключает появление ТЕМ волн.

Ограничение частотного диапазона распространяющихся ЭМ волн в волноводе сильно осложняет работу по удалению твердых отложений из трубопроводов, т.к. коэффициент затухания ЭМ волн в среде напрямую зависит от циклической частоты волн f . Чем выше частота, тем больше коэффициент затухания ЭМ волн и соответственно меньше глубина прогрева пробки из твердых отложений. Помимо этого, чем больше коэффициент затухания ЭМ волн, тем

больше неравномерность нагрева пробки, местный перегрев среды и соответственно потери энергии в окружающую трубопровод среду. Поэтому выгоднее всего производить нагрев среды низшими типами волн: H_{01} , H_{11} , E_{01} , E_{11} . При распространении в среде и высших типов волн, в ней распространяются кроме волн основной частоты и ЭМ волны более высоких частот, которые соответственно и быстрее затухают. У высших типов волн меньше критическая длина ЭМ волн $\lambda_{кр}$ [2]. Однако не всегда возможно или даже невозможно 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 данной работе рассматривается процесс разрушения пробки волной типа H_{01} .

Полагается, что твердой расплавленной средой в трубопроводе, является диэлектрик (парафин), который полностью заполняет волновод [3–5]. Решается уравнение теплопроводности.

Методы исследования. Парафино- и газогидраты представляют собой диэлектрики, которые характеризуются комплексной относительной диэлектрической проницаемостью:

$$\varepsilon_d(\omega, T, p) = \varepsilon'_d(\omega, T, p) - j\varepsilon''_d(\omega, T, p),$$

$$j = \sqrt{-1}, \quad (1)$$

где ε'_d , ε''_d – действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости среды; $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота; f – линейная частота электромагнитной волны; T и p – температура и давление.

Мнимая часть диэлектрической проницаемости, как известно, определяет плотность источников тепла, возникающих в материале при его взаимодействии с высокочастотным электромагнитным полем (ВЧ ЭМП) вида:

$$\vec{E} = E_0 \exp(j\omega t), \quad \vec{H} = H_0 \exp(j\omega t). \quad (2)$$

Плотность источников тепла описывается формулой:

$$q = 0,5\omega\varepsilon'_d\varepsilon_0\text{tg}\delta E_0 E_0^*, \quad \text{tg}\delta \approx \frac{\varepsilon''_d}{\varepsilon'_d}. \quad (3)$$

Уравнение теплопроводности имеет вид:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T + q. \quad (4)$$

В формулах (2)–(4) ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; E , H – напряженности электрического и магнитного полей соответственно; E_0 , H_0 – их амплитуды, зависящие от пространственных координат и времени, c , ρ , λ – удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности среды соответственно. Возникновение внутренних источников тепла в таком диэлектрике при его взаимодействии с ВЧ ЭМП и, как следствие, изменение температуры и давления в нем позволяют применить энергию мощного электромагнитного излучения для разложения парафино- и газогидратных пробок, образующихся в различных узлах оборудования.

В силу уравнения (4), полагая, что твердые отложения полностью закупорили трубопровод, решается уравнение теплопроводности:

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

где ρ , c_T , λ – плотность, теплоемкость, теплопроводность среды, нагрев и расплавление которой производится.

У волны типа H_{01} цилиндрические составляющие напряженности ЭМ поля $E_r = H_\phi = 0$ [1]. Остаются компоненты поля:

$$E_\phi = i \frac{\omega \mu_0}{\chi} H_0 J'_0(\chi r) e^{-i\alpha(z-z_0)}; \quad (6)$$

$$H_r = -i \frac{\alpha}{\chi} H_0 J'_1(\chi r) e^{-i\alpha(z-z_0)}; \quad (7)$$

$$H_z = H_0 J_0(\chi r) e^{-i\alpha(z-z_0)}, \quad (8)$$

где i – мнимая единица; μ_0 – магнитная постоянная (полагается, что среда в волноводе немагнитный диэлектрик); $\chi = \frac{\mu_n}{R}$ – 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 ;

$\alpha_V = \frac{\omega^2 \varepsilon''_0}{c^2 k_z'}$ – коэффициент затухания, обусловленный объемными потерями в диэлектрической пробке; $\alpha_S = \frac{\omega \varepsilon'_0}{c R k_z'} \sqrt{\frac{\omega}{2\pi\sigma}}$ – коэффициент затухания, обусловленный поверхностными потерями в металлических стенках цилиндрического волновода; c – скорость света; ε'_0 , ε''_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; 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. Для волны типа H_{01} – $\mu_n = 3.832$; $\lambda_{кр} = 1.64 \cdot R$ [2].

Как видно из выражений (6)–(8), ЭМ поле имеет единственную составляющую напряженности электрического поля E_ϕ . Она и определяет распределение тепловых источников, так как плотность тепловых источников пропорциональна квадрату напряженности электрической составляющей ЭМ поля. Используя форму написания выражения плотности тепловых источников для неподвижного источника, получаем:

$$Q_0 = \frac{\varepsilon''_0}{\pi \text{Re}(k_z \varepsilon_0)} \frac{\mu_n^2}{R^4} P \left[\frac{|k_z|^2 R^2}{\mu_n^2} J_1^2 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) \right], \quad (9)$$

где P – мощность источника ЭМ волн.

В выражении (9) использована формула дифференцирования [7]:

$$J'_0(\chi r) = -J_1(\chi r).$$

Задача решается численно методом сквозного счета без явного выделения фаз. Плотность и теплопроводность нефти считаются не зависящими от температуры, а теплоемкость при температуре фазового перехода T_S имеет δ -образную особенность

$$c_T = c_0 + L\delta(T - T_S), \quad (10)$$

где L – скрытая теплота фазового перехода; $\delta(T - T_S)$ – дельта-функция.

Плотность мощности объемного тепловыделения записывается в виде:

$$Q = Q_0 \Theta(z - z_0(t)) \exp(-\alpha(z - z_0(t))). \quad (11)$$

Формула учитывает передвижение источника ЭМ волн по закону $z = z_0(t)$. Явный вид Q_0 приведен в выражении (9). В формуле (11)

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

Значение P в выражении (11) не отображает действительную поглощаемую мощность ЭМ энергии. Чтобы определить ее методом прямоугольников, вычисляется объемный интеграл

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

определяется коэффициент, показывающий насколько действительная поглощаемая мощность отличается от задаваемой мощности, затем выражение (11) умножается на этот коэффициент. В интеграле H – длина парафиновой пробки.

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

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \kappa_1 (T - T_0), \quad (12)$$

где T_0 – температура окружающей среды и начальная температура парафиновой пробки; κ_1 – коэффициент теплообмена.

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

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0. \quad (13)$$

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

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \kappa (T - T_0), \quad (14)$$

где $\kappa = Nu \cdot \lambda / R$ – коэффициент теплообмена с внешней средой; Nu – число Нуссельта.

В точке $r = 0$ теплообмен отсутствует:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0. \quad (15)$$

Вследствие решения задачи только в 1-м квадранте, на его границах можно принять условия:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \phi} \Big|_{\phi=0} = 0; \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial \phi} \Big|_{\phi=\frac{\pi}{2}} = 0. \quad (16)$$

Скорость движения источника ЭМ волн v вдоль координаты z задавалась постоянной и подбиралась так, чтобы за источником не оставалось зон с нерасплавленным парафином (в расчетах использовалось значение $v = 1.5$ м/час).

Результаты. Как видно из выражений (6)–(8), задача аксиально-симметричная. На рис. 1 приведена зависимость мнимой части продольного волнового числа k_z'' от частоты ЭМ поля.

На рис. 2 приведены распределения тепловых источников $Q(r, z = 0)$, 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 неравномерно 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 ЭМ поля скорость уменьшения плотности тепловых источников в продольном направлении волновода увеличивается.

Задача решалась численно методом сквозного счета без явного выделения фаз. При проведении расчетных исследований использовались параметры высокопарафинистой нефти [3, 7, 8]: $\rho = 950$ 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); $T_0 = 20^\circ\text{C}$; $T_S = 50^\circ\text{C}$; $H = 5$ м; $P = 9.34$ кВт; $v = 1.44$ м/час. Задача решалась неявным методом переменных направлений с равномерной прямоугольной сеткой, методом сквозного счета без явного выделения фаз. Дельта-функция в выражении для теплопроводности аппроксимировалась ступенькой с полушириной равной 0.6°C .

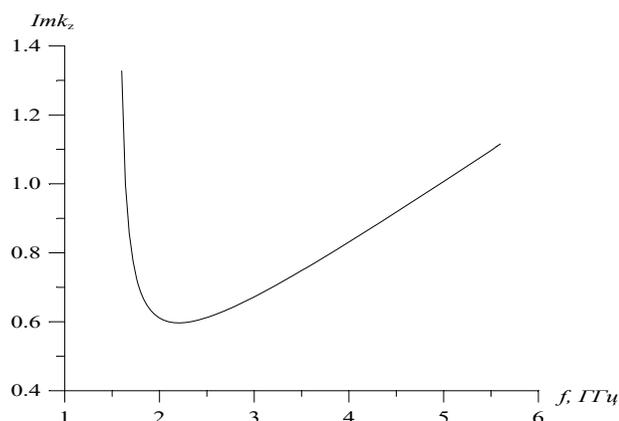


Рис. 1. Мнимая часть продольного волнового числа, как функция частоты для металлического цилиндрического волновода, заполненного парафином

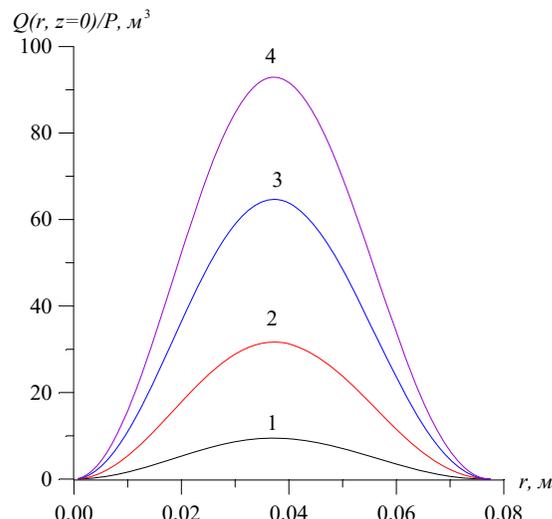


Рис. 2. Поперечное распределение плотности мощности тепловых потерь, нормированной на мощность источника в цилиндрическом волноводе, заполненном парафином $f, 10^9$ Гц 1 – 1.6; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4

Результаты численного моделирования процесса удаления парафиновой пробки приведены на рис. 3 ($f = 1.6 \cdot 10^9$ Гц), рис. 4 ($f = 2 \cdot 10^9$ Гц), рис. 5 ($f = 3 \cdot 10^9$ Гц) для различных моментов времени. На рис. 3 источник начинал двигаться через 5 минут после начала нагрева, на рис. 4, б, в, г и рис. 5, б, в, г через 70 минут после начала нагрева.

На рис. 3–5 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.

Обсуждение результатов. Критическая частота H_{01} волны для рассматриваемого круглого волновода с параметрами среды: $R = 0.0775$ м; $\epsilon'_0 = 2.3$; $\text{tg} \delta = \epsilon''_0 / \epsilon'_0 = 0.012$; $\sigma = 3.4 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ – $f_0 \approx 1.556 \cdot 10^9$ Гц. Мнимая часть продольного волнового числа имеет минимум $k''_z \approx 0.5967 \text{ м}^{-1}$ на частоте $f_0 \approx 2.2 \cdot 10^9$ Гц.

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), так как 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 остается 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.

Вопросы, рассмотренные в данной работе, представляют научный и практический интерес также для решения задач, связанных с газогидратами, высоковязкими нефтями и битумами [9–15, 18].

Заключение. Получены выражения распределения тепловых источников при возбуждении в круглом волноводе волны H_{01} . Для заданных параметров среды приведена зависимость мнимой части продольного волнового числа k''_z от частоты ЭМ поля. Мнимая часть продольного волнового числа имеет минимум $k''_z \approx 0.5967 \text{ м}^{-1}$ на частоте $f_0 \approx 2.2 \cdot 10^9$ Гц. Определена критическая частота для рассматриваемого круглого волновода – $f_0 \approx 1.556 \cdot 10^9$ Гц.

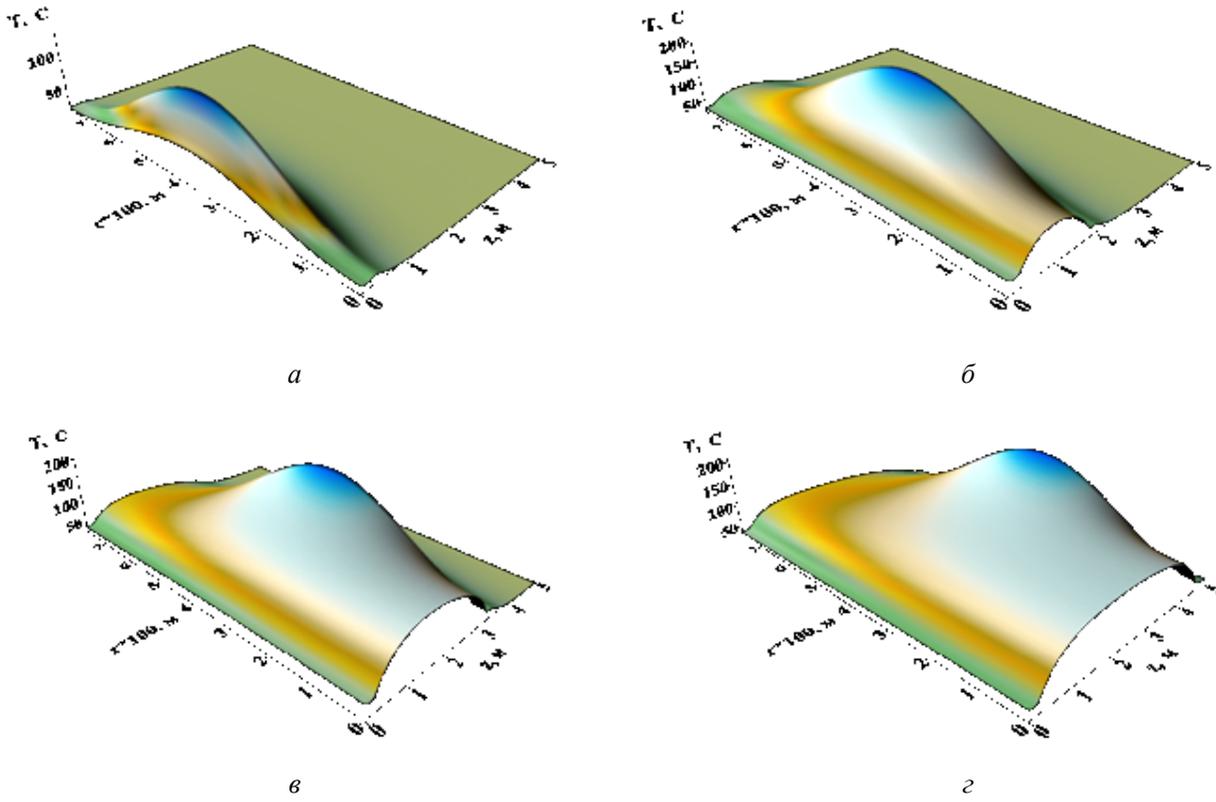


Рис. 3. Распределение температуры в круглом волноводе, заполненном парафином, $f = 1.6 \cdot 10^9$ Гц: $a - t = 15$ мин; $б - t = 75$ мин; $в - t = 135$ мин; $г - t = 195$ мин

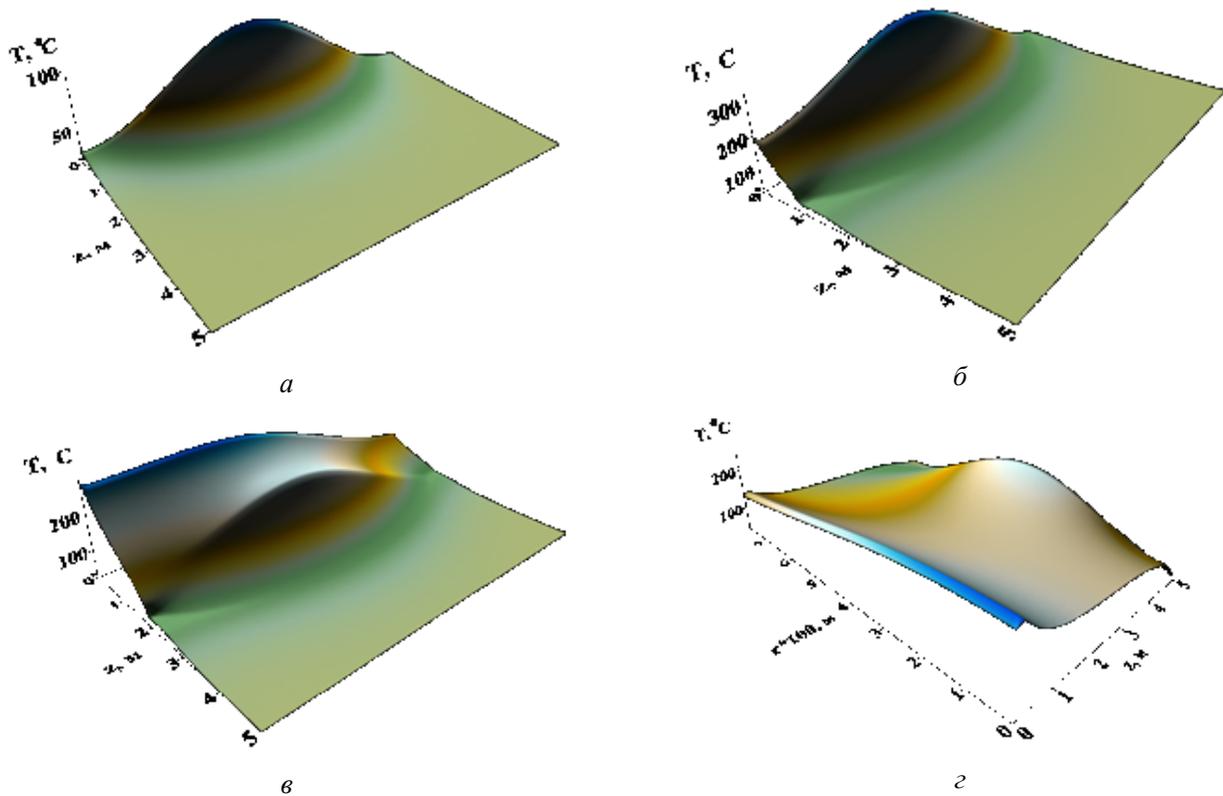


Рис. 4. Распределение температуры в круглом волноводе, заполненном парафином, $f = 2 \cdot 10^9$ Гц: $a - t = 15$ мин; $б - t = 75$ мин; $в - t = 135$ мин; $г - t = 4.5$ час

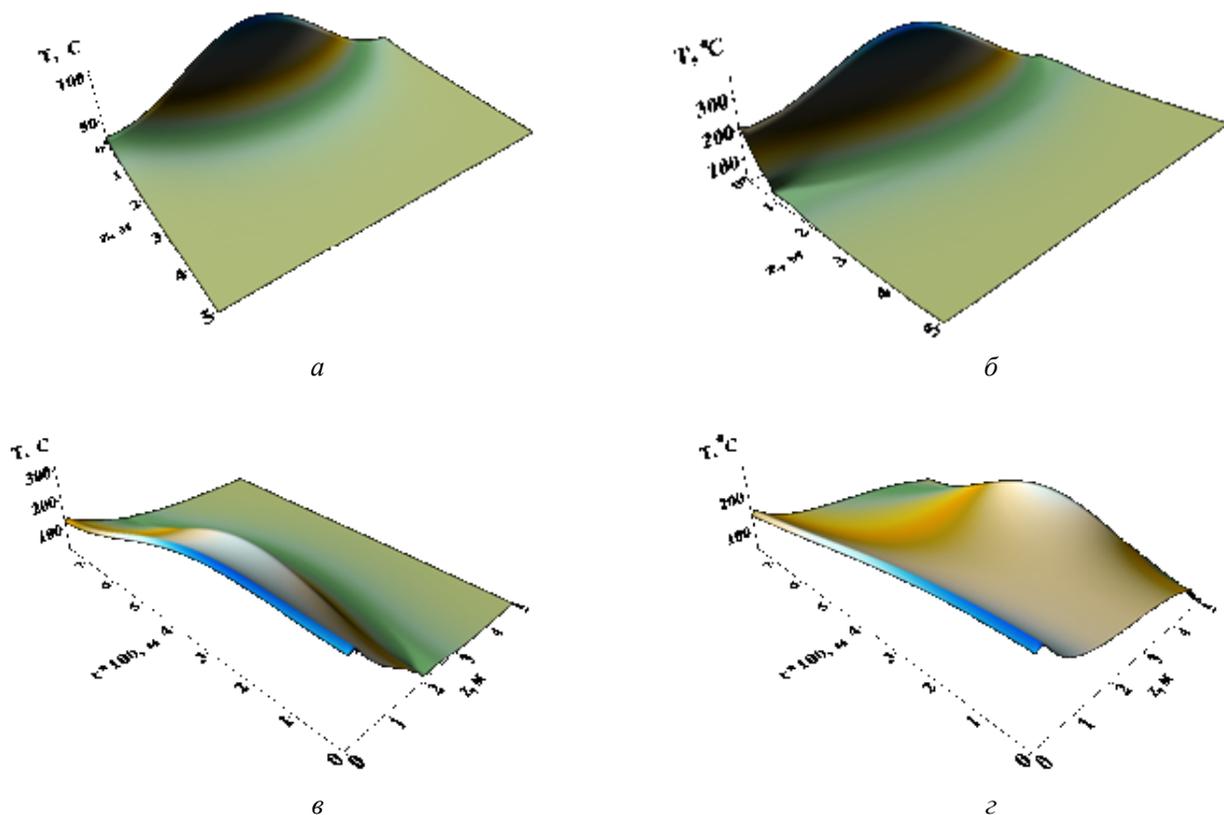


Рис. 5. Распределение температуры в круглом волноводе, заполненном парафином, $f = 3 \cdot 10^9$ Гц: $a - t = 15$ мин; $б - t = 75$ мин; $в - t = 135$ мин; $г - t = 4.5$ час

Приведены распределения тепловых источников в поперечном сечении волновода в точке $z=0$, нормированные на мощность источника ЭМ поля, для различных частот при неподвижном источнике ЭМ волн. Получено, что распределение тепловых источников в поперечном сечении волновода очень неравномерно 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 уменьшается по экспоненциальному закону. С ростом частоты ЭМ поля скорость уменьшения плотности тепловых источников в продольном направлении волновода увеличивается.

Поставлена и численно решена пространственная задача о воздействии ЭМ поля на парафиновую пробку. При этом полагается одновременное движение источника ЭМ излучения. Расчеты показали, что чем меньше частота возбуждаемых ЭМ волн, тем эффективнее разрушение пробки. В этом случае наблюдается наименьший перегрев парафина в точках максимума температуры, который приходится допускать ради расплавления парафина возле стенки

трубопровода. С ростом частоты ЭМ поля эффективность удаления пробки уменьшается, а неравномерность температуры среды в поперечном сечении волновода увеличивается. Это происходит потому, что с ростом частоты наблюдается уменьшение глубины проникновения ЭМ поля в среду.

Поверхность, разделяющая твердую и жидкую фазы, имеет форму конуса с радиусом, уменьшающимся вдоль пробки. Такая форма расплавленной зоны может привести к разрушению пробки до ее полного расплавления. Если преследовать цель пробить в пробке отверстие по всей ее длине, а не расплавлять ее по всему радиусу трубопровода, то движение электромагнитного источника можно начинать намного раньше и двигать быстрее. В таком случае более высокие частоты могут иметь даже преимущество.

Литература

1. Семенов Н.А. Техническая электродинамика. М.: Связь, 1973. 480 с.
2. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. М.: Высшая школа, 1970. 440 с.

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. СВЧ метод устранения парафиновых пробок в нефтяных скважинах // 9-я Крымская и выставка «СВЧ-техника и спутниковые телекоммуникационные технологии», 25–27 сентября 1999 г. Севастополь, Украина. Труды конференции. С. 422–424.

5. Балакирев В.А., Сотников Г.В., Ткач Ю.В., Яценко Т.Ю. Разрушение асфальто-парафинистых отложений в нефтяных трубопроводах движущимся источником высокочастотного электромагнитного излучения // ЖТФ. 2001. Т. 41. Вып. 9. С. 1–8.

6. Балакирев В.А., Сотников Г.В., Ткач Ю.В., Яценко Т.Ю. Устранение парафиновых пробок в оборудовании нефтяных скважин и нефтяных трубопроводах высокочастотным электромагнитным излучением // Электромагнитные явления. 2001. Т. 2. № 3(7).

7. Чистяков С.И., Денисова Н.Ф., Саяхов Ф.Л. Экспериментальное исследование зависимости диэлектрических свойств нефти и ее фракций от частоты // Известия Высших учебных заведений. Нефть и газ. 1972. № 5. С. 53–56.

8. Фатыхов М.А. Особенности нагрева и плавления парафина в коаксиальной системе под воздействием высокочастотного электромагнитного излучения // Теплофизика высоких температур. 2002. Т. 40. № 5. С. 802–809.

9. Fatykhov M.A., Fatykhov L.M., Microwave electromagnetic method of melting the paraffin plug in an open coaxial system // J. Eng. Phys. Thermophys. 2015. V. 88. № 3. P. 724–729.

10. Fatykhov M.A. Research of the depth of heating of highly viscous dielectric liquid under high-frequency electromagnetic field using the method of dimensional theory // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2016. V. 52. Iss. 1. P. 79–84.

11. Kovaleva L.A., Zinnatullin R.R., Mullayonov A.I., Shrubkovskii I.I. Experimental studies of Heating rheologically complex fluids with electromagnetic field // High Temperature. 2016. V. 54. № 4. P. 612–614.

12. Davletbaev A., Kovaleva L., Babadagli T. Combining solvent injection Electromagnetic heating and hydraulic fracturing for multistage heavy oil recovery // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 2016. V. 30. № 2. P. 207–224.

13. Kovaleva L., Musin A. Numerical modeling of heavy hydrocarbon liquid heating // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2016. V. 33. № 1. P. 169–175.

14. Davletbaev A.Y., Kovaleva L.A., Nasyrov N.M., Babadagli T. Multi-stage hydraulic fracturing and radio-frequency electromagnetic radiation for heavy-oil production // Journal of Unconventional Oil and Gas Resources. 2015. V. 12. P. 15–22.

15. Makogon Y.F. Natural gas hydrates – A promising source of energy // J. Natural Gas Science and Engineering. 2010. № 2. P. 1–21.

16. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции (Формулы, графики, таблицы). М., 1964. 344 с.

17. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука, 1989. 432 с.

18. Фатыхов М.А. Влияние частоты движущегося источника электромагнитного излучения на фазовый переход в нефтепроводах с асфальто-смолопарафиновыми отложениями // Известия Уфимского научного центра РАН. 2025. № 3. С. 26–35.

References

1. Semenov N.A. Tekhnicheskaya ehlektrodinamika. Moscow: Svyaz', 1973, 480 p.

2. Lebedev I.V. Tekhnika i pribory SVCh. Moscow: Vysshaya shkola, 1970, 440 p.

3. Kislicyn A.A. Chislennoe modelirovanie vysokochastotnogo ehlektromagnitnogo progreva dielektricheskoy probki, zapolnyayushchej trubu // PMTF, 1996, vol. 37, no. 3, pp. 75–82.

4. Balakirev V.A., Sotnikov G.V., Tkach YU.V., Yacenko T.YU. SVCh metod ustraneniya parafinovykh probok v neftyanykh skvazhinakh // 9-ya Krymskaya i vystavka «SVCh-tehnika i sputnikovye telekommunikacionnye tekhnologii», 25–27 sentyabrya 1999 g. Sevastopol', Ukraina. Trudy konferencii, pp. 422–424.

5. Balakirev V.A., Sotnikov G.V., Tkach YU.V., Yacenko T.YU. Razrushenie asfal'to-parafinistykh otlozhenij v neftyanykh truboprovodakh dvizhushchimsya istochnikom vysokochastotnogo ehlektromagnitnogo izlucheniya // ZHTF, 2001, vol. 41, vyp. 9, pp. 1–8.

6. Balakirev V.A., Sotnikov G.V., Tkach YU.V., Yacenko T.YU. Ustranenie parafinovykh probok v oborudovanii neftyanykh skvazhin i neftyanykh truboprovodakh vysokochastotnym ehlektromagnitnym izlucheniem // Ehlektromagnitnye yavleniya, 2001, vol. 2, no. 3(7).

7. Chistyakov S.I., Denisova N.F., Sayakhov F.L. Eksperimental'noe issledovanie zavisimosti dielektricheskikh svojstv nefti i ee frakcij ot chastoty // Izvestiya Vysshikh uchebnykh zavedenij. Neft' i gaz, 1972, no. 5, pp. 53–56.

8. Fatykhov M.A. Osobennosti nagreva i plavleniya parafina v koaksial'noj sisteme pod vozdejstviem vysokochastotnogo ehlektromagnitnogo izlucheniya // Teplofizika vysokikh temperature, 2002, vol. 40, no. 5, pp. 802–809.

9. Fatykhov M.A., Fatykhov L.M., Microwave electromagnetic method of melting the paraffin plug in an open coaxial system // J. Eng. Phys. Thermophys., 2015, vol. 88, no. 3, pp. 724–729.

10. Fatykhov M.A. Research of the depth of heating of highly viscous dielectric liquid under high-frequency electromagnetic field using the method of dimensional theory // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2016, vol. 52, iss. 1, pp. 79–84.

11. Kovaleva L.A., Zinnatullin R.R., Mullayanova A.I., Shrubkovskii I.I. Experimental studies of Heating rheologically complex fluids with electromagnetic field // *High Temperature*, 2016, vol. 54, no. 4, pp. 612–614.

12. Davletbaev A., Kovaleva L., Babadagli T. Combining solvent injection Electromagnetic heating and hydraulic fracturing for multistage heavy oil recovery // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2016, vol. 30, no. 2, pp. 207–224.

13. Kovaleva L., Musin A. Numerical modeling of heavy hydrocarbon liquid heating // *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2016, vol. 33, no. 1, pp. 169–175.

14. Davletbaev A.Y., Kovaleva L.A., Nasyrov N.M., Babadagli T. Multi-stage hydraulic fracturing

and radio-frequency electromagnetic radiation for heavy-oil production // *Journal of Unconventional Oil and Gas Resources*, 2015, vol. 12, pp. 15–22.

15. Makogon Y.F. Natural gas hydrates – A promising source of energy // *J. Natural Gas Science and Engineering*, 2010, no. 2, pp. 1–21.

16. Yanke E., Ehmde F., Lesh F. Special'nye funktsii (Formuly, grafiki, tablicy). Moscow, 1964, 344 p.

17. Samarskij A.A., Gulin A.V. Chislennye metody. Moscow: Nauka, 1989, 432 p.

18. Fatykhov M.A. Vliyanie chastoty dvizhushchegosya istochnika ehlektromagnitnogo izlucheniya na fazovyy perekhod v nefteprovodakh s asfal'tosmoloparaffinovymi otlozheniyami // *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo centra RAN*, 2025, no. 3, pp. 26–35.

MATHEMATICAL MODELING OF THE DESTRUCTION OF SOLID DEPOSITS IN PIPELINES BY A MOVING SOURCE OF ELECTROMAGNETIC RADIATION

© M.A. Fatykhov

Akmullah Bashkir State Pedagogical University,
3a, ulitsa Oktybrskoy revolyutsii, 450008, Ufa, Russian Federation

Analysis of selection of frequency of electromagnetic radiation for destruction of asphalt-resin-paraffin deposits in oil pipeline is carried out. Mathematical model is presented and theoretical study of process of electromagnetic heating of asphalt-resin-paraffin plug in pipe is carried out, which is in electrodynamic sense circular waveguide. Model includes heat conduction equation with distributed heat sources in cylindrical coordinate system. It is assumed that solid deposits have completely blocked oil pipeline and source of electromagnetic waves of type H_{01} moves in pipe as surface of solid and liquid phases is moved. Formula for density of moving volumetric heat sources is obtained. The absorbed power of electromagnetic energy is determined by the rectangle method. The density and thermal conductivity of asphalt-resin-paraffin are considered to be independent of temperature, the heat capacity at the phase transition temperature has a δ -shaped feature. Heat exchange on the outer surface of the pipe is described by Newton's law. The velocity of the electromagnetic wave source along the longitudinal coordinate is specified constant and selected so that no zone with unmelted deposits remains behind the source. The problem is solved numerically by the end-to-end calculation method without explicit phase separation. Achieving a complex configuration of heat sources and temperature is disclosed. The dependence of the imaginary part of the longitudinal wave number on the frequency is built for a cylindrical waveguide with an asphalt-resin-paraffin plug. The distribution of heat sources in the cross section of the waveguide looks like an ellipse and is strongly uneven. The maximum of heat sources falls on the waveguide axis. The configuration of the sources does not depend on the frequency. The spatial distribution of temperature in the pipe is investigated. The heating process is highly dependent on the density distribution of heat sources. Over time, the temperature distribution due to thermal conductivity and in the longitudinal direction due to the movement of the wave source becomes more uniform. The results are of practical value for establishing the initial indicators of the technology for removing asphalt-resin-paraffin plugs in an oil pipeline and an oil well by exposure to electromagnetic radiation.

Keywords: electromagnetic waves, oil pipeline, asphalt-resin-paraffin deposits, paraffin, phase transition.