

УДК 537.9

DOI: 10.31040/2222-8349-2025-0-3-26-35

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ДВИЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД В НЕФТЕПРОВОДАХ С АСФАЛЬТО-СМОЛОПАРАФИНОВЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ

© М.А. Фатыхов

Представлена математическая модель и выполнено теоретическое исследование процесса электромагнитного прогрева парафиновой (асфальто-смолопарафиновой) пробки в трубе. Теплообмен на внешней поверхности трубы описывается законом Ньютона. Предполагается, что источник электромагнитных волн типа H_{11} движется в трубе по мере перемещения поверхности раздела твердой и жидкой фаз. Раскрыто достижение сложной конфигурации тепловых источников и температуры. Исследовано пространственное распределение температуры в трубе. Результаты представляют практическую ценность для установления исходных показателей технологии удаления асфальто-смолопарафиновых пробок в трубопроводе и нефтяной скважине воздействием электромагнитного излучения

Ключевые слова: электромагнитные волны, трубопровод, асфальто-смоло-парафиновые отложения.

Введение. В настоящее время в нефтедобывающей промышленности наблюдается тенденция к увеличению доли трудноизвлекаемых запасов нефти. К ним относятся, в частности, месторождения с нефтями, характеризующимися высокими вязкостью и содержанием асфальто-смолопарафинистых веществ (АСПВ), месторождения с низкопроницаемыми терригенными и карбонатными коллекторами и т.п. [1].

В процессе нефтеизвлечения изменяются естественные термобарические условия залежей, что приводит к отложению АСПВ на стенках скважин и подъемных труб, в насосном оборудовании и наземных коммуникациях. Для предотвращения отложений АСПВ применяются обработки химическими реагентами (ингибиторами, деэмульгаторами и др.), магнитными и акустическими полями. Широкое применение находят тепловые методы удаления АСПВ, в частности, закачкой горячей нефти или реагентов-растворителей, при взаимодействии с которыми протекают экзотермические реакции.

Развитие технологии и техники борьбы с парафино- и гидратообразованием имеет интересную историю. Однако к настоящему времени все трудности, связанные с решением данной проблемы, не преодолены. Многообразие условий разработки месторождений и характеристик добываемой продукции требует инновационных подходов [2].

Исходя из модели образования парафинов или кристаллогидратов вследствие изменения термобарических условий и механического прилипания отложений к стенкам скважины, удаление АСПВ и кристаллогидратов производится либо путем подачи в скважину различных реагентов, которые растворяют отложения (или прогревают их зону), либо скважинными нагревателями, либо механическими способами с использованием скребков. Некоторые технологии позволяют удалять отложения даже при отсутствии циркуляции внутри насосно-компрессорной трубы (НКТ) [3]. В частности, для предотвращения образования кристаллогидратов в газопроводе в поток газа добавляют метанол.

Наряду с общими, есть ряд специальных методов. Так, например, для предотвращения образования кристаллогидратных пробок используются осушение перекачиваемого газа, метод сброса давления на концах трубопровода, использование лазерного излучения для возбуждения молекулярных уровней и т.п. Все перечисленные методы, несмотря на их различия, имеют высокую стоимость, сложны в реализации или для их обеспечения требуется организация производства химических веществ, очень часто токсичных, таких, например, как метанол.

Такое положение дел заставляет искать новые более дешевые и безопасные методы предотвращения образования и разрушения

кристаллогидратных и парафиновых пробок. Результаты исследований, проведенных как в нашей стране, так и за рубежом, свидетельствуют о том, что одним из эффективных методов борьбы с АСПВ, принципиально отличающимся от традиционных, является использование энергии высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных полей (ЭМП). При этом наиболее значимым эффектом является нагрев, происходящий в результате перехода энергии электромагнитного излучения (ЭМ) во внутреннюю энергию среды в процессах ее поляризации.

Технология борьбы с асфальто-смоло-парафиновыми отложениями (АСПО) в нефтедобывающих скважинах энергией ВЧ и СВЧ ЭМП отличается тем, что скважина служит и трубой, через которую извлекается на поверхность нефть, и волноводом или коаксиальной линией, по которой транспортируется энергия ЭМП. Эффективность данного процесса зависит от электромагнитной мощности в скважине. Максимальная мощность в скважину передается при равенстве выходных волновых сопротивлений генератора и скважины. Значения сопротивления скважины зависят от значений диэлектрических параметров сред, заполняющих скважину, характера этих величин в зависимости от температуры, фазовых переходов, структуры газожидкостной смеси и т.д.

С точки зрения ВЧ электродинамики ствола скважин и трубопроводы являются для электромагнитных волн линиями передачи (коаксиальные линии, цилиндрические волноводы). Фазовые и групповые скорости электромагнитных волн, их затухание определяются типом волн, материалом стенок трубопровода и диэлектрическими свойствами углеводородов. Направив ВЧ мощность от внешнего генератора на пробку, ее можно нагреть до температуры плавления парафина или разложения кристаллогидрата и таким образом устранить препятствие [4–9]. Существенным достоинством ВЧ метода прогрева пробок является объемный характер, поскольку электромагнитные волны в ВЧ диапазоне могут проникать в материал пробки на большую глубину. Кроме этого, изменением уровня мощности ВЧ генератора и частоты электромагнитного излучения можно управлять процессом разогрева, так как диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь материала пробки зависят от частоты излучения и температуры [10].

В работе [11] исследованы процессы нагрева и расплавления парафиновых пробок в стволах нефтяных скважин и нефтепроводах мощным электромагнитным излучением в режиме непрерывной генерации электромагнитных волн. Для выбранных мощностей и частот ВЧ источника определены времена проплавления сквозного канала в пробке и времена ее полной ликвидации с учетом неоднородности распределения ВЧ мощности по сечению ствола скважины и омического поглощения ВЧ мощности в металлических стенках труб скважины. Поскольку металлические стенки находятся в тепловом контакте с парафиновой пробкой, то появляется дополнительный фактор разогрева парафиновой пробки. В ряде случаев, в частности, в случае оборудования ствола нефтяной скважины, учет нагрева пробки стальными стенками существенно сокращает время проплавления парафиновой пробки. Процесс расплавления идет постепенно от центральной области ствола скважины к периферии так, что расплавленная зона парафина имеет коническую форму. Коническая форма расплавленной зоны может привести к разрушению пробки до ее полного расплавления. В рассмотренных численных примерах [12] в коаксиальном стволе оборудования нефтяной скважины за 34 часа полностью устраняется парафиновая пробка длиной 100 м при мощности ВЧ генератора 10 кВт и значении рабочей частоты 10 МГц. При увеличении мощности до 20 кВт время устранения пробки сократилось до 12 часов.

Проведен также анализ процесса ликвидации парафиновых пробок в стволе нефтескважины ВЧ источником, работающем в режиме периодического включения и выключения (периодический режим работы). Авторами [12] показано, что в этом режиме полное время устранения пробки существенно зависит от мощности ВЧ источника и скважности цикла его работы. При фиксированной мощности ВЧ источника полное время расплавления пробки нелинейно возрастает с увеличением скважности. Полное (суммарное) время работы самого ВЧ источника при увеличении скважности цикла работы ВЧ генератора также возрастает. Эти закономерности объясняются ростом тепловых потерь с увеличением скважности (времени отключения ВЧ источника). Установлено, что полное время работы источника (или затраченная энергия при фиксированной мощности) слабо зависит от его времени работы в рамках

одного цикла. Существует пороговое значение скважности, при котором полное проплавление парафиновой пробки никогда не достигается.

Нефтескважина в электродинамическом смысле является коаксиальной линией передачи. В силу особенности дисперсии ТЕМ волн в коаксиальной линии всегда может быть выбрано оптимальное значение рабочей частоты, которое соответствует значению коэффициента поглощения ВЧ мощности в пробке, равному обратной длине пробки. Нефтепровод можно рассматривать как цилиндрический волновод, способный пропускать электромагнитные волны с частотой выше частоты отсечки. На этих частотах происходит сильное поглощение ВЧ мощности и нагрев только узкой области пробки, примыкающей к ВЧ генератору. Для устранения парафиновых пробок в этих условиях в работе [11] предложено использовать перемещающийся источник электромагнитного излучения. Скорость его передвижения определяется скоростью движения границы раздела жидкой и твердой фаз в процессе плавления парафиновой пробки под воздействием ВЧ электромагнитного излучения. Определена скорость движения источника ВЧ мощности, времена полной ликвидации пробки. Показано, что для выбранных параметров ВЧ источника и парафиновой пробки эффективность работы движущегося ВЧ источника доля энергии, затраченной на плавление парафиновой пробки, достигает 70%.

Исследован процесс ВЧ очистки парафиновых отложений в нефтепроводе на ранней стадии их формирования, когда отложения еще не закупоривают нефтепровод. Очистка осуществляется движущимся ВЧ источником. Показано, что время ВЧ очистки существенно зависит от величины и положения максимума плотности мощности тепловыделения. С увеличением частоты максимум плотности мощности тепловыделения смещается от центра к стенке нефтепровода, где локализован парафиновый слой. Растет также величина максимального значения плотности мощности тепловыделения. Соответственно, время очистки уменьшается. Зависимость времени очистки нефтепровода от толщины парафиновых отложений существенна только для малых уровней мощности ВЧ излучения. Начальная температура нефти оказывает слабое влияние на время ВЧ очистки.

Ранее процессы разогрева и плавления парафиновых пробок в нефтескважине были рассмотрены в работе [8]. При этом использовалась

модель однородного распределения ВЧ поля по сечению ствола. Кроме этого, не учитывалось омическое поглощение ВЧ мощности в стенках скважин, которое будет приводить к дополнительному затуханию электромагнитного излучения при его распространении и, соответственно, к нагреву стенок. В действительности в скважине для рассматриваемых электромагнитных волн ТЕМ типа (кабельные волны) распределение ВЧ мощности в поперечном сечении сильно неоднородно. Учет неоднородного радиального распределения ВЧ мощности приводит к качественным и количественным особенностям разогрева и плавления пробки в стволе скважины [9]. Кроме этого, ниже будет учтено дополнительное затухание ТЕМ волн в скважине, обусловленное потерями ВЧ мощности в стенках ствола скважины. Диссипация ВЧ мощности в стальных стенках труб приводит к нагреву стенок. А поскольку стальные стенки находятся в тепловом контакте с парафиновой пробкой, то появляется дополнительный канал разогрева пробки.

В работе [13] разработана лабораторная установка, и проведены исследования нагрева и плавления парафина под воздействием энергии электромагнитных колебаний в короткозамкнутой коаксиальной системе. Показано, что в зависимости от заполнения межтрубного пространства парафином или воздухом плавление парафина может происходить как вследствие его нагрева посредством теплопроводности, так и вследствие возникновения распределенных источников тепла в системе под воздействием электромагнитного поля. В последнем случае скорость нагрева и плавления парафина в коаксиальной системе значительно больше, чем в первом случае. На эти закономерности существенное влияние оказывают диэлектрические свойства парафина и электромагнитные свойства материалов труб. При прочих одинаковых условиях процесс нагрева и плавления парафина происходит в поле стоячей электромагнитной волны, образовавшейся из-за ее отражения от неоднородностей поверхностей труб коаксиальной линии.

Таким образом, полученные в этих работах результаты подтверждают перспективность метода электромагнитной обработки скважин с целью удаления отложений и увеличения их пропускной способности.

Интенсивнее всего преобразование ЭМ энергии в тепловую энергию происходит в диапазоне высокочастотных (ВЧ) волн. Вопрос в том, как

передать ЭМ энергию в предназначенную для этого среду. Не всякая линия передачи может передавать ЭМ волны любой частоты. Например, по коаксиальной линии передачи ЭМ энергия передается посредством ТЕМ волн, в которых не существует ограничений на частоту. А в волноводах имеются критические частоты, ниже которой ЭМ волны не могут быть переданы [14].

Коаксиальная линия передачи – это, предположим, скважина, в которой внутренним и внешним проводом могут служить насосно-компрессорная труба (НКТ) и обсадная колонна, если, конечно, они не касаются между собой. Если они касаются, то ЭМ энергия может быть передана по внутренней полости НКТ. В таком случае НКТ является в электродинамическом отношении круглым волноводом. Нефтепровод и газопровод тоже являются круглым волноводом.

В круглом волноводе могут распространяться только волны типа E или H [14]. Если нефтепровод имеет небольшой радиус, в нем могут распространяться ЭМ волны только очень большой частоты, которые из-за сильного поглощения ЭМ энергии средой быстро затухают. Поэтому среда греется крайне не равномерно. В одних точках может быть сильный перегрев и большие потери тепла в окружающую нефтепровод среду. В других точках наоборот, не достаточный для плавления среды нагрев. Вследствие этого разрушение пробки может быть только на небольшую глубину. В этих условиях возможно разрушение АСПО с помощью движущегося источника ВЧ ЭМ волн – «ЭМ крота». В этом способе источник ВЧ ЭМ излучения передвигается по мере плавления среды и появления возможности перемещения. Разрушение диэлектрической пробки, каковой является парафин, получается более эффективным. Особенности такого метода частично исследованы в работах [11, 12].

В волноводе возможно распространение нескольких типов волн, но не все из них легко могут быть возбуждены [14]. Особенно если это касается источника ЭМ волн, проталкиваемого вглубь трубопровода в расплавленную среду. Необходимо изучение всех возможных вариантов. В данном случае рассмотрен вариант распространения в волноводе волны типа H_{11} , у которого наименьшая критическая частота [14]. Особенности распространения такой волны в волноводе с электрическими потерями и фазовыми переходами сред, заполняющих волновод, не представлены в литературе.

В последние годы исследования применения электромагнитных полей для решения задач нефтегазодобычи развиваются в направлениях, освещенных в работах [15–20]. В настоящей работе моделируется и проводится численное исследование процесса нагрева и плавления парафиновой пробки в оборудовании нефтяных трубопроводов сверхвысокочастотным электромагнитным излучением, созданным электромагнитной волной типа H_{11} .

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 [13, 15].

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

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp(j\omega t), \quad \vec{H} = \vec{H}_0 \exp(j\omega t). \quad (2)$$

Плотность источников тепла описывается формулой:

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

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_{11} цилиндрическая составляющая напряженности ЭМ поля $E_z = 0$ [14]. Остаются компоненты поля:

$$E_r = i \frac{\omega \mu_0}{\chi^2 r} H_0 J_1(\chi r) \sin \phi \cdot e^{-i\alpha(z-z_0)}; \quad (6)$$

$$E_\phi = i \frac{\omega \mu_0}{\chi} H_0 J_1'(\chi r) \cos \phi \cdot e^{-i\alpha(z-z_0)}; \quad (7)$$

$$H_r = -i \frac{\alpha}{\chi} H_0 J_1'(\chi r) \cos \phi \cdot e^{-i\alpha(z-z_0)}; \quad (8)$$

$$H_\phi = i \frac{\alpha}{\chi^2 r} H_0 J_1(\chi r) \sin \phi \cdot e^{-i\alpha(z-z_0)}; \quad (9)$$

$$H_z = H_0 J_1(\chi r) \cos \phi \cdot e^{-i\alpha(z-z_0)}, \quad (10)$$

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 ; $\alpha_V = \frac{\omega^2 \epsilon_0''}{c^2 k_z'}$ – коэффициент затухания, обусловленный объемными потерями в диэлектрической пробке;

$\alpha_S = \frac{\omega \epsilon_0'}{c R k_z'} \sqrt{\frac{\omega}{2\pi\sigma}}$ – коэффициент затухания, обусловленный поверхностными потерями в металлических стенках цилиндрического волновода; c – скорость света; $\epsilon_0', \epsilon_0''$ – действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости парафина

$\epsilon_0 = \epsilon_0' + i\epsilon_0''$; 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_1 – функции Бесселя 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_{11} – $\mu_n = 1.841$.

В выводах ряда формул, представленных в настоящей работе, использована работа [22].

Как видно из выражений (6)–(10), ЭМ поле имеет два составляющих напряженности электрического поля E_r и E_ϕ . Они и определяют распределение тепловых источников, т.к. плотность тепловых источников пропорциональна сумме квадратов напряженности электрических составляющих ЭМ поля. Выражение плотности тепловых источников для неподвижного источника работы имеет вид:

$$Q_0 = \frac{\epsilon_0''}{\pi \operatorname{Re}(k_z \epsilon_0)} \frac{\mu_n^2}{R^4} P \times \left[\frac{|k_z|^2 R^4}{r^2 \mu_n^4} J_1^2 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) \sin^2 \phi + \frac{|k_z|^2 R^2}{\mu_n^2} \right. \\ \left. \times \left[J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) - \frac{R}{r \mu_n} J_1 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) \right]^2 \cos^2 \phi \right], \quad (11)$$

где P – мощность источника ЭМ волн.

В выражении (11) использована формула дифференцирования [15]:

$$J_1'(\chi r) = J_0(\chi r) - \frac{J_1(\chi r)}{\chi r}.$$

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

$$c_T = c_0 + L \delta(T - T_S), \quad (12)$$

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

Плотность мощности объемного тепловыделения записывается в виде:

$$Q = Q_0 \Theta(z - z_0(t)) \exp(-\alpha(z - z_0(t))). \quad (13)$$

Формула учитывает передвижение источника ЭМ волн по закону $z = z_0(t)$. Явный вид Q_0 приведен в выражении (11). В формуле (13)

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

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:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \kappa_1 (T - T_0), \quad (14)$$

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

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

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

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

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \kappa (T - T_0), \quad (16)$$

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

В точке $r=0$ теплообмен отсутствует:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0. \quad (17)$$

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

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \phi} \Big|_{\phi=0} = 0; \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial \phi} \Big|_{\phi=\frac{\pi}{2}} = 0. \quad (18)$$

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. На рис. 1 приведена зависимость мнимой части продольного волнового числа k_z'' от частоты ЭМ поля для цилиндрического волновода с парафиновой пробкой радиуса.

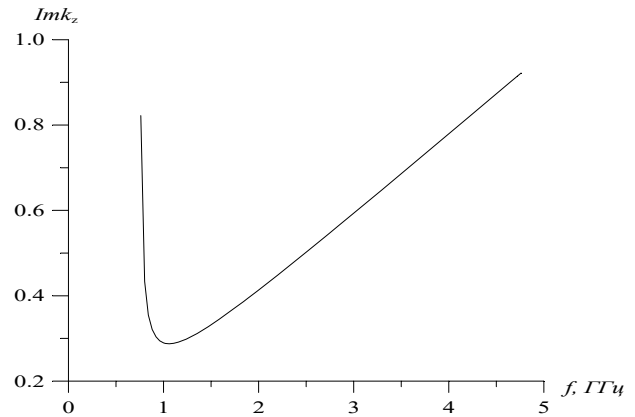


Рис. 1. Мнимая часть продольного волнового числа, как функция частоты для металлического цилиндрического волновода, заполненного парафином

На рис. 2 приведено распределение плотности тепловых источников $Q(r, \phi, z=0)$, нормированное на мощность источника ЭМ волн, в поперечном сечении волновода для частоты $f = 1.4 \cdot 10^9$ Гц.

Для удобства изображения на рисунке цилиндрические координаты преобразованы в декартовы x, y, z . В таком случае круглый волновод представляется как круг, вписанный в прямоугольник.

По рис. 2 можно отметить симметрию относительно правой и левой, верхней и нижней половин поперечного сечения волновода. Это позволяет рассматривать процессы только в четверти круга и иметь представление о том, что творится во всем круге. Таким образом, можно экономить ресурсы ЭВМ при численном решении задачи и рассматривать процессы только в первом квадранте.

Результаты численного моделирования процесса нагрева и расплавления парафиновой пробки «ЭМ кротом» для различных моментов времени приведены на рис. 3–5. При проведении расчетных исследований использовались параметры высокопарафинистой нефти: $\rho = 950$ 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); $T_0 = 20^\circ\text{C}$; $T_5 = 50^\circ\text{C}$; $H = 5$ м; $P = 6.5$ кВт; $f = 1.4 \cdot 10^9$ Гц; $\varepsilon'_0 = 2.3$; $\text{tg} \delta = \varepsilon''_0 / \varepsilon'_0 = 0.012$; $\sigma = 3.4 \cdot 10^6$ Ом⁻¹·м⁻¹. Задача решалась неявным методом переменных направлений с равномерной прямоугольной сеткой [23]. Дельта-функция в выражении для теплопроводности аппроксимировалась ступенькой с полушириной, равной 0.4°C .

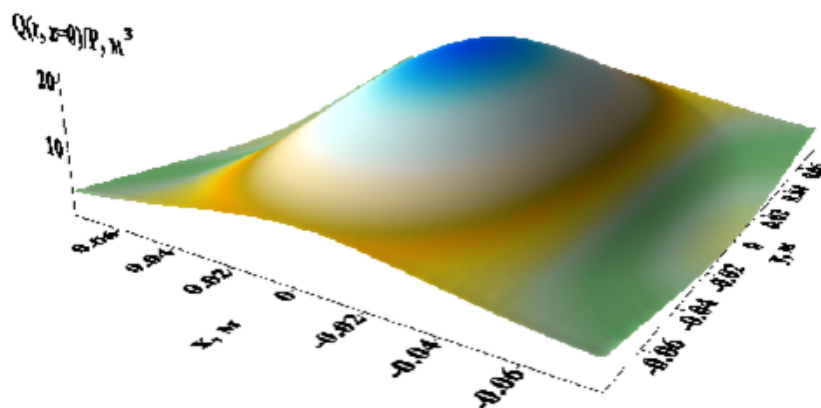


Рис. 2. Поперечное распределение плотности тепловых источников, нормированное на мощность источника в цилиндрическом волноводе

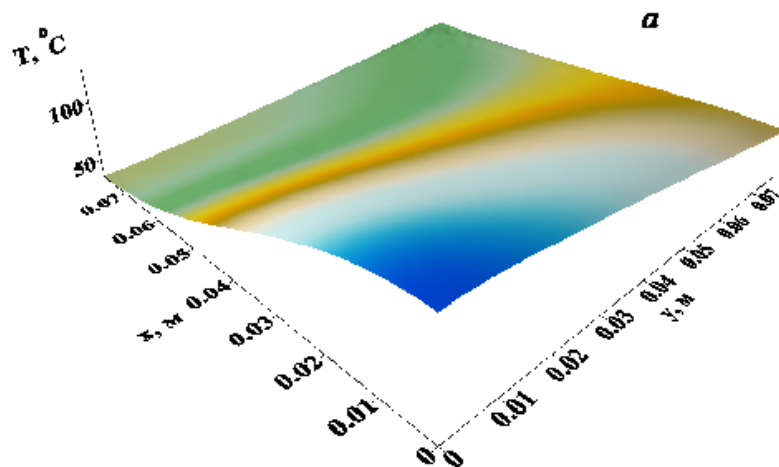


Рис. 3. Поперечное распределение температуры в цилиндрическом волноводе, заполненном парафином; $t = 135$ мин, $z = 0$

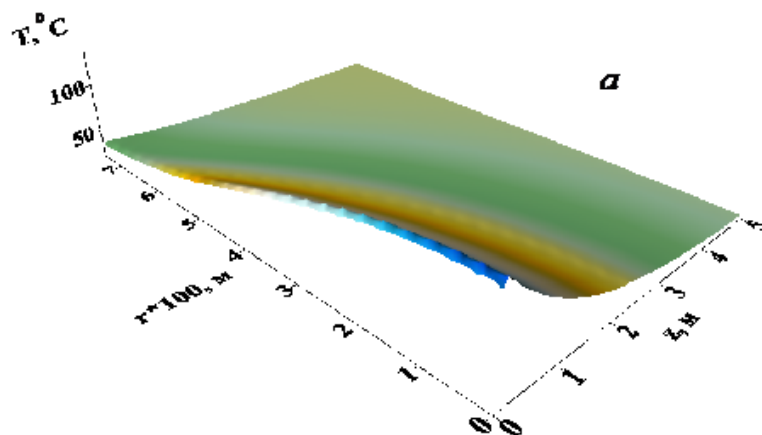


Рис. 4. Продольное распределение температуры в цилиндрическом волноводе, заполненном парафином; $t = 135$ мин, $\varphi = 0$

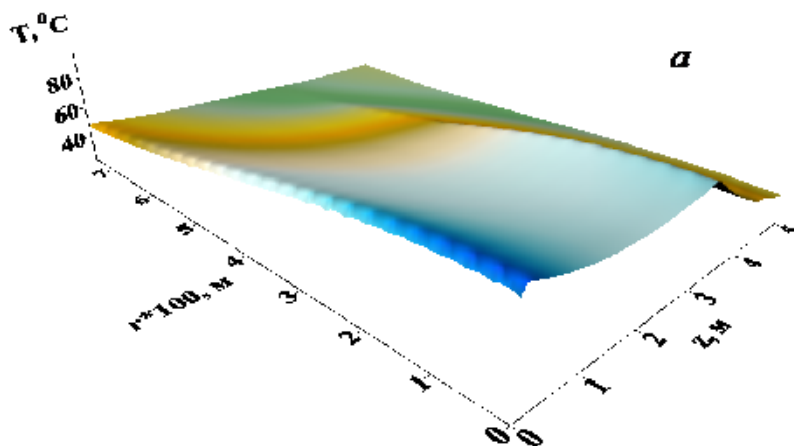


Рис. 5. Продольное распределение температуры в цилиндрическом волноводе, заполненном парафином; $t = 270$ мин, $\varphi = 0$

Обсуждение результатов. Критическая частота H_{11} волны для рассматриваемого цилиндрического волновода с радиусом $R = 0.0775$ м – $f_0 \approx 0.746 \cdot 10^9$ Гц. Согласно рис. 1, мнимая часть продольного волнового числа имеет минимум $k_z'' \approx 0.2874$ м⁻¹ на частоте $f \approx 1.06 \cdot 10^9$ Гц и растет при дальнейшем увеличении частоты. При этом величина длины проникновения электромагнитной волны вглубь пробки составляет 1.74 м, что достаточно для контроля за продвижением источника электромагнитного излучения, хотя для рассматриваемого способа удаления парафиновых пробок данная величина не принципиальна.

Как видно из рис. 2, распределение тепловых источников в поперечном сечении волновода выглядит как эллипс из-за зависимости от угла φ . От координаты r плотность тепловых источников тоже сильно зависит и тем сильнее, чем выше частота ЭМ волн, т.е. распределение тепловых источников в поперечном сечении волновода очень неравномерно. Но у этого типа волны есть и преимущество по сравнению с другими – у него наименьшая критическая частота, т.е. им возможен наиболее глубокий прогрев вдоль пробки. Максимум тепловых источников получается на оси волновода, а в целом конфигурация тепловых источников от частоты не зависит. Это тоже дает преимущество, т.к. источник ЭМ волн удобнее всего располагать в центре трубы. В продольном направлении плотность тепловых источников падает по экспоненциальному закону. С ростом частоты в продольном направлении скорость спада плотности источников тепла увеличивается в соответствии с зависимостью, приведено на рис. 1.

На рис. 3–4 «ЭМ крот» начал движение через 135 минут после начала процесса нагрева. На рис. 4 и 5 для удобства изображения все значения вдоль координаты r умножены на 100. Как видно из рисунков, процесс нагрева среды сильно зависит от распределения плотности тепловых источников. Местоположение первоначального проплавления пробки полностью определяется максимумом плотности тепловых источников. С течением времени распределение температуры и в поперечном направлении вследствие теплопроводности среды, и в продольном направлении вследствие движения «ЭМ крота» становится более равномерным. Ради расплавления пробки по всему сечению трубопровода, движение «ЭМ крота» приходится начинать длительное время спустя после начала нагрева.

Заключение. Рассмотрен процесс удаления парафиновой пробки одним из возможных типов волн, которые могут быть возбуждены в круглом волноводе – H_{11} . Поверхность, разделяющая твердую и жидкую фазы, имеет форму эллипса с сечением, уменьшающимся вдоль пробки. Такая форма расплавленной зоны может привести к разрушению пробки до ее полного расплавления. Если задаться целью, проделать в пробке отверстие по всей ее длине, чтобы как можно скорее начать транспортировку нефти, а не расплавлять ее по всему радиусу трубопровода, то движение «ЭМ крота» можно начинать намного раньше и двигать быстрее.

Проведенные в настоящей работе исследования показали, что для удаления парафиновых пробок в трубопроводе источником электромаг-

нитного излучения необходимо его перемещать вдоль трубы со скоростью, определяемой самосогласованно из закона движения поверхности раздела твердой и жидкой фаз

Вопросы, рассмотренные в данной работе, представляют научный и практический интерес также для решения задач, связанных с газогидратами [21, 28, 29], высоковязкими нефтями и битумами [24–27].

Литература

1. Краснов В.А. Технология и оборудование для добычи нефти из скважин, осложненных асфальто-смоло-парафиновыми отложениями. <http://runeft.ru/library/articles/46/5222/>
2. Методы борьбы с отложениями парафина в фонтанных скважинах. <http://neftandgaz.ru/?p=425>.
3. Сорокин А.В., Хавкин А.Я. Особенности физико-химического механизма образования АСПО в скважинах // Бурение и нефть. 2007. № 10. С. 30–31.
4. Makagon Yu.F. Russia's Contribution to the study of Gas Hydrates // Int conf. on natural gas hydrates. Annals of the New York Academy of Science. 1994. V. 715. P. 119–145.
5. Саяхов Ф.Л., Фатыхов М.А., Имашев Н.Ш. Способ электропарафинизации скважин // Открытия. Изобретения. 1987. № 20. А.С. 1314756 СССР.
6. Ахметов А.Т., Дьячук А.И., Кислицын А.А. и др. Способ ликвидации ледяных, газогидратных и парафиновых пробок в выкидных линиях скважин и трубопроводах // Открытия. Изобретения. 1992. № 3. А. с. 1707190 СССР.
7. Solution of Paraffin Deposition Problems in Oil Wells by Utilization of the Radio-Frequency Single Well Stimulation process / Homer L. Spencer, Gr. Calgary. 1987.
8. Кислицын А.А. Численное моделирование высокочастотного электромагнитного прогресса диэлектрической пробки, заполняющей трубу // ПМТФ 1996. Т. 37. № 3. С. 75–82.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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).
13. 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.
14. Семенов Н.А. Техническая электродинамика. М.: Связь, 1973. 480 с.
15. 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. № 3. P. 724–729.
16. 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, January 2016. Vol. 52. Issue 1. P. 79–84.
17. 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. V. 54. № 4. P. 612–614.
18. 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.
19. Kovaleva L., Musin A. Numerical modeling of heavy hydrocarbon liquid heating // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2016. V. 33. № 1. P. 169–175.
20. 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.
21. Makagon Y.F. Natural gas hydrates – A promising source of energy. J.Natural Gas Science and Engineering. 2010. № 2. P. 1–21.
22. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции (Формулы, графики, таблицы). М., 1964. 344 с.
23. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука, 1989. 432 с.
24. Bera A., Babadagli T. Effect of nature and injected nano-particles on the efficiency of heavy oil recovery by radio frequency electromagnetic heating // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2017. V. 153. P. 244–256.
25. Bera A., Babadagli T. Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/ bitumen recovery and

future prospects : a review // *Applied Energy*. 2015. Vol. 151. P. 206–226.

26. Bera A., Babadagli T. Effect of nature and injected nano-particles on the efficiency of heavy oil recovery by radio frequency electromagnetic heating // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017. V. 153. P. 244–256.

27. Khabibullin I.L., Nazmutdinov F.F., Vakhitova N.K. Simulation of heating dielectric media by electromagnetic radiation in nonlinear mode // *Journal of Applied and Industrial Mathematics*. 2017. Vol. 11. № 1. P. 82–87.

28. Zhao J., Fan Z., Wang B., Dong H., Liu Y., Song Y. Simulation of microwave stimulation for the production of gas methane hydrate sediment. *Applied Energy*. 2016. Vol. 168. P. 25–37.

29. Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Русinov А.А. Теоретическое моделирование процесса извлечения газа из пористого газогидратного пласта, частично насыщенного газом, с учетом теплового взаимодействия с окружающими породами // *Теоретические основы химической технологии*. 2016. Т. 50. № 4. С. 452–462.



INFLUENCE OF FREQUENCY OF MOVING SOURCE ELECTROMAGNETIC RADIATION ON PHASE TRANSITION IN OIL PIPELINES WITH ASPHALT-RESIN-PARAFFIN DEPOSITS

© **M.A. Fatikhov**

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

The mathematical model is presented and the theoretical study of the process of electromagnetic warming of paraffin (asphalt-resin-paraffin) plug in the pipe is carried out. Heat exchange on the outer surface of the pipe is described by Newton's law. It is assumed that the source of H_{11} -type electromagnetic waves moves in the pipe as the interface between the solid and liquid phases moves. The achievement of a complex configuration of heat sources and temperature is revealed. The spatial distribution of temperature in the pipe is investigated. The results are of practical value for establishing the initial parameters of the technology for removing asphalt-resin-paraffin plugs in pipelines and oil wells using electromagnetic radiation.

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