

УДК 532.546:536.421

НАГРЕВ И ПЛАВЛЕНИЕ АСФАЛЬТОПАРАФИНОВЫХ ПРОБОК В ОБОРУДОВАНИИ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. А. Балакирев, Г. В. Сотников, Ю. В. Ткач, Т. Ю. Яценко

Институт электромагнитных исследований, 61022 Харьков, Украина

Исследован процесс устранения асфальтопарафиновых пробок в оборудовании нефтяных скважин источником высокочастотного излучения, работающим в режиме периодического включения и выключения. Численно анализируется динамика плавления пробок. Определено время ликвидации пробок в зависимости от скважности цикла работы высокочастотного генератора и времени его непрерывной работы в одном цикле.

Введение. В настоящее время высокочастотный (ВЧ) метод устранения парафиновых пробок в оборудовании нефтяных скважин и трубопроводах является одним из наиболее перспективных [1–4]. Это связано с его относительно простой экологически безопасной технической реализацией и высокой эффективностью. В отличие от других способов разрушения асфальтопарафиновых пробок в ВЧ-методе используется объемный характер выделения тепла и плавления асфальтопарафиновых пробок [3, 4]. При этом большая часть тепла идет на осуществление фазового перехода, в то время как в других тепловых методах значительная часть подводимой энергии расходуется на перегрев поверхностных слоев нефти, а также теряется из-за теплообмена с окружающей средой.

Для оптимальной работы “микроволновой печи” необходимо подобрать частоту излучения так, чтобы подводимая мощность ВЧ-источника использовалась на нагрев и плавление пробки с максимальной эффективностью [3, 4]. Однако даже в оптимальном режиме время работы ВЧ-генератора составляет от нескольких часов до десятков часов в зависимости от мощности источника излучения и объема парафиновой пробки. Так, ВЧ-генератор мощностью 10 кВт и частотой $f = 10$ МГц ликвидирует в нефтяной скважине парафиновую пробку длиной 100 м (радиус внутренней трубы оборудования ствола нефтяной скважины $R_1 = 1,8$ см, внешней — $R_2 = 5$ см) за 34 ч непрерывной работы [4]. Ясно, что работа ВЧ-источника электромагнитного излучения в непрерывном режиме в течение длительного времени сопряжена с техническими проблемами. Поэтому возникает вопрос о чувствительности рассматриваемого ВЧ-метода ликвидации парафиновых пробок при длительном отключении источника питания, которое может быть связано с неполадками, а также с профилактическими работами.

В настоящей работе исследуется процесс плавления парафиновых пробок при периодическом включении и выключении ВЧ-генератора.

Основные физические допущения и математическая модель процесса. Ствол нефтяной скважины представляет собой систему из двух коаксиальных металлических труб. С физической точки зрения оборудование ствола нефтяной скважины эквивалентно коаксиальной линии передачи. Рассмотрим коаксиальную линию, внутреннее пространство которой заполнено диэлектриком (парафином) с диэлектрической проницаемостью ϵ . Для математического описания процесса выберем цилиндрическую систему координат

(r, φ, z) . Предположим, что парафиновая пробка занимает область $0 \leq z \leq H$ в продольном направлении, а в поперечном сечении полностью заполняет пространство между трубами. Внутренний радиус коаксиальной линии R_1 , внешний — R_2 . В плоскости $z = 0$ находится источник электромагнитного излучения с частотой f и мощностью P .

Закон работы ВЧ-источника будем описывать функцией $\varphi(t)$. В случае периодического режима работы функция $\varphi(t)$ задается выражением

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1, & n\tau < t < \tau_* + n\tau, \\ 0, & \tau_* + n\tau < t < (n+1)\tau, \end{cases} \quad (1)$$

где τ — продолжительность цикла; τ_* — длительность непрерывной работы источника электромагнитного излучения в одном цикле. Электромагнитная волна, распространяясь вдоль коаксиальной линии, затухает. В результате в диэлектрической среде выделяется энергия, плотность мощности которой равна [4]

$$Q = \frac{P\varphi(t)}{2\pi \ln(R_2/R_1)} \frac{\alpha_V}{r^2} \exp(-(\alpha_V + \alpha_S)z); \quad (2)$$

$$\alpha_V = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\varepsilon'} \delta, \quad \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}; \quad (3)$$

$$\alpha_S = \frac{1}{2} \sqrt{\varepsilon'} \sqrt{\frac{f}{\sigma}} \frac{1/R_1 + 1/R_2}{\ln(R_2/R_1)}, \quad (4)$$

где ε' , ε'' — действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$; c — скорость света в вакууме; σ — проводимость металла, из которого изготовлены трубы ствола скважины. В выражении (2), в отличие от приведенного в [3], учитываются реальное распределение электромагнитного поля по поперечному сечению коаксиальной линии и дополнительное затухание волны в металлических стенках. Коэффициент α_V описывает объемное затухание электромагнитной волны из-за наличия мнимой части у комплексной диэлектрической проницаемости парафина, α_S — затухание электромагнитной волны в металлических стенках коаксиальных труб из-за конечной проводимости металла [5], в силу которой на внутренней поверхности металлических проводников выделяется энергия. Поверхностная плотность выделяемой тепловой мощности в стенках трубы описывается выражением

$$q_i = \sqrt{\varepsilon'} \sqrt{\frac{f}{\sigma}} \frac{P\varphi(t)}{4\pi R_i^2 \ln(R_2/R_1)} \exp(-(\alpha_V + \alpha_S)z), \quad i = 1, 2. \quad (5)$$

Здесь $i = 1$ соответствует внутреннему проводнику, $i = 2$ — внешнему.

Распределение температуры в пробке описывается уравнением теплопроводности. Далее при численном решении будем использовать метод сквозного счета [6], поэтому уравнение теплопроводности запишем в общем виде без явного выделения фаз:

$$\rho c_T \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(r, z, t), \quad (6)$$

где ρ , c_T , λ — плотность, теплоемкость, теплопроводность высокопарафинистой нефти соответственно. Плотность и теплопроводность считаем независимыми от температуры, а теплоемкость при температуре фазового перехода T_s имеет δ -образную особенность

$$c_T = c_0 + L\delta(T - T_s). \quad (7)$$

Здесь L — скрытая теплота фазового перехода; $\delta(x)$ — дельта-функция.

Уравнение теплопроводности (6) следует дополнить граничными условиями. На торце пробки $z = 0$ зададим граничное условие в виде конвективного теплообмена по закону Ньютона

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = \alpha_1 [T(r, 0, t) - T_0], \quad (8)$$

где T_0 — начальная температура парафина, равная температуре окружающей среды. На удаленном торце пробки $z = H$ теплообмен отсутствует:

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

На боковой поверхности внешнего цилиндра $r = R_2$ граничное условие зададим в виде закона конвективного теплообмена, но с другим коэффициентом теплообмена α . При этом учитывается поверхностное тепловыделение из-за затухания электромагнитной волны в стенках металлических труб (5):

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_2} = \alpha [T(R_2, z, t) - T_0] - q_2(z, t). \quad (10)$$

Внутреннюю поверхность коаксиальной линии $r = R_1$ считаем теплоизолированной. Граничное условие на ней с учетом поверхностного тепловыделения имеет вид

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_1} = -q_1(z, t). \quad (11)$$

Таким образом, уравнение теплопроводности (6), граничные условия (8)–(11) и выражения для плотности мощности объемного и поверхностного тепловыделений полностью описывают динамику распределения температуры в оборудовании нефтяной скважины в случае периодического режима нагрева пробки ВЧ-источником, описываемого функцией $\varphi(t)$. Следует отметить, что физическая картина нагрева и плавления пробки слабо зависит от граничных условий на торцах, поскольку тепло в основном теряется через боковую поверхность внешней трубы.

Численное моделирование процесса устранения парафиновой пробки. Для моделирования процесса ликвидации парафиновой пробки выберем нефтяную скважину с внутренним радиусом насосно-компрессорной трубы $R_1 = 0,018$ м, внешним радиусом $R_2 = 0,05$ м, длина парафиновой пробки $H = 100$ м. Теплофизические параметры высокопарафинистой нефти следующие: $\rho = 950$ кг/м³, $c_0 = 3$ кДж/(кг · К), $T_s = 50$ °С, $L = 300$ кДж/кг, $\lambda = 0,125$ Вт/(м · К). Температура окружающей среды $T_0 = 20$ °С. Действительную и мнимую части диэлектрической постоянной ε считаем слабо зависящими от частоты в диапазоне работы ВЧ-источника. В численных расчетах используются значения $\varepsilon = 2,3$, $\delta = \varepsilon''/\varepsilon' = 0,021$ [3]. На левом торце трубы ($z = 0$) коэффициент теплообмена $\alpha_1 = 0,2$ Вт/(м² · К), на боковой поверхности внешнего цилиндра $\alpha = 2,5$ Вт/(м² · К). Указанное значение α соответствует тепловому контакту внешней трубы оборудования ствола нефтяной скважины с сухим грунтом [3].

При численном решении уравнения (6) δ -функция в выражении для теплоемкости (7) аппроксимировалась ступенькой шириной $\Delta = 0,8$ °С. Тем самым предполагается, что в интервале температур $|T - T_s| < \Delta/2$ в каждом элементарном объеме идет процесс плавления, т. е. жидкая и твердая фазы существуют одновременно. Из уравнения (6), пренебрегая температуропроводностью, получим оценку снизу времени плавления

$$\Delta t_{ph} \sim L\rho/Q. \quad (12)$$

Как и следовало ожидать, время плавления не зависит от способа “размазывания” δ -функции. Однако, с одной стороны, ширина зоны плавления Δ не должна быть очень мала,

чтобы время плавления существенно превосходило временной шаг сетки. С другой стороны, ширина ступеньки Δ “размазанной” δ -функции не должна быть слишком большой, так как в противном случае возникают большие ошибки в определении положения фронта плавления.

Минимальное время плавления реализуется на поверхности внутренней трубы в сечении $z = 0$. Подставляя в (12) расчетные значения параметров, получим $\Delta t_{ph}^{\min} = 4,3 \cdot 10^3$ с.

Для численного решения уравнения (1) применялась явная разностная схема на равномерной прямоугольной сетке $\Delta t = 3,6$ с, $\Delta r = 8 \cdot 10^{-4}$ м, $\Delta z = 0,1$ м.

Целью численного анализа является исследование влияния периода включения ВЧ-источника (продолжительность цикла) τ и времени его непрерывной работы τ_* (в одном цикле) на полное время ликвидации парафиновой пробки и полное время работы ВЧ-источника. Полное время работы ВЧ-источника определяет величину затраченной энергии при фиксированной мощности.

Очевидно, что периодическое включение ВЧ-источника может существенно влиять на процесс ликвидации парафиновой пробки, если промежуток времени, в течение которого ВЧ-источник отключен, порядка или больше характерного времени термодиффузии $c\rho X^2/\lambda$ (X — характерный поперечный или продольный размер системы). В противном случае задачу о плавлении пробки можно рассматривать как задачу с непрерывным ВЧ-источником [4], но с эквивалентной мощностью, равной осредненной мощности по периоду работы источника ВЧ-излучения.

Все расчеты выполнены для источника электромагнитного излучения с частотой $f = 10$ МГц и мощностью $P = 20$ кВт.

На рис. 1–3 представлены изотермы парафиновой пробки в различные моменты времени. Рис. 1 соответствует непрерывному режиму, рис. 2, 3 — периодическому режиму с временем непрерывной работы ВЧ-источника $\tau_* = 2$; 1 ч и скважностью $N = \tau/\tau_* = 1,5$; 2 соответственно. Характерные времена для непрерывного режима выбраны следующим образом: рис. 1, *a* — время плавления пробки на всей длине канала; рис. 1, *b* — время плавления пробки по всему поперечному сечению в точке $z = 0$; рис. 1, *в* — время ликвидации парафиновой пробки. Для периодических режимов работы ВЧ-источника моменты времени на рис. 2, *a, б* и рис. 3, *a, б* выбраны из тех же соображений, что и на рис. 1, *a, б*; рис. 2, *в*, 3, *в* соответствуют времени ликвидации парафиновой пробки в непрерывном режиме; рис. 2, *г*, 3, *г* — времени ликвидации парафиновой пробки.

Из анализа рис. 1–3 следует, что воздействие ВЧ-источника на парафиновую пробку в периодическом режиме приводит к более равномерному прогреву пробки и расплавленных слоев парафина. Максимальная температура T_{\max} , достигаемая в исследуемом образце, существенно ниже, чем при разогреве пробки ВЧ-источником при постоянной работе. При скважности $N = 2$ и $\tau_* = 1$ ч $T_{\max} = 160$ °С, в непрерывном режиме $T_{\max} = 220$ °С. Полное время ликвидации парафиновой пробки возрастает нелинейно с увеличением скважности: $t_{tot} = 20$ ч для $N = 1,5$, $t_{tot} = 34,25$ ч для $N = 2$, при этом время работы ВЧ-источника $t' = 14$; 17,25 ч соответственно. В непрерывном режиме работы ВЧ-источника парафиновая пробка ликвидируется за 12 ч.

Отметим, что при дальнейшем увеличении скважности время ликвидации парафиновой пробки сильно возрастает и при $N = 3$ ($P = 20$ кВт) полного плавления пробки достичь невозможно. Возникает стационарное состояние, в котором процессы тепловыделения и потерь тепла взаимно компенсируются.

Результаты численного анализа процесса устранения парафиновых пробок в периодическом режиме работы ВЧ-источника для различных значений скважности и длительности работы ВЧ-источника в одном цикле приведены в таблице.

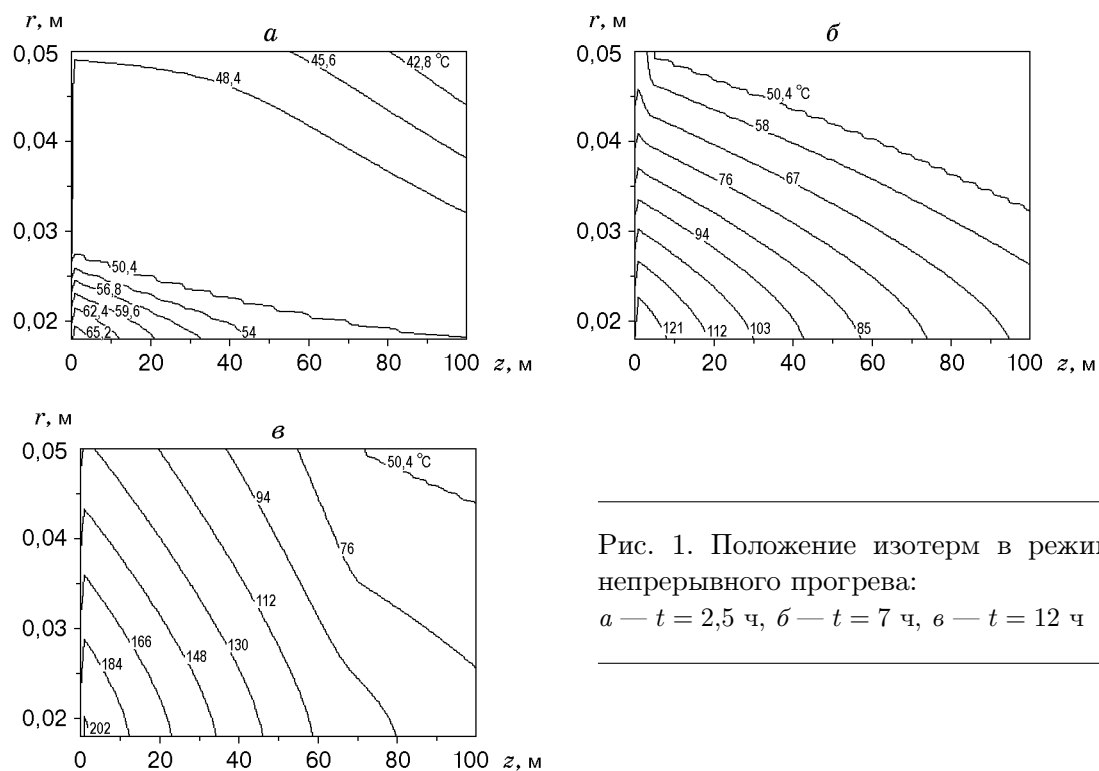


Рис. 1. Положение изотерм в режиме непрерывного прогрева:
a — $t = 2,5$ ч, *б* — $t = 7$ ч, *в* — $t = 12$ ч

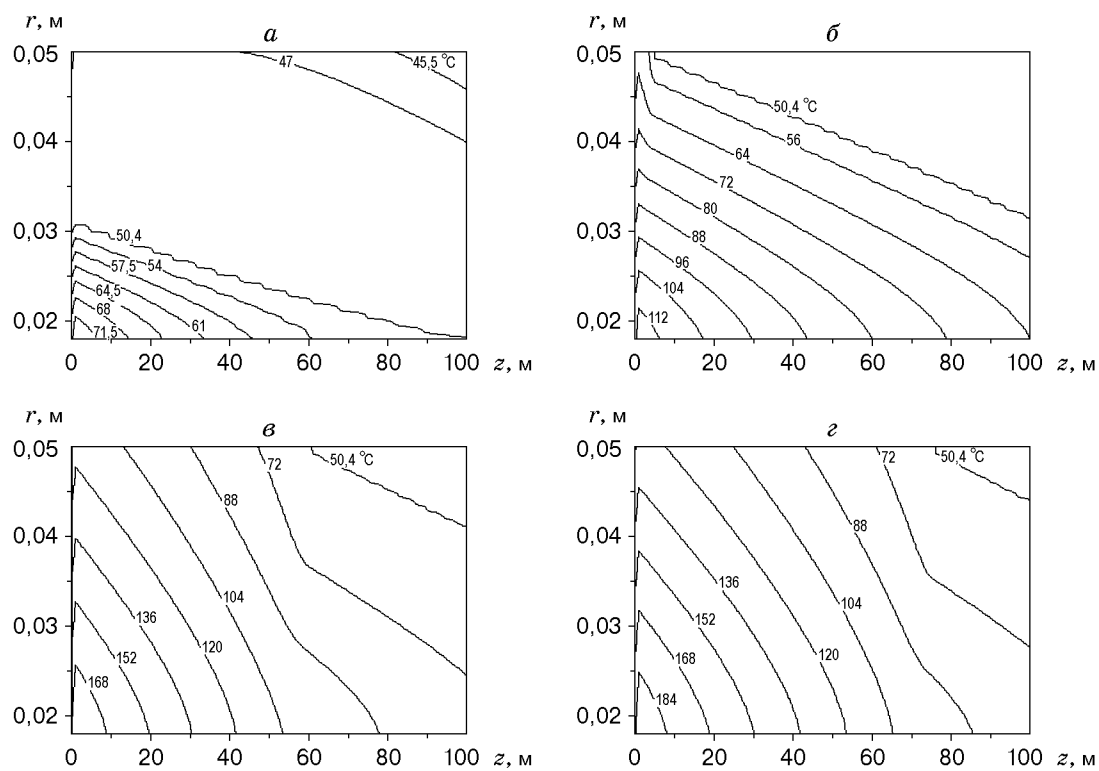


Рис. 2. Положение изотерм при скважности $N = 1,5$ ($\tau_* = 2$ ч):
a — $t = 4$ ч, *б* — $t = 10,25$ ч, *в* — $t = 17$ ч, *г* — $t = 20$ ч

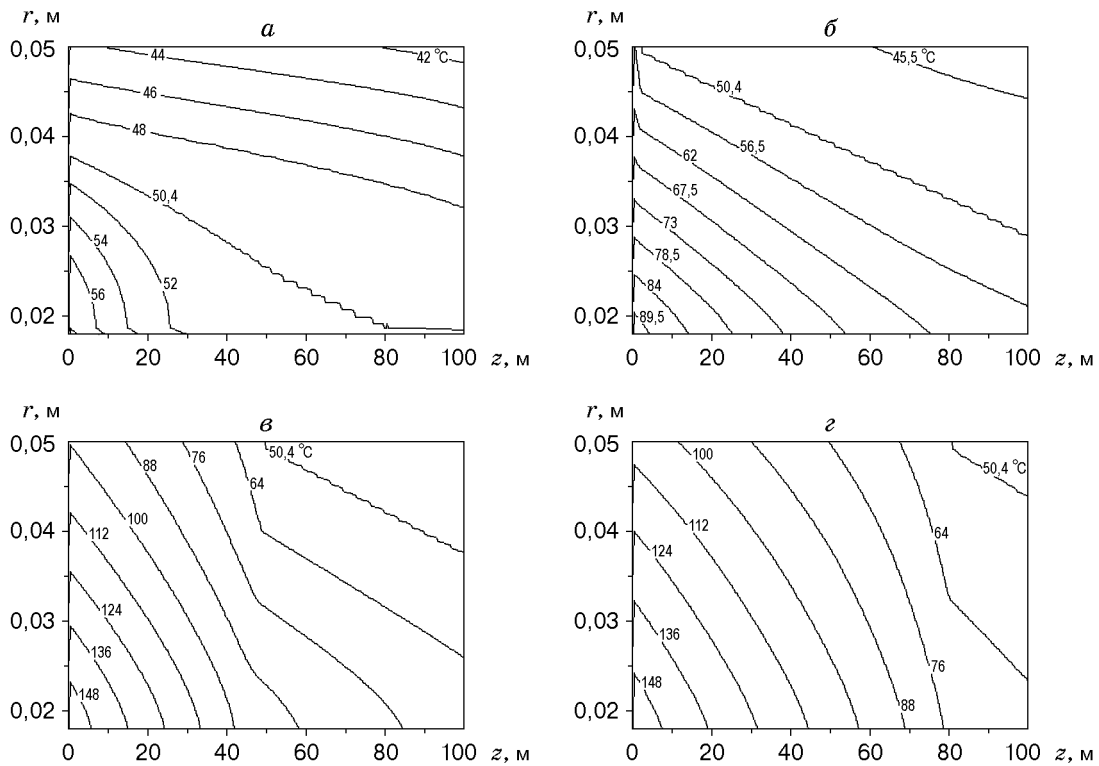


Рис. 3. Положение изотерм при скважности $N = 2$ ($\tau_* = 1$ ч):
 а — $t = 8$ ч, б — $t = 14,25$ ч, в — $t = 23$ ч, г — $t = 34,25$ ч

Для иллюстрации процессов термодиффузии и потерь тепла в промежуток времени между выключением и включением ВЧ-источника на рис. 4 представлены распределения температуры по объему парафиновой пробки при $N = 2$ и $\tau_* = 2$ ч. Видно, что в промежуток времени, когда ВЧ-источник отключен, максимальная температура снизилась на 38 °С, а распределение температуры стало более однородным. Поверхность фазового перехода за указанное время практически не изменила положения. Аналогичная ситуация наблюдается для случая $N = 2$, $\tau_* = 1$ ч.

N	τ_* , ч	t_{tot} , ч	t' , ч	N	τ_* , ч	t_{tot} , ч	t' , ч
1,25	2,00	14,75	12,75	1,5	2,00	20,00	14,00
	1,00	16,00	13,00		1,00	20,00	14,00
	0,50	16,00	13,00		0,50	20,50	14,00
	0,25	16,00	13,00		0,25	20,75	14,00
	0,125	16,00	12,875		0,125	20,75	13,875
4/3	2,00	17,50	13,50	2	2,00	33,50	17,50
	1,00	17,50	13,50		1,00	34,25	17,25
	0,50	17,25	13,25		0,50	34,50	17,50
	0,25	17,25	13,00		0,25	34,00	17,00
	0,125	17,50	13,125		0,125	33,75	16,875

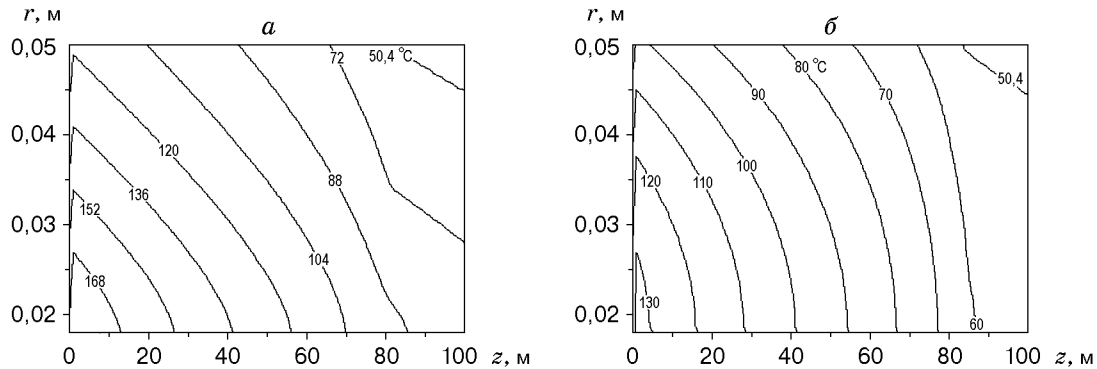


Рис. 4. Динамика остывания среды в промежуток времени между двумя импульсами ВЧ-сигнала:

a — $t = 34$ ч, b — $t = 36$ ч

Для определения эффективности работы источника электромагнитного излучения следует знать, как расходуется его энергия. Запишем баланс энергии, следующий из дифференциального уравнения теплопроводности (6) с граничными условиями (8)–(11) и выражениями (2)–(5) для объемных и поверхностных потерь энергии электромагнитной волны, в виде

$$W_2 = W_1 - W_3 - W_4,$$

где

$$W_1 = P(1 - \exp(-\lambda H)) \int_0^t \varphi(t') dt'; \quad W_2 = \rho \int dV \int_{T_0}^T c(T') dT';$$

$$W_3 = 2\pi \alpha R_2 \int_0^t dt \int_0^H [T(r = R_2, z, t) - T_0] dz; \quad W_4 = 2\pi \alpha_1 \int_0^t dt \int_{R_1}^{R_2} r [T(r, z = 0, t) - T_0] dr.$$

Величины W_i ($i = 1, \dots, 4$) имеют следующий физический смысл: W_1 — энергия, поглощенная в объеме парафиновой пробки и металлических стенках коаксиальной линии; W_2 — энтальпия системы; W_3 — потери энергии вследствие теплообмена на поверхности внешней трубы; W_4 — потери энергии на торце парафиновой пробки.

На рис. 5 представлены зависимости энергетических характеристик W_i от времени для непрерывного и периодического режимов. Видно, что при скважности $N = 2$ потери тепла сравнимы с энтальпией системы в конце процесса устранения пробки. При полной ликвидации пробки примерно половина выделяемой в ней тепловой энергии будет рассеяна в окружающую среду. При $N = 1,5$ и в случае непрерывного режима такие потери существенно меньше.

Из рис. 5 следует, что в непрерывном режиме на полезную работу затрачивается примерно 40 % энергии ВЧ-генератора. Для скважности $N = 1,5$ на ликвидацию парафиновой пробки уходит 35 % вложенной энергии, для $N = 2$ — менее 30 %.

Выше утверждалось, что воздействие электромагнитного излучения на парафиновую пробку в режиме периодической работы ВЧ-источника при определенных условиях можно описывать как воздействие волны с постоянной амплитудой и осредненной по периоду работы мощностью. Для сравнения на рис. 5, б сплошными линиями показаны временные характеристики W_i для ВЧ-источника мощностью $P = 13,33$ кВт в непрерывном режиме

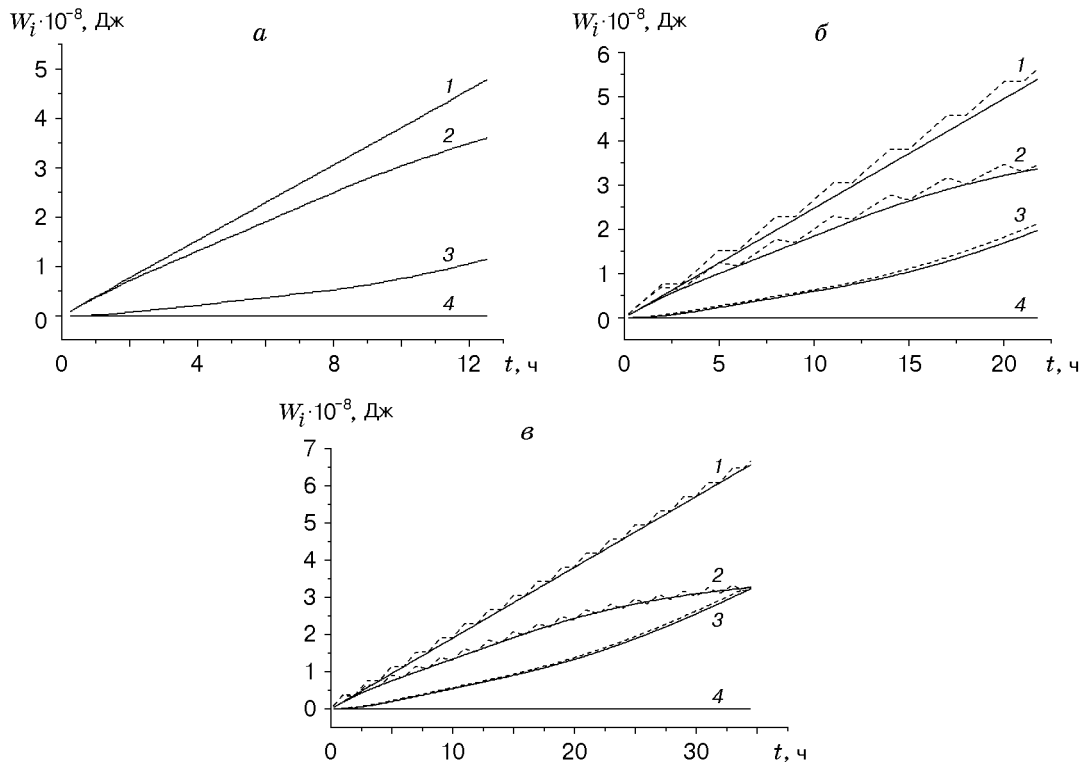


Рис. 5. Зависимости энергетических характеристик от времени:

1 — W_1 , 2 — W_2 , 3 — W_3 , 4 — W_4 ; а — непрерывный режим; б — сплошные кривые — непрерывный режим при $P = 13,33$ кВт, штриховые — периодический режим ($N = 1,5$, $\tau_* = 2$ ч); в — сплошные кривые — непрерывный режим при $P = 10$ кВт, штриховые — периодический режим ($N = 2$, $\tau_* = 1$ ч)

работы, на рис. 5, в — для ВЧ-источника с $P = 10$ кВт также в непрерывном режиме работы. Видно, что времена устранения парафиновых пробок для ВЧ-источника излучения, действующего в режиме периодической работы, и источника, работающего непрерывно, с мощностью, равной средней мощности “периодического” источника, почти совпадают.

Заклучение. Проведенный анализ процесса ликвидации парафиновых пробок в оборудовании нефтяных скважин электромагнитным излучением в периодическом режиме работы ВЧ-источника показал, что полное время устранения пробки существенно зависит от мощности ВЧ-излучения и скважности цикла его работы. При фиксированной мощности ВЧ-источника полное время устранения пробки нелинейно зависит от скважности. Полное время работы ВЧ-источника при увеличении скважности возрастает и слабо зависит от времени работы в одном цикле. Существует пороговое значение скважности, при котором полное плавление парафиновой пробки никогда не достигается. Так, при мощности $P = 20$ кВт и скважности $N = 3$ полностью устранить пробку длиной 100 м в стандартном оборудовании скважины невозможно.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 1314756 СССР, МКИ Е 21 В 43/00. Способ электродепарафинизации скважин / Ф. Л. Саяхов, М. А. Фатыхов, Н. Ш. Имашев // Открытия. Изобрет. 1987. № 20.
2. А. с. 1707190 СССР, МКИ 5 Е 21 В 43/00. Способ ликвидации ледяных, газогидратных и парафиновых пробок в выкидных линиях скважин и трубопроводах / А. Т. Ахметов, А. И. Дьячук, А. А. Кислицын и др. // Открытия. Изобрет. 1992. № 3.

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 оборудовании нефтяных скважин и трубопроводах // Электромагнит. явления. 1998. Т. 1, № 4. С. 552–561.
5. **Вайштейн Л. А.** Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988.
6. **Самарский А. А., Моисеенко Б. Д.** Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 1965. Т. 5, № 5. С. 817–827.

*Поступила в редакцию 12/X 2000 г.,
в окончательном варианте — 14/III 2001 г.*
