

НАГРЕВ И РАЗРУШЕНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ В НЕФТЕПРОВОДАХ ДВИЖУЩИМСЯ ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.А. Акчурина, канд. физ.-мат. наук, доцент

Уфимский государственный нефтяной технический университет
(Россия, г. Уфа)

***Аннотация.** Проводятся расчёты процесса нагрева и расплавления пробки из твёрдых отложений в трубопроводе воздействием одного из типов электромагнитных волн, способных распространяться в нём, как в круглом волноводе. Предполагается, что источник электромагнитных волн движется. Это позволяет избежать перегрева среды в одних точках и расплавлять твёрдые отложения по всей длине пробки. При воздействии на среду рассмотренным типом волн получают сложные конфигурации распределения тепловых источников и температуры, особенно в случае движущегося источника электромагнитных волн.*

***Ключевые слова:** электромагнитные волны, трубопровод, парафиновые отложения.*

Основная часть природных углеводородов транспортируется в нефте- и газопроводах, особенно от скважин к месту сбора углеводородов. В зимнее время на стенках трубопроводов могут образовываться твёрдые отложения, иногда полностью их закупоривающие. В результате возникает проблема разрушения образовавшейся пробки. Для удаления пробок обычно используют тепловые, химические и механические методы. Все они технически очень сложны, требуют больших финансовых затрат или загрязняют окружающую среду. Требуется разработка метода очистки трубопроводов менее сложного, затратного и экологически безопасного.

Таким методом является воздействие на пробку 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 (например, газогидрат или парафиногидрат). 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, 5] 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 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 про-

цесса 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 [1-5, 8], полагается, что диэлектрик (парафин) полностью заполняет волновод, решается уравнение теплопроводности. Рассматривается процесс расплавления пробки в нефтепроводе такого же диаметра, что в работе [1, 5]. У волны типа H_{01} цилиндрические составляющие напряженности ЭМ поля $E_r=H_\varphi=0$. Остаются компоненты поля:

$$E_\varphi = i \frac{\omega \mu_0}{\chi} H_0 J_0'(\chi r) e^{-i\alpha(z-z_0)}; \quad (1)$$

$$H_r = -i \frac{\alpha}{\chi} H_0 J_1'(\chi r) e^{-i\alpha(z-z_0)}; \quad (2)$$

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

где i – мнимая единица; ω – круговая частота ЭМ поля; 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 объёмными 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; $\varepsilon_0', \varepsilon_0''$ – 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; 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} – $\mu_n = 3,832$.

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 [1, 5], получаем:

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

где P – мощность источника ЭМ волн.

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:

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

где ρ, c_T, λ – плотность, теплоёмкость, теплопроводность высокопарафинистой нефти.

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

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

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

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. В интеграле H – длина парафиновой пробки.

Для решения уравнения (5) принимались граничные условия. На торце пробки $z=0$ задавался конвективный теплообмен по закону Ньютона [4,5]:

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

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

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 :

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

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

В точке $r=0$ теплообмен отсутствует:

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

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

Анализ результатов вычислений. При проведении расчётных исследований использовались параметры высокопарафинистой нефти [1]: $\rho=950$ 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 волно-

вода очень неравномерно и неравномерность увеличивается с ростом частоты. Максимум плотности тепловых источников находится приблизительно в середине между осью и стенкой волновода. В про-

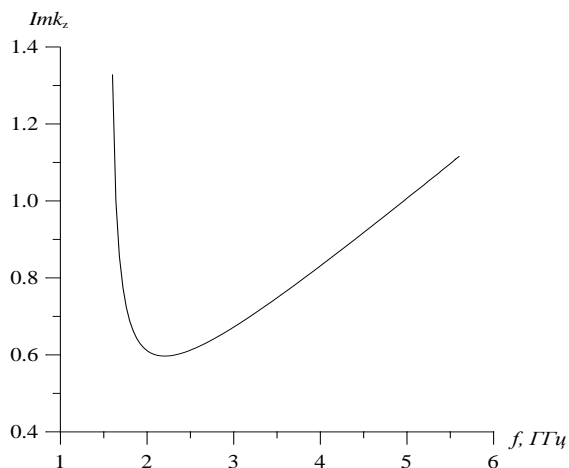


Рис. 1. Мнимая часть продольного волнового числа, как функция частоты для металлического цилиндрического волновода, заполненного парафином.

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.

Заключение. Рассмотрен процесс удаления парафиновой пробки одним из воз-

дольном направлении плотность тепловых источников падает по экспоненциальному закону. С ростом частоты скорость спада плотности тепловых источников в продольном направлении увеличивается.

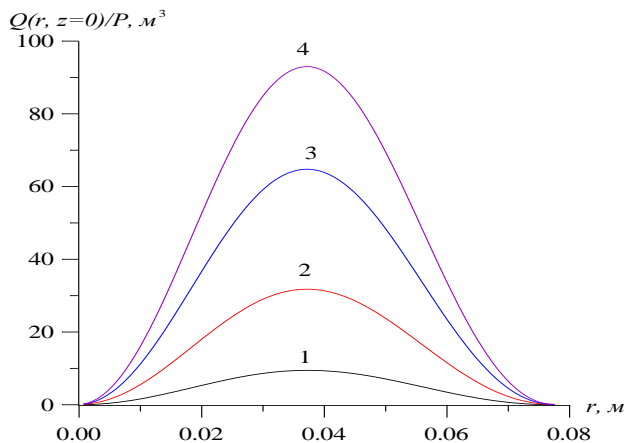


Рис. 2. Поперечное распределение плотности мощности тепловых потерь, нормированной на мощность источника в цилиндрическом волноводе, заполненном парафином $f, 10^9$ Гц; 1 – 1,6; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4.

можных типов волн, которые могут быть возбуждены в круглом волноводе – H_{01} . Расчёты показали, что чем меньше частота возбуждаемых ЭМ волн, тем эффективнее разрушение пробки. 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 твёрдую и жидкую фазы, имеет форму конуса с радиусом, уменьшающимся вдоль пробки. Такая форма расплавленной зоны может привести к разрушению пробки до её полного расплавления. Если преследовать цель пробить в пробке отверстие по всей её длине, а не расплавлять её по всему радиусу трубопровода, то движение «ЭМ крота» можно начинать намного раньше и двигать быстрее. В таком случае более высокие частоты могут иметь даже преимущество.

Библиографический список

1. Акчурина В.А. Электромагнитное воздействие на углеводородные отложения // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2016. – №6-1. – С. 7-12.
2. Акчурина В.А., Фатыхов М.А. Математическое моделирование расплавления диэлектрической пробки, заполняющей трубу, движущимся источником электромагнитного излучения // Академический журнал Западной Сибири. – 2014. – Т.10. – №2. – С. 31.
3. Абдуллина В.А., Фатыхов М.А. Расплавление твердых отложений в трубопроводах движущимся источником электромагнитного поля // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2012. – №6. – С. 60-68.
4. Абдуллина В.А., Фатыхов М.А. Особенности изменения источников тепла в круглом волноводе заполненном многофазной средой // В мире научных открытий. – 2010. – №4-10. – С. 145-147.
5. Балакирев В.А., Сотников Г.В., Ткач Ю.В., Яценко Т.Ю. Разрушение асфальтопарафиновых отложений в нефтяных трубопроводах движущимся источником высокочастотного электромагнитного излучения // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71. выпуск 9. – С. 1.
6. Кислицын А.А. Численное моделирование высокочастотного электромагнитного прогрева диэлектрической пробки, заполняющей трубу // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1996. – Т.37. – №3. – С. 75-82.
7. Лебедев И.В. Техника и технология СВЧ. – М.: Высшая школа, 1970. – 440 с.
8. Фатыхов М.А., Абдуллина В.А. Электромагнитный способ плавления парафина в трубе // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2012. – №7. – С. 25-28.

HEATING AND DESTRUCTION OF DEPOSITS IN OIL PIPELINES BY MOVING SOURCE OF ELECTROMAGNETIC RADIATION

V.A. Akchurin, *candidate of physico-mathematical sciences, associate professor*
 Ufa state petroleum technical university
 (Russia, Ufa)

Abstract. *The calculations of the process of heating and melting the tubes from solid deposits in the piping exposed to one of the types of electromagnetic waves that can spread in it, as in a circular waveguide. It is believed that the source of electromagnetic waves moves. This avoids overheating of the medium at some points and melt solid deposits along the entire length of the tube. When exposed to the environment of the considered type of waves obtained by the complex configuration of the distribution of heat sources and temperatures, especially in the case of a moving source of electromagnetic waves.*

Keywords: *electromagnetic wave, tubing, paraffin deposits.*