

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГИДРАТОПАРАФИНОВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ В ПОДЗЕМНОМ ОБОРУДОВАНИИ СКВАЖИН

Фатыхов М.А.¹, Багаутдинов Н.Я.¹, Фатыхов Л.М.²

¹*Башикирский государственный педагогический университет,*

²*Уфимский государственный нефтяной технический университет*

В настоящей работе определено значение частоты электромагнитного воздействия для разрушения отложений в скважинах. При этом электромагнитные волны вводятся в межтрубное пространство скважины, а отложения образуются как внутри насосно-компрессорных труб, так и в межтрубном пространстве. Исследуемая величина зависит от значений диэлектрических параметров отложений, электрофизических свойств и размеров труб.

Проблема борьбы с газо- и парафиногидратными пробками в системах добычи и подготовки нефти и газа для нефтегазодобывающих регионов Западной Сибири и Крайнего Севера является чрезвычайно актуальной и постоянно действующей. Она требует для своего решения создания новых методов, основанных на современных достижениях фундаментальных наук. На наш взгляд, более приемлемой является возможность использования для решения этой проблемы эффектов, возникающих при воздействии физических полей - температурного поля, поля градиентов давления, упругих и электромагнитных и других волновых полей.

Газогидрат и вещество гидратопарафиновых пробок по своему составу и физико-химическим свойствам является чрезвычайно сложным и разнообразным. Здесь необходимо отметить следующее важное свойство этих веществ – в основных его компонентах газогидрата и парафина в определенных термодинамических условиях может происходить фазовый переход – газовый гидрат диссоциируется на газ и воду, а в парафине разрушается кристаллическая структура, и он расплавляется. В связи с этим в работах [1-3] рассмотрена возможность использования энергии электромагнитного поля для расплавления парафиновых и разрушения газогидратных пробок в нефтегазопромысловом оборудовании.

При добыче углеводородов скважинным способом продукция проходит или внутри насосно-компрессорной трубы (НКТ), или в кольцевом пространстве между НКТ и обсадной колонной скважины. Соответственно и газогидратные пробки образуются или в НКТ, или в кольцевом пространстве между НКТ и обсадной колонной. В настоящей работе рассмотрим случай разрушения газогидратной пробки внутри НКТ с использованием энергии электромагнитной волны.

Разрушение газогидратной пробки внутри НКТ возможно путем ввода электромагнитной энергии непосредственно в НКТ или в межтрубное пространство. В связи с разработкой такой технологии необходимо решить ряд принципиально новых физико-математических, инженерно-физических и технологических задач. В частности, необходимо решить проблему совмещения технологии добычи нефти и газа с канализацией электромагнитной энергии от наземного генератора по трубам скважины. Эта проблема в основном сводится к выбору частоты электромагнитного воздействия, к изучению которой и посвящена настоящая работа.

Рассмотрим особенности разрушения газогидрата внутри НКТ в случае, когда электромагнитная энергия вводится в межтрубное пространство. Система, состоящая из НКТ и обсадной колонны, представляет в данном случае коаксиальную линию передачи электромагнитных волн от наземного генератора. При соответствующем способе возбуждения в такой коаксиальной линии передачи устанавливается режим бегущих электромагнитных волн. Вследствие конечной электропроводности материала труб и диэлектрических потерь электромагнитной энергии в среде, находящейся между трубами, происходит преобразование части энергии электромагнитной волны в тепловую, повышается температура в скважине. За счет повышения температуры в скважине происходит нагрев и разложение гидратопарафиновой пробки.

Очевидно, что для целенаправленного и обоснованного применения электромагнитных полей в технологических процессах разрушения газогидратных пробок в скважинах необходимо изучить физические основы распространения в скважинной системе ВЧ электромагнитных волн.

В коаксиальной линии передачи ВЧ электромагнитная волна распространяется в виде так называемой поперечной ТЕМ-волны, для которой отличны от нуля только радиальная компонента напряженности электрического поля \dot{E}_{0r} и азимутальная составляющая напряженности магнитного поля $\dot{H}_{0\varphi}$ в цилиндрической системе координат r, φ, z . Составляющие \dot{E}_{0r} и $\dot{H}_{0\varphi}$ для поперечной ТЕМ-волны в коаксиальной системе получаются из решения уравнений Максвелла. Продольная составляющая вектора Пойнтинга в цилиндрической системе координат для коаксиальной линии передачи имеет вид

$$P_z = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\dot{E}_r \dot{H}_\varphi^*), \quad (1)$$

где P_z – продольная составляющая вектора Пойнтинга вдоль оси, Вт/м²;

\dot{E}_r - радиальная составляющая напряженности электрического поля, В/м;

\dot{H}_z^* - азимутальная составляющая напряженности магнитного поля, А/м.

Вследствие того, что электромагнитная энергия передается в диэлектрике, заполняющем пространство между НКТ и обсадной колонной, на устье скважины при $z = 0$ для модуля вектора Пойнтинга, усредненного по площади сечения межтрубного пространства скважины, можно написать выражение

$$P_{0z} = \frac{P_0}{\pi(R_3^2 - R_2^2)}, \quad (2)$$

где P_0 , - колебательная мощность генератора, Вт;

R_2, R_3 - соответственно, внешний радиус НКТ и внутренний радиус обсадной колонны, м.

Составляющие напряженности электромагнитного поля \dot{E}_r , и \dot{H}_φ , определяемые из решения уравнений Максвелла имеют вид

$$\dot{E}_{0r} = \frac{\dot{D}}{r} e^{-j\Gamma z}, \quad \dot{H}_{0\varphi} = \frac{\dot{E}_{0r}}{\dot{Z}_c} = \frac{\dot{D}}{\dot{Z}_c r} e^{-j\Gamma z}, \quad (3)$$

где \dot{D} - комплексная амплитуда распространяющейся волны;

$\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon'}} (1 + 0,5 jtg\delta)$ - волновое сопротивление диэлектрика, заполняющего

пространство между НКТ и обсадной колонной, Ом;

ε' - относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего пространство между НКТ и обсадной колонной;

ε_0, μ_0 - диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума, Ф/м и Гн/м;

$\dot{\Gamma} = \beta - j\alpha$ - постоянная распространения электромагнитных волн, м⁻¹;

β - волновое число, м⁻¹;

j - мнимая единица;

α - коэффициент затухания электромагнитных волн, м⁻¹.

Для нахождения неизвестной величины \dot{D} из выражений (1) и (3)

получаем соотношение
$$|\dot{D}|^2 = \frac{2r^2 Z_c P_0}{\pi(R_3^2 - R_2^2)}, \quad (4)$$

где $Z_c = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon'}}$.

Высокочастотные электромагнитные волны, распространяясь вдоль коаксиальной линии передачи, теряют свою мощность за счет потерь на металлических стенках труб и в диэлектрике, заполняющем межтрубное пространство. Плотность распределения тепловых источников при этом определяется из выражения

$$q = -\frac{1}{2} \operatorname{Re} \frac{\partial}{\partial z} (\dot{E}_r \dot{H}_\varphi^*). \quad (5)$$

Подставляя вместо \dot{E}_r и \dot{H}_φ^* их выражения из (3), получим

$$q = \frac{\alpha |\dot{D}|^2}{r^2 Z} e^{-2\alpha z}. \quad (6)$$

С учетом формулы (4) из (6) имеем

$$q = \frac{2\alpha P_0}{\pi(R_3^2 - R_2^2)} e^{-2\alpha z}. \quad (7)$$

В выражении (7) α - общий для НКТ, обсадной колонны и диэлектрика, заполняющего пространство между ними, коэффициент затухания электромагнитных волн. Он является суммой коэффициентов затухания

электромагнитных волн в НКТ – α_3 , в диэлектрике, заключенном между НКТ и обсадной колонной – α_4 , и в обсадной колонне – α_5 , т.е.

$$\alpha = \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5. \quad (8)$$

Соответственно тепловые источники в выражении (7) являются суммой тепловых источников в НКТ q_3 , в диэлектрике между НКТ и обсадной колонной q_4 в обсадной колонне q_5 .

$$q_3 = \frac{2\alpha_3 P_0}{\pi(R_3^2 - R_2^2)} e^{-2(\alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5)Z}, \quad (9)$$

$$q_4 = \frac{2\alpha_4 P_0}{\pi(R_3^2 - R_2^2)} e^{-2(\alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5)Z}, \quad (10)$$

$$q_5 = \frac{2\alpha_5 P_0}{\pi(R_3^2 - R_2^2)} e^{-2(\alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5)Z}. \quad (11)$$

Коэффициенты затухания электромагнитных волн α_3 и α_5 определяются из выражений

$$\alpha_3 = \frac{R_{S3}}{2Z_C R_2 \ln(R_3/R_2)}, \quad (12)$$

$$\alpha_5 = \frac{R_{S5}}{2Z_C R_3 \ln(R_3/R_2)}. \quad (13)$$

Здесь R_{S3} и R_{S5} – активные части поверхностного сопротивления НКТ и обсадной колонны, определяемые из выражений

$$R_{S3} = \sqrt{\frac{\pi f \mu_{a3}}{\sigma_3}}, \quad (14)$$

$$R_{S5} = \sqrt{\frac{\pi f \mu_{a5}}{\sigma_5}}, \quad (15)$$

где f – частота электромагнитных волн, Гц;

μ_{a3} и μ_{a5} – абсолютные магнитные проницаемости НКТ и обсадной колонны соответственно, Гн/м;

σ_3 , σ_5 – удельные электропроводности НКТ, обсадной колонны, $\text{Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$.

Электромагнитная энергия, распространяющаяся между НКТ и обсадной колонной, рассеивается в очень тонком поверхностном слое. Но вследствие очень большой теплопроводности металлических стенок труб и небольшой их толщины, тепловые источники будут равномерно распределяться по толщине труб. Тогда выражения (9) и (11) можно переписать в виде

$$q_3 = \frac{2\alpha_3 P_0}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} e^{-2(\alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5)Z}, \quad (16)$$

$$q_5 = \frac{2\alpha_5 P_0}{\pi(R_4^2 - R_3^2)} e^{-2(\alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5)Z}, \quad (17)$$

где R_1 и R_4 - внутренний радиус НКТ и внешний радиус обсадной колонны.

Коэффициент затухания электромагнитных волн α_4 определяется из выражения /4,5/:

$$\alpha_4 = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon'_4 \mu_0}{2} \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_4} - 1 \right)}, \quad (18)$$

где $\omega = 2\pi f$ - круговая частота электромагнитных волн, рад;

ε'_4 , $\operatorname{tg} \delta_4$ - относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь среды в межтрубном пространстве.

Частоту бегущих электромагнитных волн, при которой наибольшая часть их энергии поглощается отрезком скважины, расположенным между устьем скважины и нижней границей гидратной пробки, можно определить из условия затухания электромагнитных волн на этом отрезке в e раз

$$e^{-2\alpha H} = e^{-1},$$

где H - расстояние от устья скважины до нижней границы гидратной пробки.

$$\text{Отсюда } \alpha = \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 = 1/2H. \quad (19)$$

Подставляя в выражение (19) вместо α_3 , α_4 , α_5 соответствующие выражения (12), (13), (18) и используя (19), получим

$$\frac{R_{S3}}{2Z_C R_2 \ln(R_3 / R_2)} + \omega \sqrt{\frac{\varepsilon_{a4} \mu_0}{2} \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_4} - 1 \right)} + \frac{R_{S5}}{2Z_C R_3 \ln(R_3 / R_2)} = \frac{1}{2H} \quad (20)$$

Если обозначить f через x^2 , то из выражения (20) получится квадратное уравнение

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad , \quad (21)$$

$$a = 2\pi \sqrt{\frac{\varepsilon_{a4}\mu_0}{2} \left(\sqrt{1 + tg^2 \delta_4} - 1 \right)} \quad , \quad (22)$$

$$b = \sqrt{\pi} \frac{R_3 \sqrt{\frac{\mu_{a3}}{\sigma_3}} + R_2 \sqrt{\frac{\mu_{a5}}{\sigma_5}}}{2Z_c R_3 R_2 \ln(R_3/R_2)} \quad , \quad (23)$$

$$C = -\frac{1}{2H} \quad . \quad (24)$$

Решение уравнения (21) имеет вид

$$X_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a} \quad , \quad (25)$$

$$\text{где } D = b^2 - 4ac \quad . \quad (26)$$

Если диэлектриком, заполняющим пространство между НКТ и обсадной колонной является газ (например, воздух), то $tg\delta_4 \approx 0$, $\varepsilon_0 \varepsilon'_4 \approx \varepsilon_0$, где ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума. Частота f в этом случае определяется из выражения

$$f = \frac{1}{\pi} \left[\frac{Z_c \ln(R_3 / R_2) \cdot R_2 \cdot R_3}{H \left(R_3 \sqrt{\frac{\mu_{a3}}{\sigma_3}} + R_2 \sqrt{\frac{\mu_{a5}}{\sigma_5}} \right)} \right]^2 \quad (28)$$

Как видно из этой формулы, частота, при прочих условиях, существенно зависит от соотношения размеров труб. В связи с этим на рис.1 представлена

зависимость выражения $f_1 = f / \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{Z_c}{\sqrt{\mu_a/\sigma}} \frac{R_3}{H} \right)^2 \right]$ от соотношения радиусов

R_3 и R_2 . Исследования формулы (28) на экстремум показывает, что при

заданном значении R_3 частота максимальна при некотором соотношении размеров R_3 / R_2 . Для труб из одного материала $R_3 / R_2 = 3,6$. Это значение однозначно определяет условие минимума затухания электромагнитных волн в межтрубном пространстве [4]. При этом возможно расплавление отложений по всей их длине.

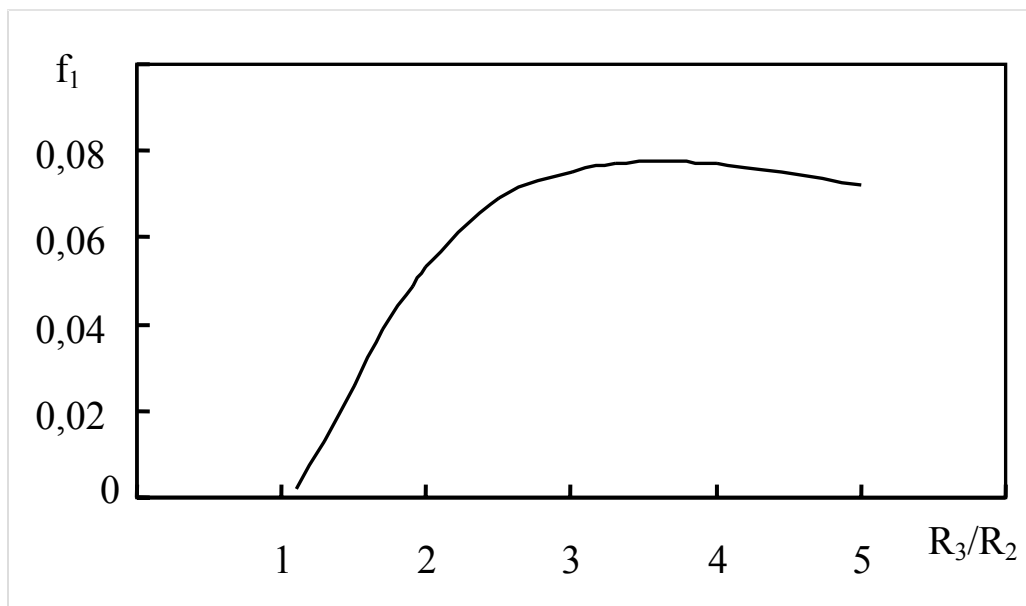


Рисунок 1

Формула (28) также показывает, что необходимая частота зависит от безразмерного параметра R_3 / H , от электрофизических свойств материалов труб и диэлектрической проницаемости среды, заполняющей межтрубное пространство скважины. В частности, если $R_3 = 0,12755$ м, $R_2 = 0,073$ м, $H = 850$ м, $\sigma = 0,34 \cdot 10^7$ ом⁻¹ м⁻¹, $\mu_a = 2,72 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м [1] при относительных диэлектрических проницаемостях, равных единице и трем, частоты воздействия равны соответственно 41,7 МГц и 13,9 МГц. Эти значения с учетом погрешностей их входят в число разрешенных международным соглашением частот. Поэтому эти частоты могут быть рекомендованы для расплавления отложений, образующихся в межтрубном пространстве скважин.

В случае, когда межтрубное пространство заполнено со средой, обладающей диэлектрическими потерями, наивыгоднейшая частота электромагнитных волн для разложения газогидратной и парафиновой пробки определяется из формулы

$$f = x^2 = \left[\frac{-b + \sqrt{D}}{2a} \right]^2 ,$$

где значения необходимых параметров определяются (22)-(24) и (26).

Литература

1. Саяхов Ф. Л., Бабалян Г. А., Чистяков С. И. О высокочастотном нагреве призабойной зоны скважин // Нефтяное хозяйство. 1970. № 10. С. 49-52.
2. Фатыхов М.А. Особенности нагрева и плавления парафина в коаксиальной трубе высокочастотным электромагнитным излучением // ТВТ. 2002. Т. 40. № 5. С. 802-810.
3. Фатыхов М. А., Саяхов Ф. Л., Хабибуллин И. Л. Физико-технические основы электромагнитного воздействия на отложения в нефтегазопромысловом оборудовании //Проблемы нефти и газа: Тез. докл. Респуб. научно – техн. конф. Уфа: УНИ, 1988. С. 29-31.
4. Ширман Я.Д. Радиоволноводы и объемные резонаторы. - М.: Связьиздат, 1959. - 397с.
5. Рамо С. и Уиннери Дж. Поля и волны в современной радиотехнике. М.-Л.: ГИТТЛ, 1950. - 567с.