

# Устранение парафиновых пробок в оборудовании нефтяных скважин и нефтяных трубопроводах ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

## Содержание

<b>1.</b>	<b>Введение</b>	<b>380</b>
<b>2.</b>	<b>Устранение парафиновых пробок в нефтяных скважинах</b>	<b>381</b>
2.1.	Основные физические допущения и математическая модель процесса . . . . .	382
2.2.	Ликвидация парафиновой пробки в непрерывном режиме работы ВЧ источника . . . . .	385
2.3.	Режим периодической работы источника электромагнитного излучения . . . . .	387
<b>3.</b>	<b>Разрушение парафиновых отложений в нефтяных трубопроводах движущимся источником электромагнитного излучения</b>	<b>390</b>
3.1.	Устранение парафиновых пробок, полностью заполняющих поперечное сечение трубопровода	390
3.1.1.	Постановка задачи . . . . .	390
3.1.2.	Анализ численных результатов . . . . .	393
3.2.	ВЧ метод очистки внутренней поверхности нефтепроводов от тонких парафиновых отложений	396
3.2.1.	Вводная часть и постановка задачи . . . . .	396
3.2.2.	Результаты численных расчетов процесса устранения тонких парафиновых отложений в нефтепроводе . . . . .	397
<b>4.</b>	<b>Заключение</b>	<b>399</b>

## Abstract

Processes of heating and melting of paraffin plugs in pipes of oil wells and pipelines by the using of powerful high-frequency (HF) electromagnetic radiation are studied. Evolution of temperature fields in the plugs volumes and melting dynamics for various physical conditions and plugs geometries are investigated. Also studied elimination of paraffin plugs in oil well equipment by alternating switching of an electromagnetic radiation source. The dependence of the dynamics of the plugs melting on the cycle duration and on-off time ratio of a HF-generator is ascertained. The time of initial burning through and complete melting of a plug are determined. A new method of elimination of plugs with the using of a movable source of electromagnetic radiation, the so-called "electromagnetic pig", is proposed. "Electromagnetic pig" eliminates a plug by melting in the process of heating while it absorbs electromagnetic energy. For efficient melting of a dielectric plug the source of electromagnetic radiation moves along the pipeline as of separation surface of solid phase and liquid one is displaces. Estimates of efficiency of the proposed method are made. A numeric modeling of elimination of paraffin films on the internal surface of pipeline by a movable source of electromagnetic radiation is carried out. The time of complete cleaning of a pipeline from paraffin deposits depending on their depth and initial temperature of running oil, power and frequency of HF source are determined.

## 1. Введение

В процессе эксплуатации нефтяных и газовых скважин и трубопроводов при определенных усло-

виях (температуре, давлении) на внутренней поверхности труб образуются отложения, вызванные выпадением парафинов, смол или углеводородных

кристаллогидратов. Такие отложения могут полностью закупорить скважину или трубопровод и остановить добычу или транспортировку углеводородов. Длины парафиновых и кристаллогидратных пробок могут достигать больших значений порядка 100–1000 м. К настоящему времени разработан ряд методов предотвращения образования парафиновых и газогидратных пробок и их устранения. К указанным методам, пригодным для пробок обоих видов, можно отнести:

- методы прогрева участков скважин или трубопроводов, в которых образовались пробки, до температуры плавления парафиновых соединений или разложения газогидратов на их составляющие: воду и углеводороды. Нагрев обычно осуществляется либо горячей водой (паром), либо обычными электронагревателями;
- методы, основанные на использовании химических веществ, разрушающих пробки;
- методы механической очистки трубопроводов;
- методы предотвращения образования пробок путем использования химических ингибиторов.

В частности, для предотвращения образования кристаллогидратов в газопроводе в поток газа обычно 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. Одним из таких новых и перспективных методов является метод, основанный на использовании мощного микроволнового излучения.

С точки зрения ВЧ электродинамики стволы 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 [1–6]. 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 [7].

В настоящей работе представлен обзор работ, выполненных в ИЭМИ (г. Харьков) и посвященных исследованию процессов разогрева и плавления парафиновых пробок в стволах оборудования нефтяных скважин и нефтепроводах.

В разделе 2 проанализирован процесс ликвидации парафиновых пробок в оборудовании нефтяных скважин стационарным источником ВЧ излучения и в режиме его периодического включения и выключения (периодический режим работы).

Отличие от проведенных ранее исследований [5] учтены неоднородность плотности объемного тепловыделения по сечению скважины и омические потери мощности ВЧ излучения в стенках стальных труб оборудования скважины, приводящие к дополнительному нагреву парафиновой пробки.

В разделе 3 изучены процессы ликвидации парафиновых пробок в нефтепроводах и предложен новый способ их ликвидации движущимся источником электромагнитного излучения. Исследован также процесс очистки внутренней поверхности нефтепроводов от парафиновых отложений.

## 2. Устранение парафиновых пробок в нефтяных скважинах

Ранее процессы разогрева и плавления парафиновых пробок в нефтескважине были рассмотрены в работе [5]. 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 приво-

дит к качественным и количественным особенностям разогрева и плавления пробки в стволе скважины [6]. 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.

### 2.1. Основные физические допущения и математическая модель процесса

Ствол скважины представляет собой систему из двух коаксиальных металлических труб, поэтому с электродинамической точки зрения он является коаксиальной линией передачи. Рассмотрим коаксиальную линию, внутреннее пространство которой заполнено диэлектриком (парафином) с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_0$ . Предположим, что парафиновая пробка занимает область  $(0 \leq z \leq H)$  в продольном направлении, а в поперечном сечении она полностью заполняет пространство между двумя 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 генератора будем описывать функцией  $\varphi(t)$ . В простейшем случае прямоугольной модуляции функция  $\varphi(t)$  задается следующим 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  $\tau$  – период работы ВЧ источника,  $\tau_*$  – длительность непрерывной работы источника электромагнитного излучения в рамках одного периода. В случае источника ВЧ излучения, работающего в непрерывном режиме,  $\varphi(t) = 1$  ( $\tau = \tau_*$ ). Электромагнитная волна, распространяясь вдоль коаксиальной линии, затухает. В результате в диэлектрической пробке выделяется энергия, плотность мощности которой равна [4]

$$Q = \frac{P\varphi(t)}{2\pi \ln(R_2/R_1)} \frac{\alpha_V}{r^2} e^{-\alpha z}, \quad (2)$$

$$\alpha = \alpha_V + \alpha_S, \quad (3)$$

$$\alpha_V = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon_0'} \operatorname{tg} \delta, \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{\epsilon_0''}{\epsilon_0'}, \quad (4)$$

$$\alpha_S = \frac{1}{2} \sqrt{\epsilon_0'} \sqrt{\frac{f}{\sigma} \frac{1/R_1 + 1/R_2}{\ln(R_2/R_1)}}, \quad (5)$$

$\epsilon_0'$ ,  $\epsilon_0''$  – действительная и мнимая части комплексная диэлектрической проницаемости  $\epsilon_0$ ,  $c$  – скорость света. Коэффициент  $\alpha_V$  описывает объемное

затухание электромагнитной волны вследствие наличия мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости, а  $\alpha_S$  – затухание электромагнитной волны в металлических стенках коаксиальных труб вследствие конечной проводимости  $\sigma$  металла. В силу последней причины на внутренней поверхности металлических проводников выделяется энергия. Поверхностная плотность, выделяемой тепловой мощности, описывается выражениями

$$q_i = \sqrt{\epsilon_0'} \sqrt{\frac{f}{\sigma}} \frac{P\varphi(t)}{4\pi R_i^2 \ln(R_2/R_1)} e^{-\alpha z}, \quad i = 1, 2. \quad (6)$$

В выражении (6)  $i = 1$  соответствует внутреннему проводнику,  $i = 2$  – внешнему.

Для математического описания процесса ликвидации пробок в оборудовании нефтяных скважин и трубопроводах выберем цилиндрическую систему координат  $(r, \varphi, z)$ . Будем предполагать азимутальную симметрию задачи. Динамика распределения температуры в объеме парафиновой пробки описывается уравнением теплопроводности, имеющем вид

$$\rho c_T \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda \frac{\partial T}{\partial z} + Q(r, z, t), \quad (7)$$

где  $\rho$  – плотность высокопарафинистой нефти,  $c_T$  – ее теплоемкость,  $\lambda$  – теплопроводность. Плотность и теплопроводность считаем не зависящими от температуры, а теплоемкость при температуре фазового перехода  $T_S$  имеет  $\delta$ -образную особенность:

$$c_T = c_0 + L\delta(T - T_S), \quad (8)$$

где  $L$  – скрытая теплота фазового перехода,  $c_0$  – теплоемкость парафина (нефти) до и после фазового перехода,  $\delta(T - T_S)$  – дельта-функция.

Уравнение теплопроводности (7) следует дополнить граничными условиями. На переднем торце  $z = 0$  зададим граничное условие в виде конвективного теплообмена по закону Ньютона

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \kappa_1 [T(r, 0, t) - T_0], \quad (9)$$

$T_0$  – температура окружающей среды и начальная температура парафина, а на удаленном торце пробки  $z = H$  теплообмен отсутствует

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0. \quad (10)$$

На поверхности внешнего цилиндра  $r = R_2$  граничное условие зададим в виде закона конвективного теплообмена, но с другим коэффициентом теплообмена  $\kappa$  и с учетом поверхностного теплового выделения вследствие затухания электромагнитной волны в металле [6]

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = \kappa [T(R_2, z, t) - T_0] - q_2(z, t). \quad (11)$$

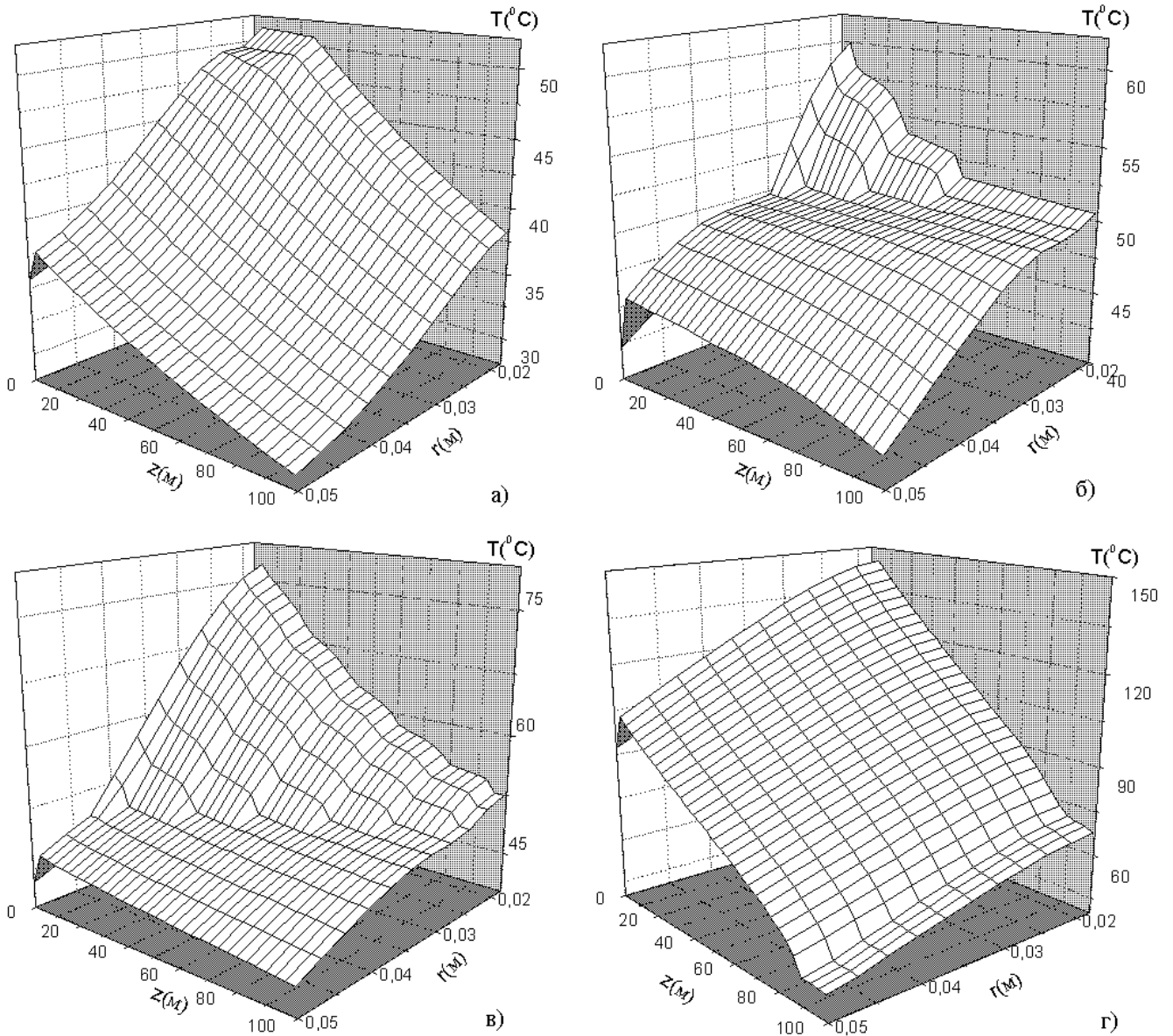


Рис. 1. Профиль температуры с учетом тепловыделения в стальных трубах для различных моментов времени (Рис. 1а –  $t = 2$  часа. Рис. 1б –  $t = 6$  часов. Рис. 1в –  $t = 11$  часов. Рис. 1г –  $t = 34$  часа.) в процессе ликвидации парафиновой пробки длиной  $H = 100$  м на участке оборудования нефтяной скважины. Мощность источника электромагнитного излучения  $P = 10$  кВт, частота  $f = 10$  МГц.

где  $\kappa = Nu\lambda/R_2$ ,  $Nu$  – число Нуссельта. Внутреннюю поверхность коаксиальной линии считаем теплоизолированной. Граничное условие на ней с учетом поверхностного тепловыделения имеет вид:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = -q_1(z, t). \quad (12)$$

Таким образом, уравнение теплопроводности (7) совместно с граничными условиями (9)–(12) и выражениями для плотности мощности объемного и поверхностного тепловыделения (2), (6) полностью описывает динамику распределения температуры в объеме парафиновой пробки.

Численное решение уравнения теплопроводности

было получено методом сквозного счета [10]. При этом для аппроксимации уравнения в частных производных использовалась явная схема. Дельта-функция в выражении для теплоемкости аппроксимировалась ступенькой с шириной  $0.8 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\delta_\epsilon(x) = \begin{cases} \frac{1}{2\epsilon}, & -\epsilon < x < \epsilon, \\ 0, & x < -\epsilon \text{ или } x > \epsilon, \end{cases} \quad \text{где } \epsilon = 0.4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Для определения эффективности работы ВЧ источника, каналов расхода его энергии, а также контроля точности численного решения уравнения теплопроводности выпишем закон сохранения энергии. Он следует непосредственно из уравне-

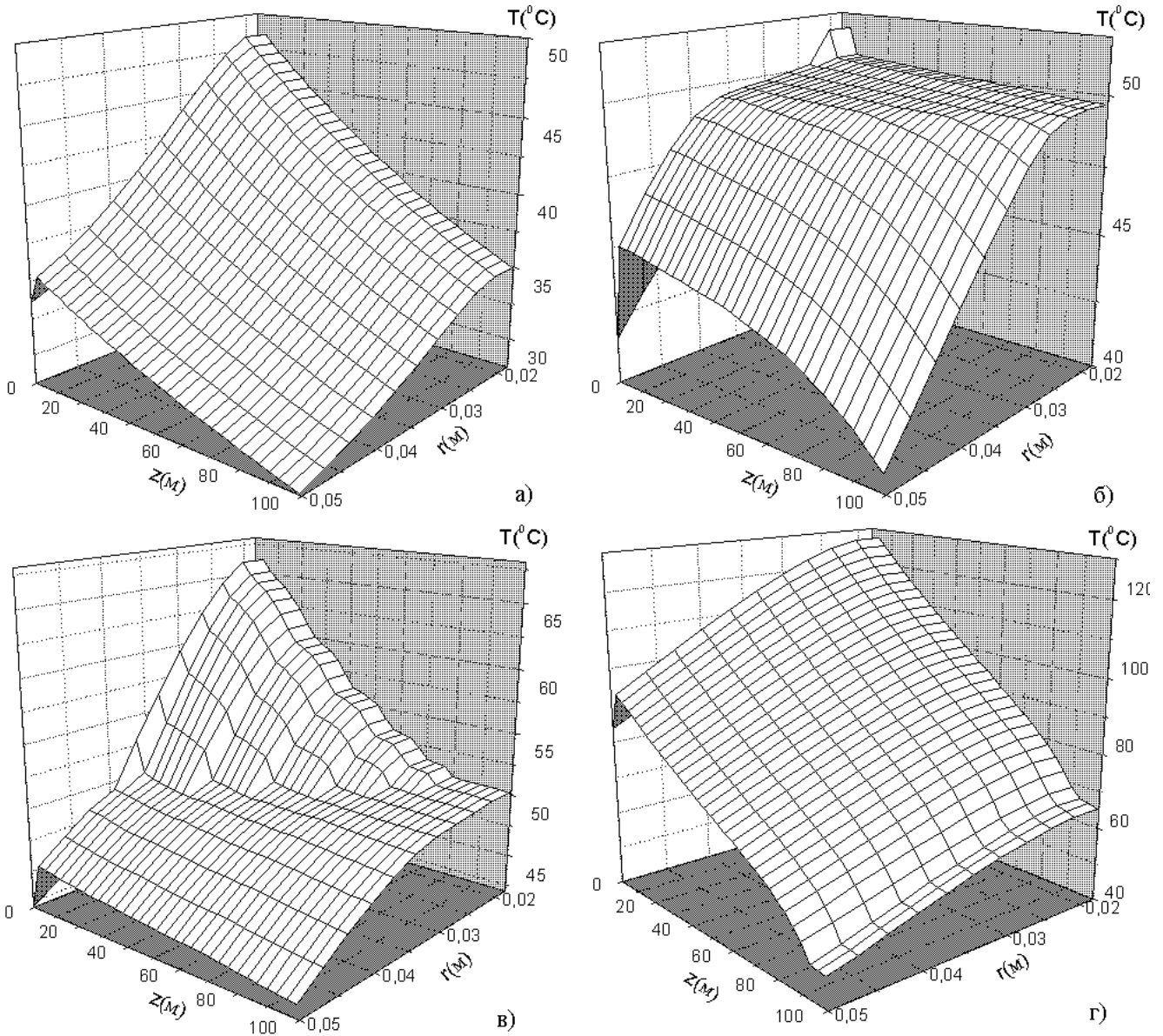


Рис. 2. Профиль температуры без учета тепловыделения в трубах для различных моментов времени (Рис. 2а –  $t = 2$  часа. Рис. 2б –  $t = 6$  часов. Рис. 2в –  $t = 11$  часов. Рис. 2г –  $t = 50$  часов.) в процессе ликвидации парафиновой пробки длиной  $H = 100$  м на участке оборудования нефтяной скважины. Мощность источника электромагнитного излучения  $P = 10$  кВт, частота  $f = 10$  МГц.

ния теплопроводности (7) с граничными условиями (9)–(12)

$$W_2 = W_1 - W_3 - W_4, \quad (13)$$

где

$$W_1 = P(1 - e^{-\alpha H}) \int_0^t \varphi(t') dt', \quad (14)$$

$$W_2 = \rho \int dV \int_{T_0}^T c(T') dT', \quad (15)$$

$$W_3 = 2\pi\kappa R_2 \int_0^t dt' \int_0^H dz [T(r = R_2, z, t') - T_0], \quad (16)$$

$$W_4 = 2\pi\kappa_1 \int_0^t dt' \int_{R_1}^{R_2} r dr [T(r, z = 0, t') - T_0]. \quad (17)$$

Величины  $W_i$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) имеют ясный 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 переднем торце парафиновой пробки.

Следует отметить, что результаты численных расчетов тепловых полей слабо зависят от граничных условий на торцах пробки. Это объясняется тем, что поверхностные потери тепла идут в основном через боковую поверхность в силу огромной разницы площадей боковой поверхности и торцов пробки в пользу первой.

## 2.2. Ликвидация парафиновой пробки в непрерывном режиме работы ВЧ источника

При численном моделировании процесса устранения парафиновой пробки были использованы следующие теплофизические и электродинамические параметры нефти:  $\rho = 950 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_0 = 3 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ ,  $T_S = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $L = 300 \text{ кДж/кг}$ ,  $\lambda = 0.125 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ,  $\sqrt{\varepsilon_0}tg\delta = 0.032$ ,  $\varepsilon_0 = 2.3$ ,  $\varkappa_1 = 0.2$ ,  $\varkappa = 2.5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$  (соответствует трубе в сухом грунте ( $Nu = 1$ )). Температура окружающей среды  $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Мощность источника излучения  $P$  принималась равной 10 кВт, диаметр внешней трубы коаксиальной линии 0.1 м, внутренней — 0.036 м, длина пробки 100 м, проводимость стали  $\sigma = 0.37 \cdot 10^{17} \text{ сек}^{-1}$ .

Частота излучения, которая определяет значение коэффициента затухания ВЧ мощности  $\alpha$ , должна обеспечивать максимальную скорость и глубину проплавления пробки. Действительно, при малых  $\alpha$  ( $\alpha H \ll 1$ ) практически вся мощность проходит через пробку и лишь небольшая ее часть используется для нагрева. При достаточно больших  $\alpha$  ( $\alpha H \gg 1$ ) основная часть ВЧ мощности будет поглощаться в узком слое вещества пробки вблизи ее границы, примыкающей к ВЧ генератору. В результате будет происходить перегрев этой области и сильное рассеивание энергии через внешнюю боковую стенку. Таким образом, существует оптимальное значение коэффициента затухания ВЧ мощности  $\alpha \sim 1/H$  и, соответственно, частоты излучения. В численных расчетах выбрана частота 10 МГц, которая соответствует оптимальному значению  $\alpha$  при заданной длине пробки  $H$ .

Отметим, что при выводе выражения для источника тепловой энергии в уравнении теплопроводности, было сделано предположение, что коэффициент затухания ВЧ мощности в объеме пробки  $\alpha_V$  не зависит от температуры. В действительности для определенной области частот такая зависимость имеет место. В частности, на частоте 0.1 МГц  $\alpha_V(T)$  имеет выраженный максимум вблизи

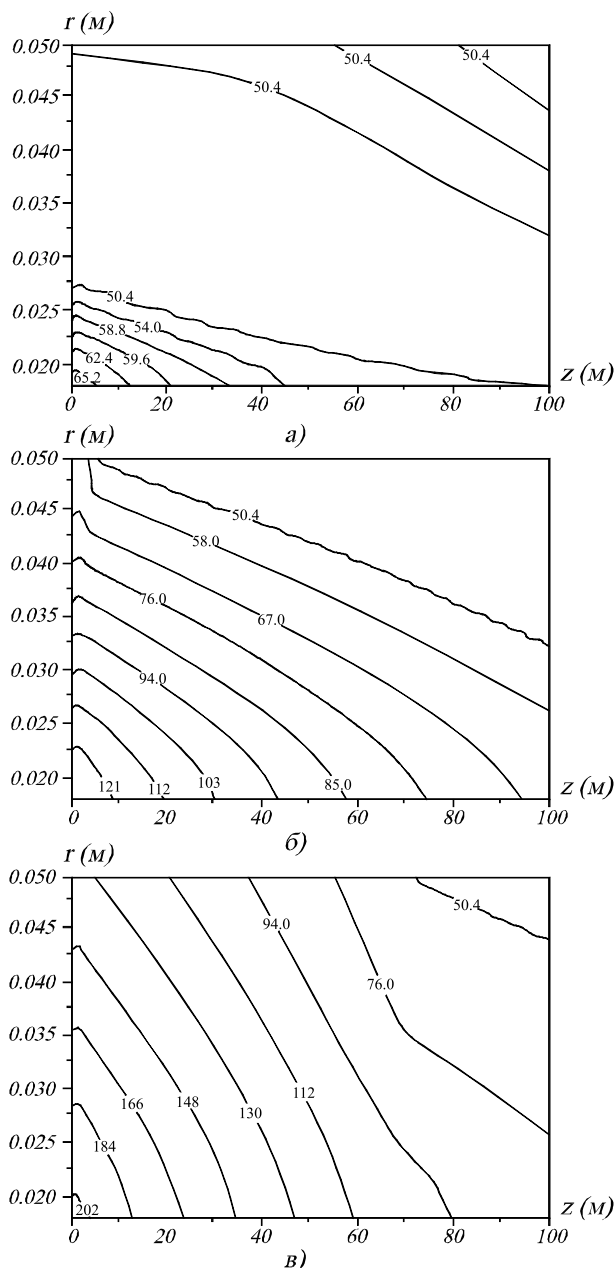


Рис. 3. Линии уровня температуры в различные моменты времени (рис. 3а —  $t = 2.5$  часа; рис. 3б —  $t = 7.0$  часов; рис. 3в —  $t = 12.00$  часов) в процессе ликвидации парафиновой пробки на участке оборудования нефтяной скважины длиной  $H = 100$  м. Мощность источника электромагнитного излучения  $P = 20$  кВт, частота  $f = 10$  МГц. Режим прогрева непрерывный.

температуры фазового перехода [5]. С увеличением частоты положение максимума смещается в область более высоких температур, а значение  $\alpha_V$  в точке максимума уменьшается. Для выбранного значения частоты 10 МГц с хорошей точностью можно пренебречь зависимостью коэффициента затухания от температуры.

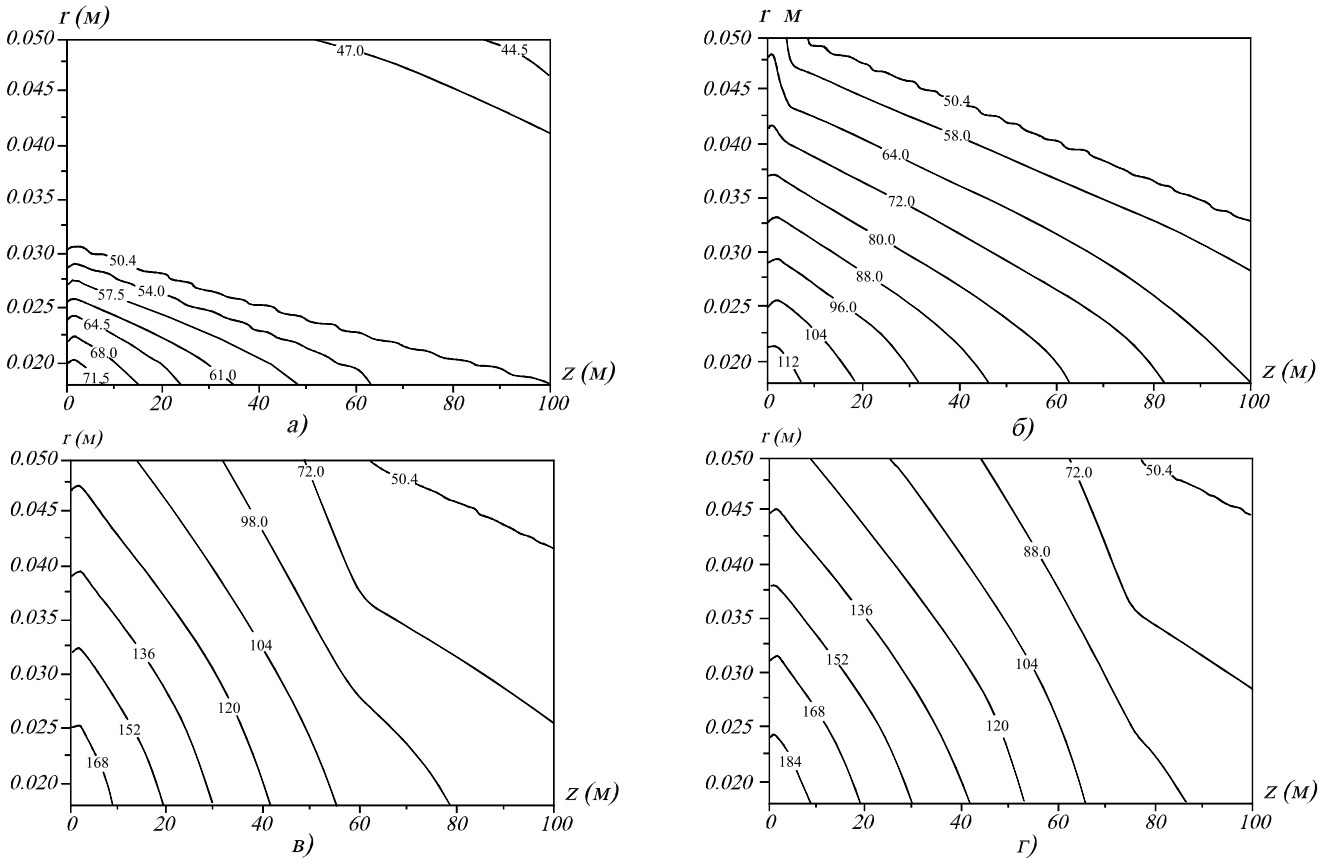


Рис. 4. Линии уровня температуры в различные моменты времени (рис. 4а –  $t = 4$  часа; рис. 4б –  $t = 10.25$  часа; рис. 4в –  $t = 17$  часов; рис. 4г – 20 часов) в процессе ликвидации парафиновой на участке оборудования нефтяной скважины длиной  $H = 100$  м. Мощность источника электромагнитного излучения  $P = 20$  кВт, частота  $f = 10$  МГц, скважность  $N = 1.5$  ( $\tau_* = 2$  час).

Результаты численных расчетов представлены на рис. 1,2. На рис. 1 изображены распределения температуры в объеме пробки с учетом поглощения ВЧ мощности и тепловыделения в стенках ствола скважины, а на рис. 2 без учета этих факторов. Численный анализ, показал, что в начальный период  $t < 2$  ч (рис. 1а) распределение температуры в объеме пробки сильно неоднородно. Температура максимальна вблизи поверхности внутренней трубы, где тепловыделение наиболее интенсивно. Кроме этого температура убывает с удалением от границы, примыкающей к ВЧ генератору, вглубь пробки  $z > 0$ . Этот результат очевиден, поскольку амплитуда ВЧ волны вдоль системы экспоненциально убывает. По мере приближения температуры к точке фазового перехода идет процесс выравнивания температуры в объеме пробки. Расплавление (возникновение жидкой фазы) начинается, примерно, через 2 часа вблизи поверхности внутренней трубы. Через 6 часов в пробке проплавляется сквозной канал.

Поверхность, разделяющая твердую и жидкую фазы, имеет форму конуса с радиусом, убывающим вдоль пробки. Коническая форма расплавленной

зоны может привести к разрушению пробки до ее полного расплавления. Полное проплавление пробки происходит через 34 часа. При этом максимальная температура нефти достигает  $150^{\circ}\text{C}$ .

Отметим, что учет тепловыделения в стенках скважины оказывает существенное влияние на процессы нагрева и проплавления парафиновой пробки. Нагрев стальных стенок скважины ускоряет процессы нагрева пробки, что убедительно доказывает сравнение рис. 1 и рис. 2. В частности, без учета тепловыделения в стенках ствола скважин время проплавления сквозного канала в парафиновой пробке увеличилось более чем в 2 раза с 6 ч до 13.5 ч. Время полного расплавления пробки также увеличилось, но не так значительно с 34 ч до 50 ч. Последнее обстоятельство объясняется тем, что нагрев внутренней трубы в силу ее малого радиуса происходит значительно интенсивнее, чем внешней. В этом легко убедиться, сравнивая выражения (6) для  $i = 1$  и  $i = 2$ . Поэтому существенно сокращается время проплавления сквозного канала. В то же время, благодаря относительно слабому нагреву внешней трубы, время полного устранения пробки увеличилось в меньшей степени (примерно на 30

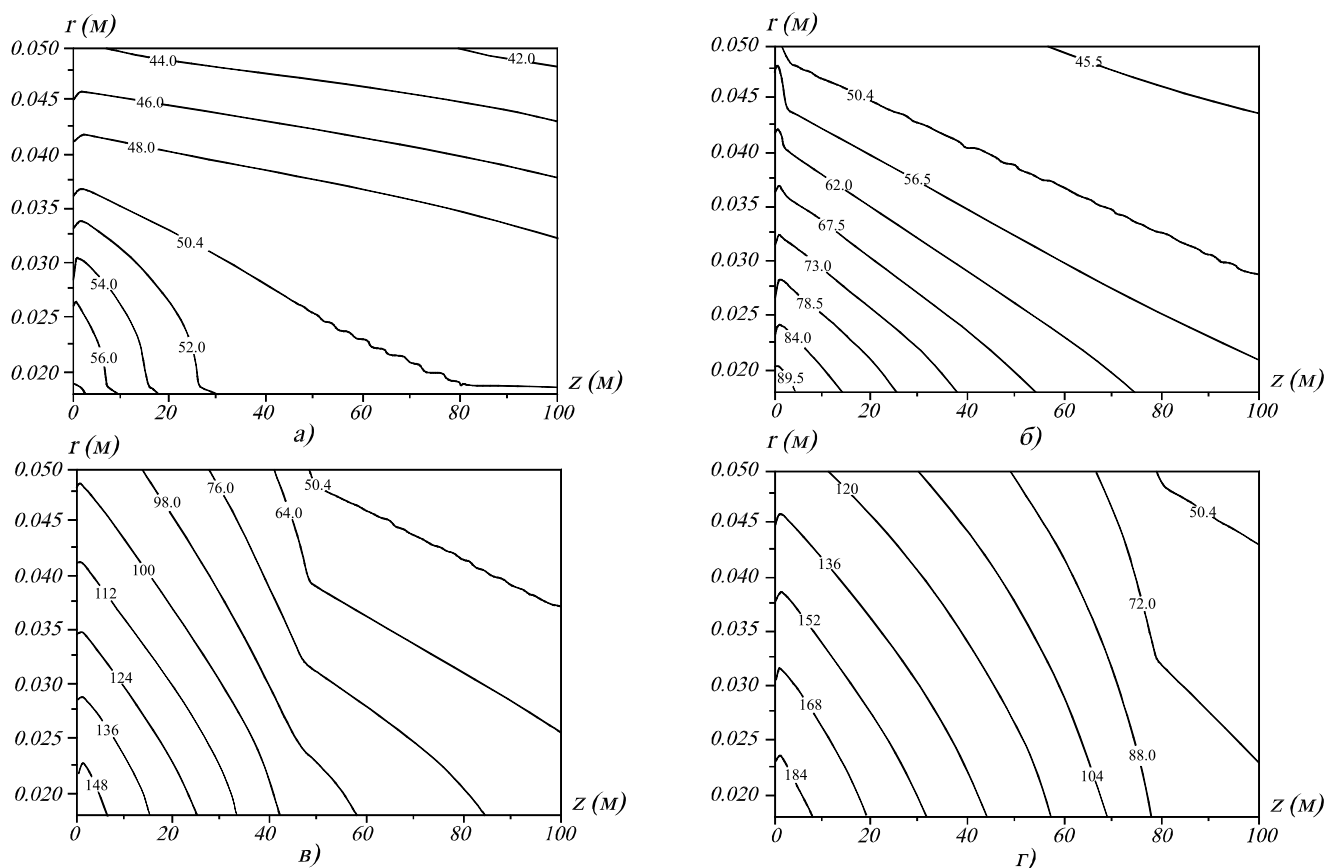


Рис. 5. Линии уровня температуры в различные моменты времени (рис. 5а –  $t = 8$  часов; рис. 5б –  $t = 14.25$  часов; рис. 5в –  $t = 23.00$  часа; рис. 5г –  $t = 34.25$  часов) в процессе ликвидации парафиновой пробки длиной  $H = 100$  м на участке оборудования нефтяной скважины длиной  $H = 100$  м. Мощность источника электромагнитного излучения  $P = 20$  кВт, частота  $f = 10$  МГц, скважность  $N = 2$  ( $\tau_* = 2$  час).

%).

### 2.3. Режим периодической работы источника электромагнитного излучения

В предыдущем разделе исследован процесс ликвидации парафиновой пробки в оборудовании нефтяной скважины ВЧ источником в непрерывном режиме работы. Время работы ВЧ источника до полной ликвидации пробки составляло несколько десятков часов при мощности источника 10 кВт.

Ясно, что работа ВЧ источника электромагнитного излучения в непрерывном режиме продолжительное время сопряжена с определенными техническими проблемами. Поэтому возникает вопрос о чувствительности рассматриваемого ВЧ метода [5,6] ликвидации парафиновых пробок к длительному отключению источника питания. Отключение источника питания может быть связано с его неполадками, а также с профилактическими работами.

Целью настоящего раздела является исследование процесса устранения парафиновой пробки в стволе нефтескважины ВЧ излучением в режиме периодической работы ВЧ источника (режим пе-

риодического включения и выключения ВЧ источника). В первую очередь будет изучено влияние периода работы источника электромагнитного излучения  $\tau$  и длительности непрерывной работы источника электромагнитного излучения  $\tau_*$  (в рамках одного цикла работы) на полное время ликвидации парафиновой пробки и необходимое для этого полное время работы ВЧ источника. Полное время работы ВЧ источника определяет затраченную энергию при фиксированной мощности.

Будем использовать для численного моделирования те же электрофизические и теплофизические параметры, что и в предыдущем разделе.

Очевидно, что прерывание работы ВЧ источника может существенно повлиять на процесс ликвидации парафиновой пробки, если промежуток времени, в течение которого источник питания отключен, порядка или больше характерного времени термодиффузии  $c_0 \rho X^2 / \lambda$  ( $X$  — характерный размер системы, поперечный или продольный). В обратном случае задачу о фазовом переходе можно рассматривать как задачу с постоянным ВЧ источником [6], но с эквивалентной мощностью, равной усредненной по периоду работы ВЧ генератора. На

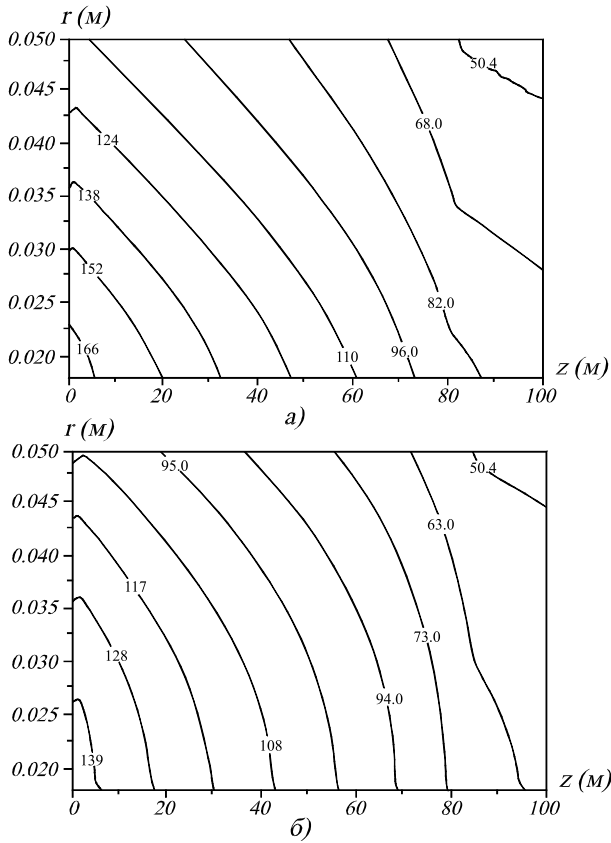


Рис. 6. Динамика остывания среды в промежутке времени, когда ВЧ-генератор отключен. (рис. 6а –  $t = 35$  часа; рис. 6б –  $t = 36$  часов.) в процессе ликвидации парафиновой пробки длиной  $H = 100$  м на участке оборудования нефтяной скважины. Мощность источника электромагнитного излучения  $P = 20$  кВт, частота  $f = 10$  МГц, скважность  $N = 2$  ( $\tau_* = 1$  час).

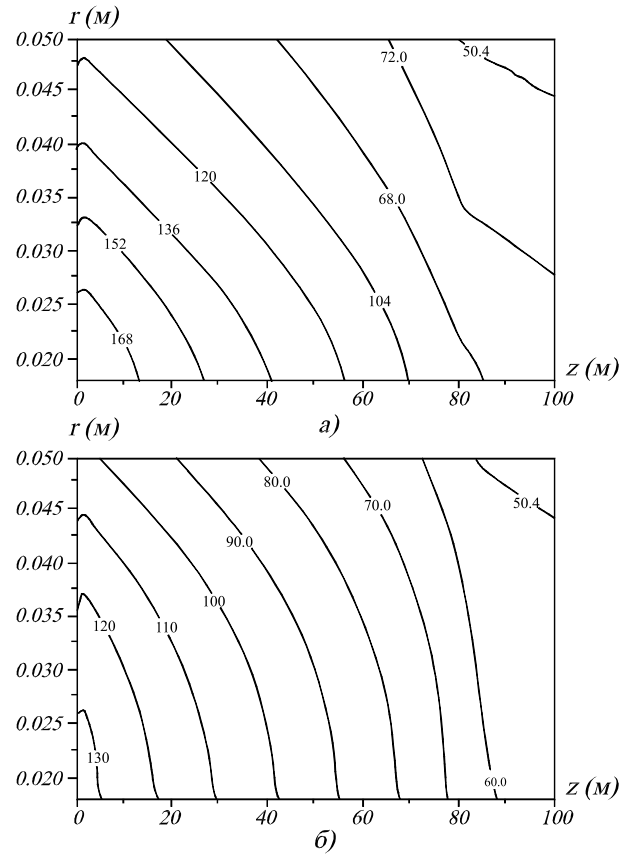


Рис. 7. Динамика остывания среды в промежутке времени, когда ВЧ-генератор отключен. (рис. 7а –  $t = 34$  часов; рис. 7б –  $t = 36$  часов.) в процессе ликвидации парафиновой пробки длиной  $H = 100$  м на участке оборудования нефтяной скважины. Мощность источника электромагнитного излучения  $P = 20$  кВт, частота  $f = 10$  МГц. Скважность  $N = 2$  ( $\tau = 2$  час).

рис. 3–5 представлены серии графиков с линиями уровня температуры в объеме парафиновой пробки в различные моменты времени. Рис. 3 соответствует непрерывному режиму, а рис. 4 и 5 соответствуют периодическому режиму работы ВЧ источника  $\tau_* = 1$  час и скважностью  $N = \tau/\tau_*$ , равной 1.5 и 2, соответственно. Частота и пиковая мощность электромагнитного излучения равны  $f = 10$  МГц и  $P = 20$  кВт. Моменты времени для непрерывного режима выбраны следующим образом:

- а) время проплавления канала на всю длину пробки;
- б) время проплавления пробки по всему сечению переднего торца  $z = 0$ ;
- в) время ликвидации парафиновой пробки.

Для режимов с периодическим включением (рис. 4,5) моменты времени

- а) и б) выбраны из тех же соображений;

- в) соответствует времени ликвидации парафиновой пробки в непрерывном режиме;
- г) время ликвидации парафиновой пробки.

Основной вывод, следующий из сравнений рис. 3–5, состоит в том, что воздействие ВЧ источника в режиме периодической работы на парафиновую пробку приводит к более однородному прогреву пробки и расплавленным слоев парафина. Максимальная температура, достигаемая в исследуемом образце, существенно ниже, чем при разогреве пробки при непрерывной работе ВЧ генератора. При скважности  $N = 2$ ,  $\tau_* = 2$  часа она составляет  $160$  °С, в то время как для непрерывного режима максимальная температура равна  $220$  °С. Полное время ликвидации парафиновой пробки  $t_{total}$  возрастает нелинейным образом с увеличением скважности: для  $N = 1,5$   $t_{total} = 20$  часов, для  $N = 2$   $t_{total} = 34$  часа 15'. При этом времена работы ВЧ источника  $t_S$  равны 14 часов и 17 часов 15', соответственно. В непрерывном режиме

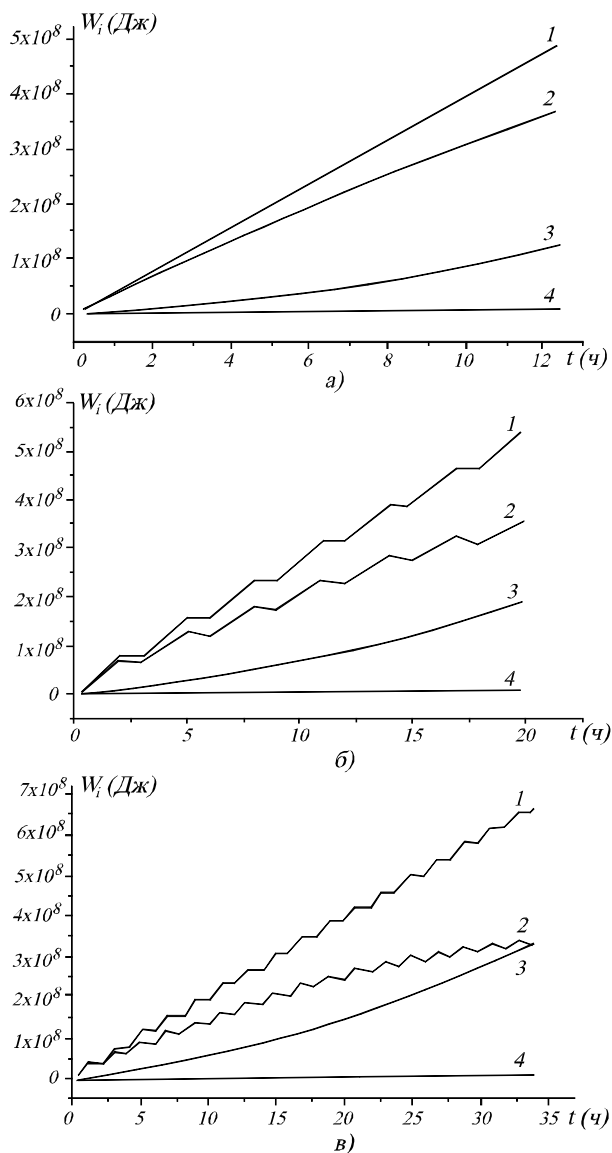


Рис. 8. Энергетический баланс системы (выражения (13)–(17)): кривая 1 –  $W_1$ , 2 –  $W_2$ , 3 –  $W_3$ , 4 –  $W_4$  в процессе ликвидации парафиновой пробки длиной  $H = 100$  м на участке оборудования нефтяной скважины. Мощность источника электромагнитного излучения  $P = 20$  кВт, частота  $f = 10$  МГц. (рис. 8а – непрерывный режим; рис. 8б – периодический режим для  $N = 1.5$  и  $\tau_* = 2$  часа; рис. 8в – периодический режим для  $N = 2$  и  $\tau_* = 1$  час).

работы ВЧ источника парафиновая пробка ликвидируется за 12 часов.

Отметим, что при дальнейшем увеличении скважности время ликвидации парафиновой пробки сильно возрастает и при  $N = 3$  при фиксированной мощности  $P = 20$  кВт полного проплавления невозможно достигнуть. Возникает стационарное состояние, в котором процессы тепловыделения и потерь тепла взаимно скомпенсированы и дальнейшая работа ВЧ источника лишена смысла.

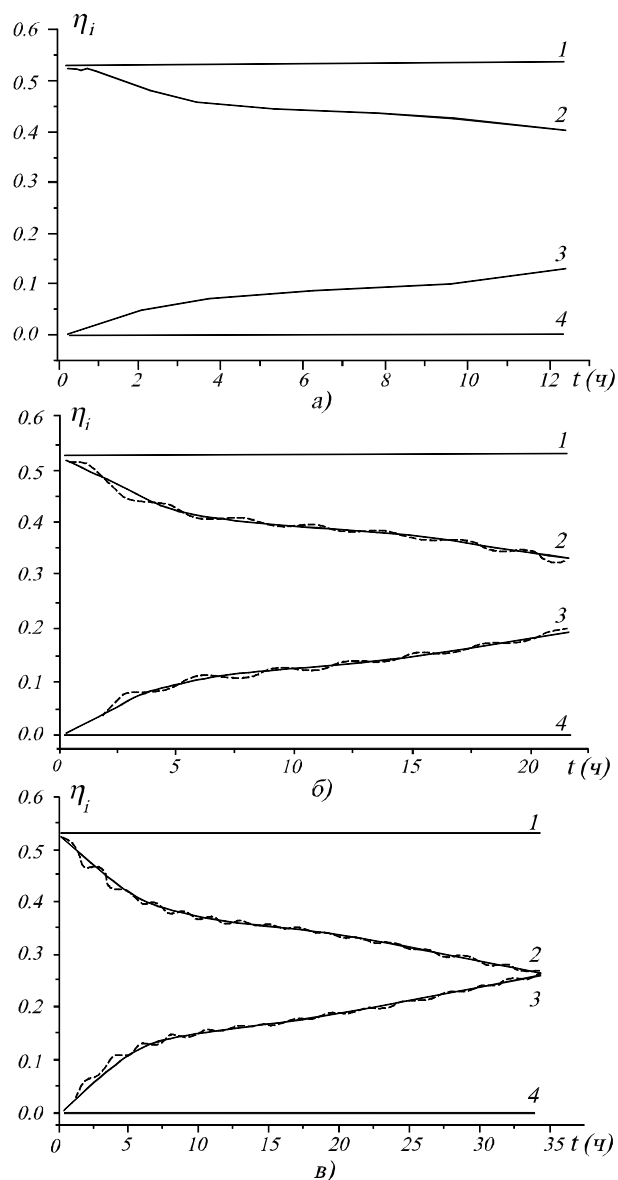


Рис. 9. Относительный энергетический баланс системы ( $\eta_i = W_i / (\int P(t) dt)$ ): кривая 1 –  $\eta_1$ , 2 –  $\eta_2$ , 3 –  $\eta_3$ , 4 –  $\eta_4$  в процессе ликвидации парафиновой пробки длиной  $H = 100$  м на участке оборудования нефтяной скважины. Мощность источника электромагнитного излучения  $P = 20$  кВт, частота  $f = 10$  МГц (рис. 9а – непрерывный режим; рис. 9б – периодический режим для  $N = 1.5$  и  $\tau_* = 2$  часа (сплошные линии) и непрерывный режим при  $P = 40/3$  кВт (пунктирные линии); рис. 9в – периодический режим для  $N = 1$  и  $\tau_* = 1$  час и непрерывные режим при  $P = 10$  кВт (пунктирные кривые)).

Обобщенные результаты численного анализа процесса устранения парафиновых пробок в режиме периодической работы ВЧ источника для различных скважностей и длительностей работы  $\tau_*$  сведены в таблицу 1.

Для иллюстрации влияния процессов термодиффузии и потерь тепла в промежутке времени, когда ВЧ генератор не работает, на общую картину нагрева пробки на рис. 6а и 6б представлены распределения температуры по объему парафиновой пробки для  $N = 2$  и  $\tau_* = 1$  час. Видно, что при отключенном ВЧ генераторе максимальная температура снизилась на  $27^{\circ}\text{C}$ , а распределение температуры стало более однородным. Поверхность фазового перехода за указанное время практически не изменила места своего расположения. Аналогичная ситуация наблюдается и для случая с большим промежутком времени отключения ВЧ генератора  $N = 2$ ,  $\tau_* = 2$  часа (см. рис. 7а и рис. 7б). По сравнению с рис. 6а и рис. 6б распределение температуры в течение 2-х часов стало более однородным. Положение фазового фронта также не изменилось за время отключения ВЧ источника.

На рис. 8 представлена зависимость энергетических характеристик  $W_i$  от времени для непрерывного (рис. 8а) и периодического режимов работы ВЧ источника (рис. 8б –  $N = 1.5$ , 8в –  $N = 2$ ). Видно, что при скважности  $N = 2$  потери тепла уже сравнимы с энтальпией системы в конце процесса устранения пробки, т.е. примерно половина выделенной в объеме парафиновой пробки энергии при полной ликвидации пробки будет рассеяна в окружающую среду. Для скважности  $N = 1.5$  и непрерывного режима такие потери существенно меньше.

На рис. 9 приведены временные зависимости относительных значений энергетических характеристик, приведенных на рис. 8 ( $\eta_i = W_i / (P \int_0^t \varphi(t') dt')$ ). В непрерывном режиме на полезную работу затрачивается около 40 % энергии ВЧ генератора (в объеме пробки выделяется  $\approx 53$  % энергии ВЧ источника). Для скважности  $N = 1.5$  соответствующая величина равна 35 %, а для скважности  $N = 2$  на ликвидацию парафиновой пробки уходит меньше 30 % вложенной энергии.

Выше было сделано утверждение, что воздействие электромагнитной волны на парафиновую пробку в периодическом режиме работы можно описывать как воздействие непрерывного источника с усредненной по периоду работы мощностью. На рис. 9б пунктирными линиями показаны временные зависимости  $\eta_i$  с мощностью ВЧ источника 40/3 кВт, а на рис. 9в — для ВЧ источника с мощностью 10 кВт при его непрерывной работе. Видно, что времена устранения парафиновых пробок для периодического режима работы ВЧ источника и стационарного источника с мощностью, равной средней мощности ВЧ источника в режиме периодической работы, примерно, совпадают.

### 3. Разрушение парафиновых отложений в нефтяных трубопроводах движущимся источником электромагнитного излучения

#### 3.1. Устранение парафиновых пробок, полностью заполняющих поперечное сечение трубопровода

Выше было отмечено, что для эффективного нагрева и плавления парафиновой пробки заданной длины необходимо использовать электромагнитное излучение с определенной оптимальной частотой так, чтобы показатель поглощения в парафиновой пробке  $\alpha_V(f)$  был порядка обратной ее длины  $\alpha_V \approx 1/L$ . В случае оборудования нефтяной скважины в силу дисперсии ТЕМ волны ограничения на выбор рабочей частоты отсутствуют. Показатель поглощения  $\alpha_V(f)$  при этом пропорционален частоте. Нефтепровод является цилиндрическим волноводом, способный пропускать только волны с частотой выше частоты отсечки. Так цилиндрический волновод радиуса 72 см, заполненный диэлектриком (парафин), имеет частоту отсечки  $f = 104.8$  МГц для волны типа  $E_{0,1}$ . При рабочей частоте  $f = 140$  МГц коэффициент затухания мощности  $\alpha = 0.08$  м<sup>-1</sup>. На длине парафиновой пробки, равной, например, 100 м, электромагнитная волна ослабляется в  $e^8$  раз. Очевидно, что в этом случае парафиновая пробка не будет никогда расплавлена.

Выход из такой ситуации может состоять в использовании передвижного источника электромагнитного излучения. Скорость его передвижения будет определяться скоростью движения границы раздела жидкой и твердой фаз в процессе плавления парафиновой пробки под воздействием электромагнитного излучения. Для краткости мы будем называть предлагаемое устройство "электромагнитным кротом" по аналогии с "механическим кротом" (скрапером), используемым в нефтегазовой промышленности для механической очистки трубопроводов от парафиновых или газогидратных пробок.

##### 3.1.1. Постановка задачи

Процесс нагрева и плавления парафиновой пробки будем описывать, как и выше, на основе уравнения теплопроводности с заданным внешним тепловым источником. Как уже было сказано, в электродинамическом смысле парафиновую пробку в трубопроводе можно рассматривать как цилиндрический волновод, заполненный

Таблица 1. Времена проплавления парафиновой пробки длиной 100 м в оборудовании нефтяной скважины в зависимости от скважности и длительности одиночного импульса

N	$\tau_*$	$t_{total}$	$t_S$
непрер.	—	12.00 ч	—
1.25	2.00 ч	14.75 ч	12.75 ч
	1.00 ч	16.00 ч	13.00 ч
	0.50 ч	16.00 ч	13.00 ч
	0.25 ч	16.00 ч	13.00 ч
	0.125 ч	16.00 ч	12.875 ч
4/3	2.00 ч	17.50 ч	13.50 ч
	1.00 ч	17.50 ч	13.50 ч
	0.50 ч	17.25 ч	13.25 ч
	0.25 ч	17.25 ч	13.00 ч
	0.125 ч	17.50 ч	13.125 ч
1.5	2.00 ч	20.00 ч	14.00 ч
	1.00 ч	20.00 ч	14.00 ч
	0.50 ч	20.50 ч	14.00 ч
	0.25 ч	20.75 ч	14.00 ч
	0.125 ч	20.75 ч	13.875 ч
2	2.00 ч	33.50 ч	17.50 ч
	1.00 ч	34.25 ч	17.25 ч
	0.50 ч	34.50 ч	17.50 ч
	0.25 ч	34.00 ч	17.00 ч
	0.125 ч	33.75 ч	16.875 ч

диэлектриком. Задачу предполагаем аксиально-симметричной. Также предполагаем, что диэлектрик полностью заполняет металлический волновод. При последующем численном решении уравнения теплопроводности будем использовать метод сквозного счета [10], поэтому уравнение теплопроводности запишем в виде (7) без явного выделения фаз. Плотность мощности объемного тепловыделения  $Q$  в уравнении (7) теперь будет иметь вид:

$$Q = Q_0 \theta(z - z_0(t)) e^{-\alpha(z - z_0(t))} \quad (18)$$

и учитывает перемещение источника электромагнитного излучения по закону  $z = z_0(t)$ . Явный вид  $Q_0$  указан ниже в формуле (22). В выражении (18)

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

Источник электромагнитного излучения расположен в плоскости  $z = 0$  при  $t = 0$ . Затухание электромагнитной волны обусловлено объемными потерями в диэлектрической пробке и поверхностными в стальной стенке цилиндрического волновода вследствие конечного значения электрической проводимости. Учитывая аксиальную симметрию задачи, для волны  $E_{0n}$  легко получить

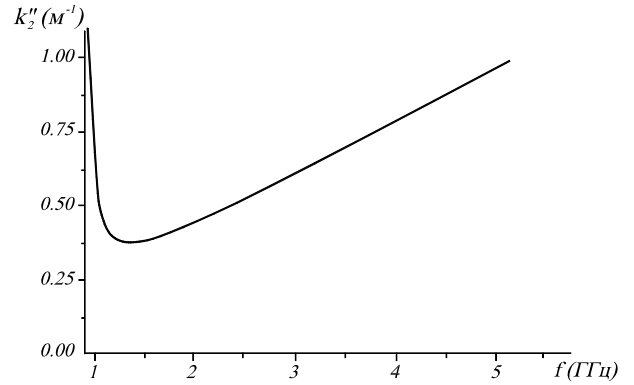


Рис. 10. Мнимая часть продольного волнового числа как функция частоты волны типа  $E_{01}$  для металлического цилиндрического волновода, заполненного парафином. Радиус волновода  $R = 0.0775$  м, проводимость металла  $\sigma = 0.37 \cdot 10^{17}$  сек $^{-1}$ , относительная диэлектрическая постоянная  $\epsilon = 2.3 + i0.0276$  (использованы данные работ [7,8]).

уравнение для определения постоянной затухания  $\alpha \equiv \alpha_V + \alpha_S = 2k_z''$  ( $\alpha_V$  – коэффициент затухания, обусловленный объемными потерями,  $\alpha_S$  – коэффициент затухания, обусловленный поверхностными потерями,  $k_z''$  – мнимая часть продольного волнового числа  $k_z = k_z' + ik_z''$ ):

$$k_{\perp} \frac{J_0(k_{\perp} R)}{J_1(k_{\perp} R)} = \frac{1+i}{2} k_0 \epsilon_0 \sqrt{\frac{\omega}{2\pi\sigma}}. \quad (19)$$

В уравнении (19) введены обозначения:  $k_{\perp}^2 = k_0^2 \epsilon_0 - k_z^2$ ,  $k_0 = \omega/c$ ,  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота,  $J_0, J_1$  – функции Бесселя нулевого и первого порядков,  $R$  – радиус волновода. Считая мнимую часть диэлектрической проницаемости  $\epsilon_0''$  малой по сравнению с ее действительной частью  $\epsilon_0'$ , из (19) получим приближенное решение

$$\begin{aligned} \alpha_V &= \frac{\omega^2 \epsilon_0''}{c^2 k_{z_0}'}, \\ \alpha_S &= \frac{\omega \epsilon_0'}{R k_{z_0}''} \sqrt{\frac{\omega}{2\pi\sigma}}, \\ k_{z_0}' &= \sqrt{\frac{\omega^2}{2} \epsilon_0' - \frac{\mu_n^2}{R^2}}, \end{aligned} \quad (20)$$

$\mu_n$  – значение  $n$ -го корня функции Бесселя  $J_0(\mu_n) \equiv 0$ .

Плотность мощности объемного тепловыделения для неподвижного источника может быть определена, исходя из определения потерь мощности при прохождении электромагнитной волны через поглощающую среду:

$$Q = \frac{\omega}{8\pi} |\vec{E}|^2 \epsilon_0''. \quad (21)$$

Для рассматриваемого случая волны типа  $E_{0n}$  отличными от нуля являются компоненты электри-

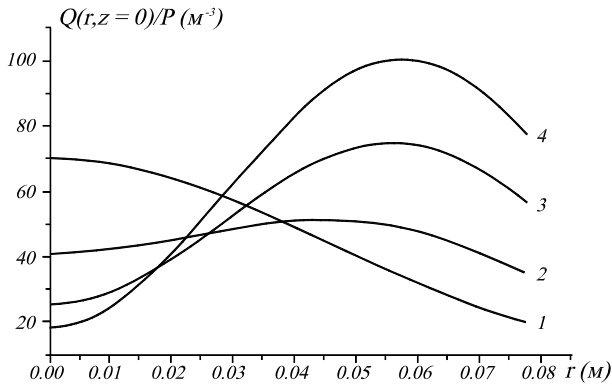


Рис. 11. Поперечное распределение плотности мощности тепловыделения, нормированной на мощность источника, в случае неподвижного источника в точке  $z = 0$  в цилиндрическом волноводе, заполненном парафином. Кривая 1 –  $f = 1.4$  ГГц. Кривая 2 –  $f = 2$  ГГц. Кривая 3 –  $f = 3$  ГГц. Кривая 4 –  $f = 4$  ГГц.

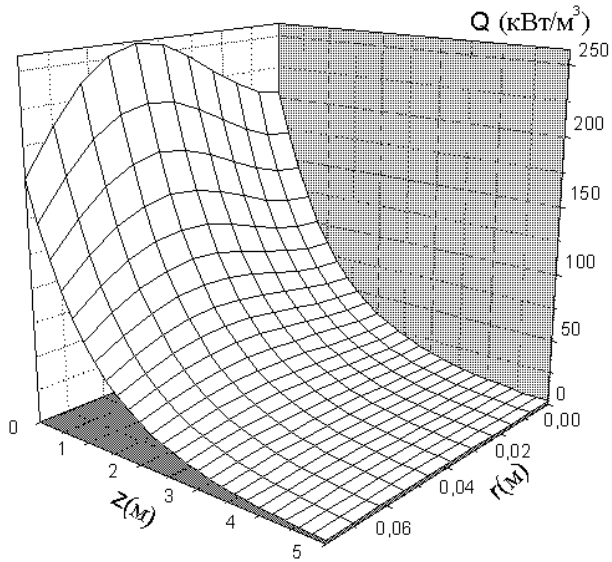


Рис. 12. Распределение плотности мощности тепловыделения по объему парафиновой пробки. Мощность источника  $P = 5$  кВт, частота  $E_{01}$ -волны  $f = 2$  ГГц.

ческого поля  $E_z$  и  $E_r$ , определяемые для цилиндрического волновода, заполненного диэлектриком, хорошо известными выражениями [9]. Проведя необходимые преобразования, для величины  $Q_0$  получим следующее выражение:

$$Q_0 = \frac{\varepsilon_0''}{\pi Re(k_z \varepsilon_0)} \frac{\mu_n^2}{R^4} P \left[ J_0^2 \left( \mu_n \frac{r}{R} \right) + \frac{|k_z|^2 R^2}{\mu_n^2} J_1^2 \left( \mu_n \frac{r}{R} \right) \right], \quad (22)$$

где  $P$  – ВЧ мощность электромагнитного излуче-

ния.

Уравнение теплопроводности (7) необходимо дополнить граничными условиями данной задачи. На торце парафиновой пробки будем использовать те же граничные условия, что и для коаксиальной пробки (9), (10), а на внешней поверхности трубы в виде, аналогичном (11)

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \varkappa [T(R, z, t) - T_0] - q(z, t), \quad (23)$$

где  $\varkappa = \lambda Nu/R$  – коэффициент теплообмена с внешней средой,  $q$  – поверхностная плотность мощности тепловыделения.

Мощность  $q$ , поглощенная в металлических стенках трубопровода, может быть найдена путем решения строгой электромагнитной задачи в металле и диэлектрике. Определив компоненты электрического поля и воспользовавшись формулой, аналогичной (21), для области заполненной металлом с соответствующей комплексной диэлектрической проницаемостью, найдем мощность, поглощенную в объеме металла. В реальных условиях глубина скин-слоя намного меньше длины волны и толщины трубы, и поэтому можно считать, что мощность электромагнитной волны поглощается на внутренней поверхности трубопровода. Для определения поверхностной плотности мощности тепловыделения воспользуемся выражением для поперечной компоненты потока электромагнитной энергии. В результате получаем следующее выражение для поверхностного тепловыделения

$$q = \frac{\omega |\varepsilon_0|^2}{Re(k_z \varepsilon_0)} \sqrt{\frac{\omega}{2\pi\sigma}} \times \frac{P}{2\pi R^2} \theta(z - z_0(t)) e^{-\alpha(z - z_0(t))}. \quad (24)$$

Здесь также как и в (18) учтен тот факт, что источник электромагнитного излучения излучает только вперед и перемещается внутри трубы в продольном направлении по закону  $z_0(t)$ .

Для замыкания системы уравнений, определяющих процесс ликвидации парафиновой пробки движущимся источником электромагнитного излучения, необходимо задать закон его перемещения  $z_0(t)$ . Зависимость  $z_0(t)$  определяется законом движения границы раздела жидкой и твердой фаз. Но движение самой границы определяется тем же дифференциальным уравнением (7). Уравнение для скорости движения границы фаз в явном виде может быть записано только в одномерном случае [10]. При численном решении уравнения теплопроводности (7) с граничными условиями (9), (10), (23) и сложной зависимостью плотности мощности тепловыделения  $Q(r, z)$  от пространственных координат будем исходить из следующего алгоритма. Источник излучения перемещается в

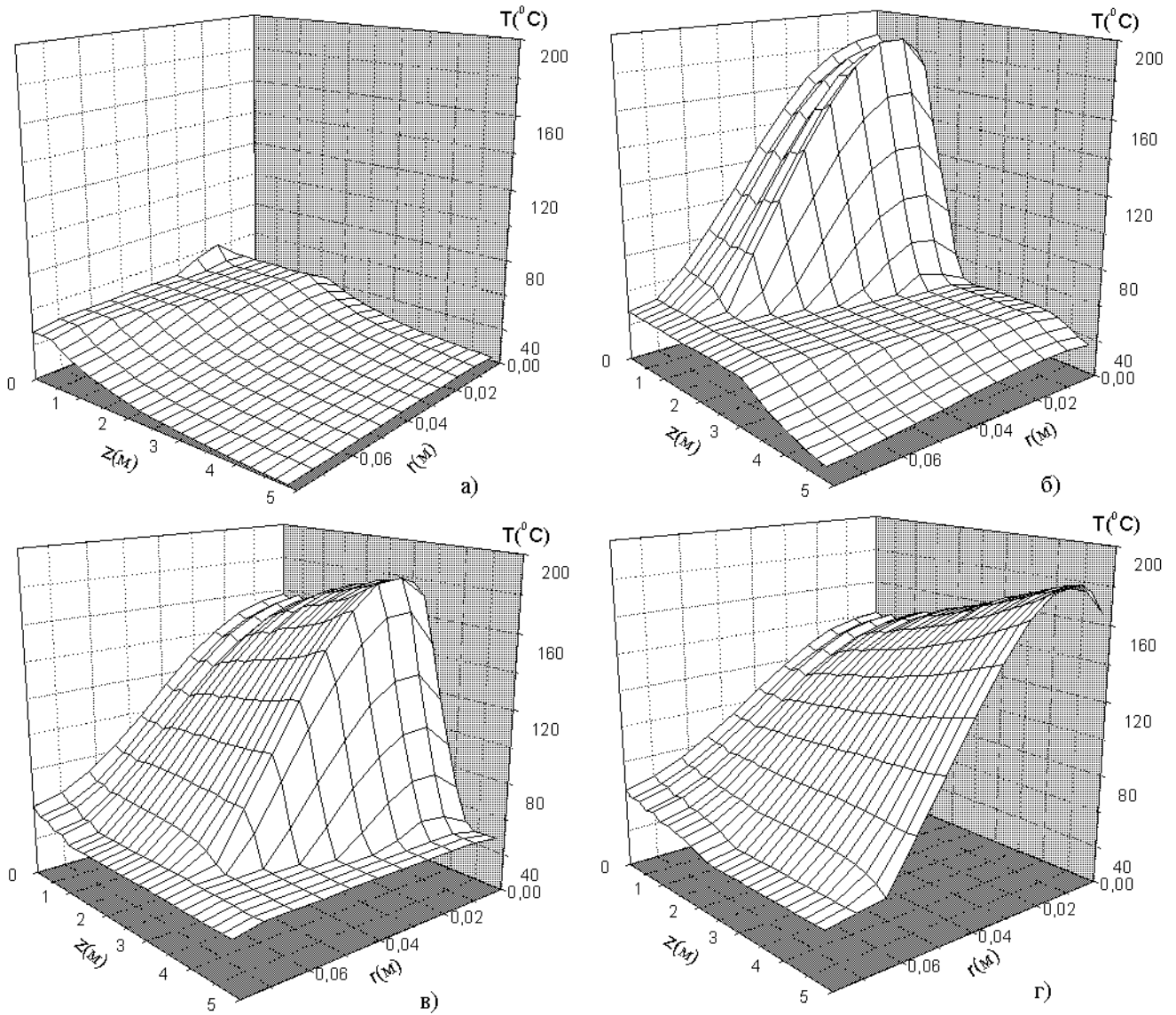


Рис. 13. Профиль температуры для различных моментов времени (Рис. 13а –  $t = 15$  мин. Рис. 13б –  $t = 1$  час 15 мин. Рис. 13в –  $t = 2$  часа 15 мин. Рис. 13г –  $t = 3$  часа.) в процессе ликвидации парафиновой пробки "электромагнитным кротом" на участке нефтепровода длиной  $H = 5$  м. Радиус трубопровода  $R = 0.0775$  м. Мощность источника электромагнитного излучения  $P = 5$  кВт, частота  $f = 1.4$  ГГц.

трубе в продольном направлении так, чтобы минимальное продольное расстояние от него до поверхности фронта фазового перехода было постоянным.

### 3.1.2. Анализ численных результатов

Для численного анализа процесса ликвидации парафиновой пробки будем использовать теплофизические и электродинамические параметры высокопарафинистой нефти, приведенные в разделе 2.

Для контроля точности аппроксимации системы уравнений разностной схемой используем баланс энергии (13), в котором в случае движущегося источника электромагнитного излучения необходи-

мо положить

$$W_1 = P \int_0^t [1 - e^{-\alpha(H-z_0(t))}] dt', \quad (25)$$

$$W_3 = 2\pi\kappa R \int_0^t dt' \int_0^H dz [T(r=R, z, t') - T_0], \quad (26)$$

$$W_4 = 2\pi\kappa_1 \int_0^t dt' \int_0^R dr r [T(r, z=0, t') - T_0]. \quad (27)$$

Приведенные ниже численные результаты получены для модельного нефтепровода радиуса  $R = 0.0775$  м. Стенка нефтепровода сделана из стали с

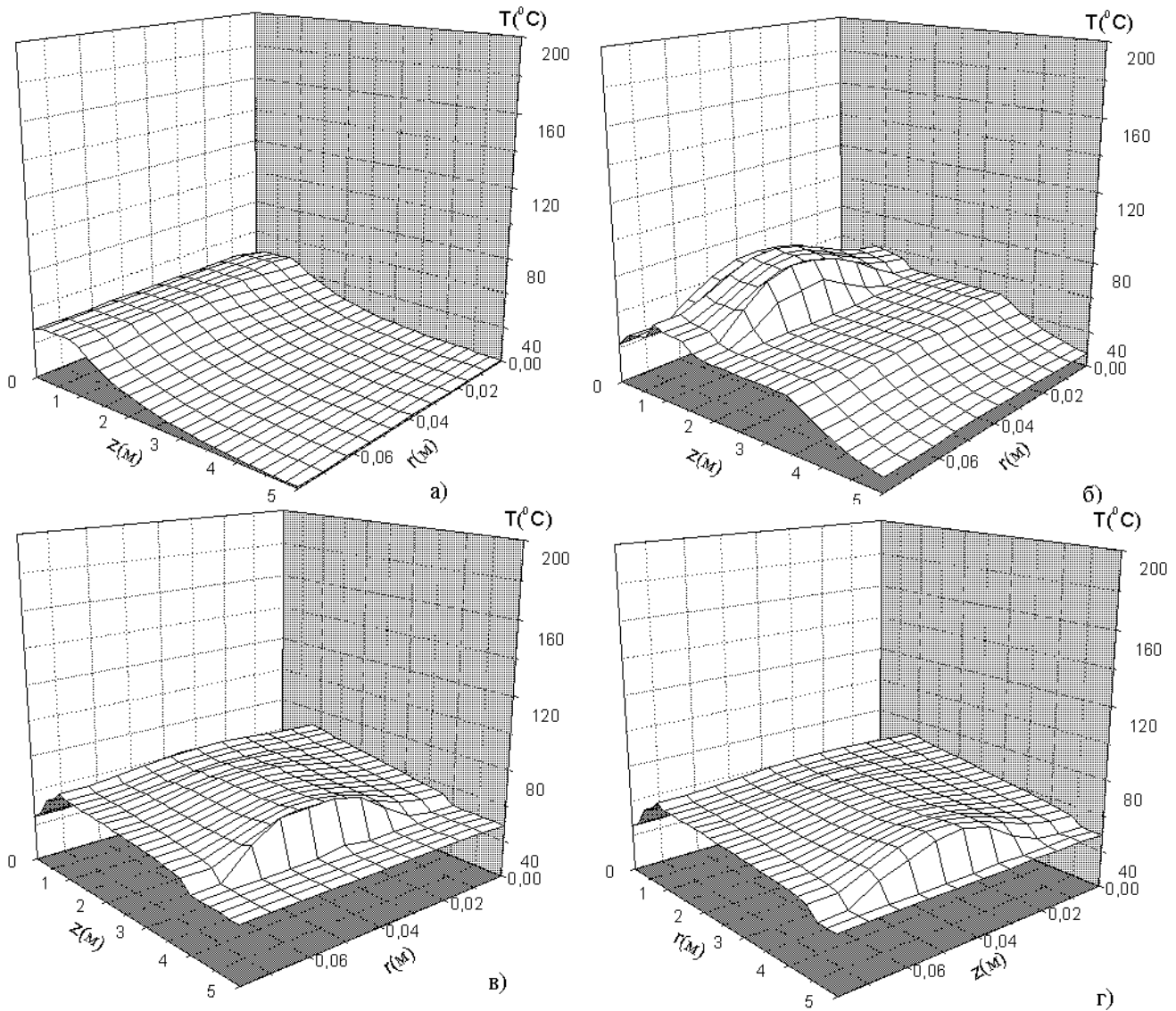


Рис. 14. Профиль температуры для различных моментов времени (Рис. 14а –  $t = 15$  мин. Рис. 14б –  $t = 1$  час 15 мин. Рис. 14в –  $t = 2$  часа 15 мин. Рис. 14г –  $t = 2$  часа 30 мин.) в процессе ликвидации парафиновой пробки "электромагнитным кротом" на участке нефтепровода длиной  $H = 5$  м. Радиус трубопровода  $R = 0.0775$  м. Мощность источника электромагнитного излучения  $P = 5$  кВт, частота  $f = 2$  ГГц.

проводимостью  $\sigma = 0.37 \cdot 10^{17}$  сек $^{-1}$ . Длина парафиновой пробки выбрана, равной  $H = 5$  м.

На рис. 10 приведен график зависимости мнимой части продольного волнового числа  $k_z''$  от частоты для приведенных выше параметров цилиндрического волновода и парафиновой пробки. Здесь и далее в численных расчетах мы ограничиваемся рассмотрением основной волны  $E_{01}$ . Частота отсечки волны  $E_{01}$  для рассматриваемого цилиндрического волновода равна  $f_0 \approx 0.97$  ГГц. Мнимая часть продольного волнового числа имеет минимум  $k_{z\ min}'' \approx 0.37$  м $^{-1}$  на частоте  $f \approx 1.38$  ГГц и растет при дальнейшем увеличении частоты. Хотя для предлагаемого нами способа ликвидации парафиновых пробок с помощью движущегося источника электромагнитного излучения не имеет определяю-

щего значения величина длины проникновения ВЧ мощности вглубь пробки, все-таки ее следует выбирать по возможности больше. Слишком малая величина проникновения ВЧ мощности в пробку будет усложнять возможность контроля за передвижением источника электромагнитного излучения.

Процесс перехода твердой фазы парафина в жидкую существенным образом определяется распределением плотности мощности объемного тепловыделения  $Q(r, z)$ . На рис. 11 приведены распределения  $Q(r, z = 0)$ , нормированные на мощность источника, в поперечном сечении волновода для различных частот при неподвижном источнике. В минимуме коэффициента затухания (и для низких частот (см. рис. 10)) главную роль в распределении плотности мощности  $Q$  играет продольная компо-

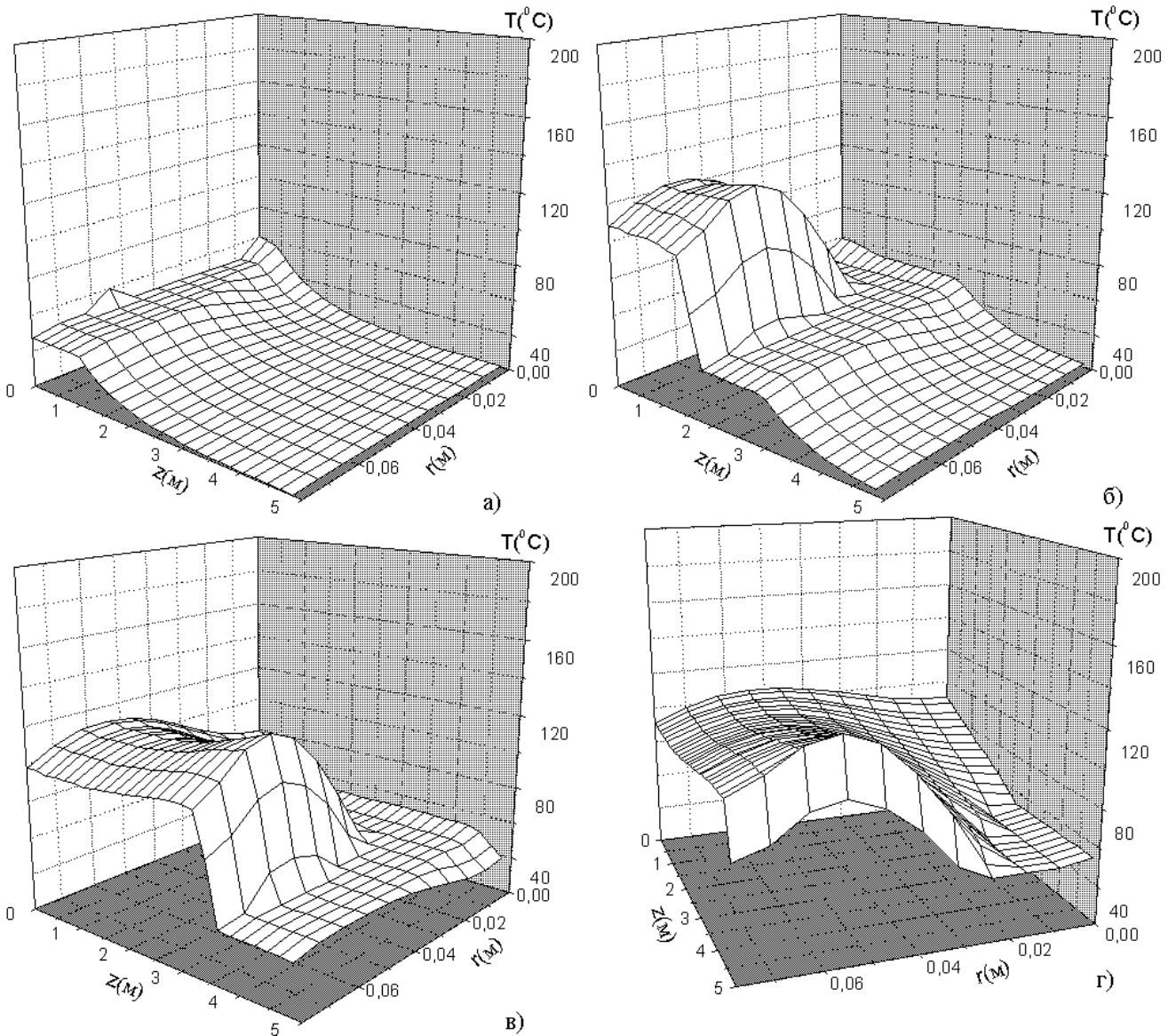


Рис. 15. Профиль температуры для различных моментов времени (Рис. 15а –  $t = 15$  мин. Рис. 15б –  $t = 1$  час 15 мин. Рис. 15в –  $t = 2$  часа 15 мин. Рис. 15г –  $t = 3$  часа 15 мин.) в процессе ликвидации парафиновой пробки "электромагнитным кротом" на участке нефтепровода длиной  $H = 5$  м. Радиус трубопровода  $R = 0.0775$  м. Мощность источника электромагнитного излучения  $P = 5$  кВт, частота  $f = 3$  ГГц.

нента электрического поля волны  $E_{01}$  с максимумом на оси цилиндрического волновода (рис. 11 кривая 1). С увеличением частоты растет поперечная компонента электрического поля. На частоте  $f = 2$  ГГц продольная и поперечная компоненты электрического поля сравнимы по величине (рис. 11 кривая 2). Для более высоких частот в распределении плотности мощности тепловыделения преобладающей становится поперечная компонента электрического поля  $E_{01}$  с максимумом ближе к стенкам волновода (рис. 11 кривая 1 –  $f = 3$  ГГц, рис. 11 кривая 4 –  $f = 4$  ГГц). Наиболее однородное в поперечном сечении распределение плотности мощности тепловыделения обеспечивает волна с частотой  $f = 2$  ГГц. Хотя в максимуме

плотность мощности  $Q(r, z = 0)$  для такого случая меньше остальных, приведенных на рис. 11 вариантов, именно  $E_{01}$ -волна с частотой 2 ГГц наиболее предпочтительна для ликвидации парафиновой пробки. Разогрев будет более однородным и расплавление парафина, по-видимому, должно происходить практически одновременно по всему поперечному сечению диэлектрической пробки. Вследствие этого не будет сильного перегрева отдельных слоев нефти и снижения эффективности ликвидации парафиновой пробки. В продольном направлении плотность мощности тепловыделения падает по экспоненциальному закону. С ростом частоты скорость спада в продольном направлении увеличивается в соответствии с зависимостью, приве-

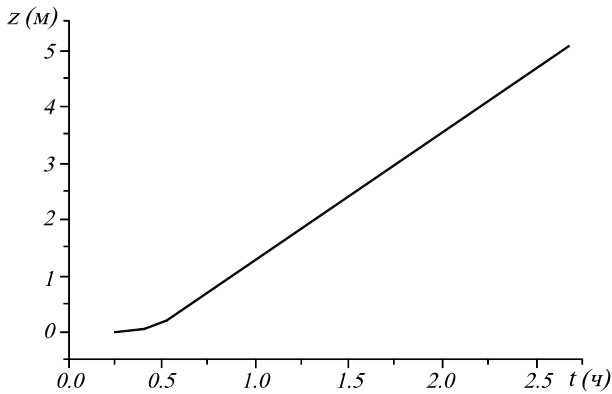


Рис. 16. Положение "электромагнитного крота" вдоль трубы нефтепровода, отсчитывающееся от начального положения как функция времени.

денной на рис. 10. В качестве примера на рис. 12 представлено распределение  $Q(r, z)$  для неподвижного источника  $z_0(t) = 0$  мощностью  $P = 5$  кВт. Частота электромагнитного излучения  $f = 2$  ГГц.

Результаты численного моделирования процесса ликвидации парафиновой пробки "электромагнитным кротом" приведены на рис. 13 (частота электромагнитного излучения  $f = 1.4$  ГГц), рис. 14 (частота электромагнитного излучения  $f = 2$  ГГц) и рис. 15 (частота электромагнитного излучения  $f = 3$  ГГц) для различных моментов времени. Мощность источника излучения для всех случаев выбрана  $P = 5$  кВт. Как и следовало ожидать, процесс расплавления парафиновой пробки сильно зависит от топографии плотности мощности тепловыделения (см. рис. 11 и рис. 12). В начальный период времени в области, примыкающей к источнику электромагнитного излучения, на поверхности температуры образуется плато наиболее широкое для частоты  $f = 2$  ГГц, что связано с максимальной однородной плотностью мощности тепловыделения по сечению пробки на этой частоте. Локализация области первоначального проплавления однозначно определяется максимумом плотности мощности тепловыделения  $Q(r, z)$ . Для низких частот ( $f = 1.4$  ГГц) проплавление парафиновой пробки идет от центра диэлектрической пробки, для высоких частот ( $f \geq 3$  ГГц) место первоначального проплавления расположено ближе к стенке трубы. Для частоты  $f = 2$  ГГц расплав парафиновой пробки идет приблизительно от середины радиуса диэлектрического цилиндра. Следует отметить, что для этого случая распределение температуры нефти и парафина по поперечному сечению оказывается наиболее однородным. Максимальная температура расплавленного парафинового образования и нефти не превосходит  $75$  °С, в то время как для частоты  $f = 1.4$  ГГц она приближается к  $175$  °С, а для  $f = 3$  ГГц максимальная температура  $T \simeq 120$  °С. Время ликвидации пара-

финовой пробки длиной  $H = 5$  м в исследованном диапазоне  $1 \div 5$  ГГц не сильно зависит от частоты волны. Так для  $f = 1.4$  ГГц это время составляет 3 часа, для  $f = 2$  ГГц оно минимально и составляет 2.5 часа, для  $f = 3$  ГГц время ликвидации парафиновой пробки равно 3.25 часа.

При дальнейшем увеличении частоты излучения время проплавления диэлектрической пробки будет расти. Это объясняется тем, что в приосевой области ( $r = 0$ ) с ростом частоты плотность мощности тепловыделения убывает как  $1/f$ . Соответственно, возрастание время полного проплавления парафиновой пробки.

На рис. 16 приведено положение источника электромагнитного излучения вдоль трубы нефтепровода, отсчитанное от начального положения. Мощность источника излучения  $P = 5$  кВт, его рабочая частота  $f = 1.4$  ГГц. Первое время  $t < 0.5$  часа "электромагнитный крот" остается неподвижным, пока не проплавится в поперечном сечении первый слой. Затем скорость "крота" возрастает и через 1.5 часа она выходит на постоянное значение.

Сделаем оценку эффективности рассмотренного способа ликвидации парафиновой пробки с помощью передвижного источника электромагнитного излучения. Определим эффективность работы "электромагнитного крота" как отношение полезной работы к затраченной. Под полезной будем понимать работу затраченную на нагрев парафиновой пробки до температуры плавления и дальнейший ее переход в жидкую фазу. Затраченная работа – энергия, излученная источником электромагнитного излучения в нефтепровод. Для источника электромагнитного излучения с частотой  $f = 2$  ГГц и параметров диэлектрической пробки, приведенных выше, эффективность составляет  $\approx 70$  %.

### 3.2. ВЧ метод очистки внутренней поверхности нефтепроводов от тонких парафиновых отложений

#### 3.2.1. Вводная часть и постановка задачи

В рассмотренном выше методе устранения парафиновых пробок ВЧ излучением рассмотрена ситуация, когда парафиновая пробка полностью заполняет внутреннее пространство оборудования скважины или участка магистрального нефтепровода. Процесс ликвидации такой пробки занимает довольно продолжительное время и поэтому сопряжен с дополнительными техническими проблемами, связанными с надежностью работы мощного ВЧ источника. Кроме этого он требует относительно больших энергозатрат. Очевидно, что более рационально начинать разрушение парафиновой пробки на ранней стадии ее образования, когда она еще не закупоривает нефтепровод. Воздей-

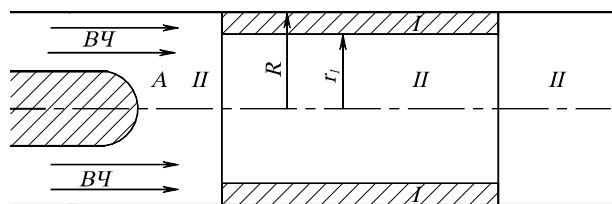


Рис. 17. Постановка задачи: I – слой парафина, II – область в начальный момент, занятая нефтью, A – движущееся излучающее устройство.

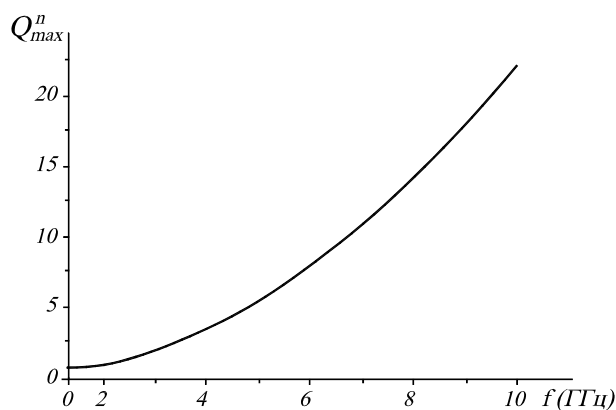


Рис. 18. Максимум мощности объемного тепловыделения, нормированный на мощность источника электромагнитного излучения, где  $Q_{max}^n = Q_{max}/(10^6 P)$ .

ствуюя мощным электромагнитным излучением на тонкие парафиновые отложения на внутренней поверхности нефтепровода, можно более эффективно предотвращать нефтепроводы от их закупоривания парафиновыми отложениями.

В настоящем разделе представлены результаты теоретических исследований и численного моделирования процесса разрушения тонких парафиновых отложений на внутренней поверхности нефтепровода под воздействием мощных микроволн, излучающих движущимся ВЧ источником.

Геометрия рассматриваемой системы изображена на рис. 17. В поперечном сечении парафиновые отложения занимают область  $R > r > r_1$ , продольная длина отложений  $H$ . В оставшейся области находится нефть.

Процесс нагрева и последующего расплавления парафинового слоя будем описывать уравнение теплопроводности (7) с движущимся тепловым источником (18). Граничные условия к уравнению теплопроводности имеют вид (9), (10), (23).

### 3.2.2. Результаты численных расчетов процесса устранения тонких парафиновых отложений в нефтепроводе

При численном моделировании процесса устранения тонких парафиновых отложений использо-

Таблица 2. Времена устранения парафиновой пленки длиной 5 м в нефтяной трубе для мощности 2 кВт в зависимости от частоты электромагнитного излучения, радиуса начального объема, занимаемого нефтью, и начальной температуры нефти.

начальный радиус нефти $r_1$	частота излучения	Время полного проплава пробки		
		начальная температура нефти – $T_0$ °C		
		20	40	50
0.03875	1.4 ГГц	9.277	8.760	8.410
	2 ГГц	7.120	6.745	6.530
	3 ГГц	5.835	5.545	5.385
	4 ГГц	5.350	5.090	4.945
	5 ГГц	5.010	4.855	4.710
	6 ГГц	4.945	4.715	4.575
	7 ГГц	4.830	4.615	4.475
	8 ГГц	4.775	4.540	4.415
	9 ГГц	4.735	4.485	4.360
	10 ГГц	4.700	4.450	4.371
	20 ГГц	4.520	4.285	4.130
	40 ГГц	4.330	4.175	4.190
	60 ГГц	4.155	4.135	4.205
80 ГГц	4.015	4.190	4.320	
0.051667	1.4 ГГц	8.435	7.7445	7.375
	2 ГГц	6.775	6.235	5.960
	3 ГГц	5.775	5.365	5.155
	4 ГГц	5.335	4.985	4.810
	5 ГГц	5.090	4.770	4.620
	6 ГГц	4.945	4.635	4.490
	7 ГГц	4.830	4.550	4.400
	8 ГГц	4.760	4.475	4.335
	9 ГГц	4.680	4.420	4.285
	10 ГГц	4.665	4.380	4.250
	20 ГГц	4.375	4.165	4.080
	40 ГГц	3.940	3.955	3.970
	60 ГГц	3.775	3.765	3.925
80 ГГц	3.410	3.745	3.885	
0.058125	1.4 ГГц	7.525	6.725	6.290
	2 ГГц	6.150	5.500	5.155
	3 ГГц	5.420	4.900	4.625
	4 ГГц	5.135	4.680	4.500
	5 ГГц	4.975	4.570	4.365
	6 ГГц	4.870	4.500	4.310
	7 ГГц	4.795	4.445	4.270
	8 ГГц	4.740	4.400	4.235
	9 ГГц	4.665	4.365	4.205
	10 ГГц	4.655	4.325	4.175
	20 ГГц	4.385	4.140	4.030
	40 ГГц	3.880	3.880	3.915
	60 ГГц	3.650	3.715	3.880
80 ГГц	3.115	3.640	3.905	

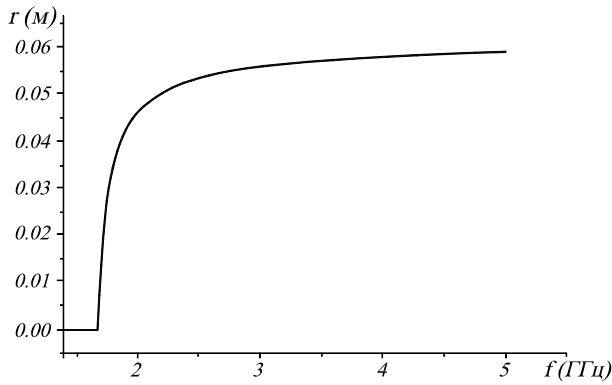


Рис. 19. Положение точки максимума мощности объемного тепловыделения.

вались физические параметры парафина и нефти, приведенные в разделе 2.2. Расчеты проводились для модельного нефтепровода радиуса  $R = 0.0775$  м, длина парафиновой пробки 5 м.

Эффективность устранения тонких парафиновых отложений в нефтепроводе существенно зависит от распределения по поперечному сечению нефтепровода плотности мощности тепловыделения  $Q$ . Как показано в предыдущем разделе (см. рис. 11), при достаточно высоких частотах  $f \geq 2$  ГГц с увеличением частоты максимальное значение функции  $Q(r)$  растет по величине, а положение самого максимума смещается к стенке нефтепровода. Учет этого фактора особенно необходим в рассматриваемой случае тонких парафиновых отложений.

На рис. 18 показана зависимость максимального значения плотности мощности тепловыделения, нормированного на ВЧ мощность, от частоты излучения. С увеличением частоты до 5 ГГц максимальное значение функции  $Q(r, z = 0)/P$  возросло в 9 раз.

В области высоких частот максимальное значение функции тепловыделения  $Q$  с увеличением частоты растет, примерно, по линейному закону, что непосредственно следует из выражения (22).

На рис. 19 изображена зависимость положения максимума функции тепловыделения от частоты. Для низких частот  $f < 1.4$  ГГц, близких к частоте отсечки волновода, максимум расположен на оси трубы. При  $f \geq 3$  ГГц положение максимума выходит на постоянное значение. Такую зависимость положения максимума функции тепловыделения  $Q$  легко объяснить, исходя из явного выражения (22) для нее. При низких частотах тепловыделение определяется продольной компонентой поля, а при высоких частотах – радиальной компонентой электрического поля (второе слагаемое в (22)). В последнем случае положение максимума функции тепловыделения совпадает с первым максимумом функции Бесселя  $J_1(2.405r/R)$  и равно  $r_{max} \approx 0.77R$ .

Таблица 3. Времена устранения парафиновой пленки длиной 5 м в нефтяной трубе для мощности 5 кВт в зависимости от частоты электромагнитного излучения, радиуса начального объема, занимаемого нефтью, и начальной температуры нефти.

начальный радиус нефти $r_1$	частота излучения	Время полного проплава пробки		
		начальная температура нефти – $T_0$ °С		
		20	40	50
0.03875	1.4 ГГц	4.00	3.75	3.75
	2 ГГц	2.875	2.75	2.625
	3 ГГц	2.125	2.125	2.125
	4 ГГц	2.125	2.00	2.00
	5 ГГц	1.875	1.875	1.75
	6 ГГц	1.875	1.875	1.75
	7 ГГц	1.875	1.75	1.75
	8 ГГц	1.875	1.75	1.75
	9 ГГц	1.75	1.675	1.675
	10 ГГц	1.75	1.675	1.675
	20 ГГц	1.75	1.675	1.675
	40 ГГц	1.675	1.675	1.675
	60 ГГц	1.50	1.675	1.675
80 ГГц	1.50	1.50	1.75	
0.051667	1.4 ГГц	3.75	3.50	3.375
	2 ГГц	2.75	2.675	2.50
	3 ГГц	2.25	2.125	2.00
	4 ГГц	2.125	2.00	1.875
	5 ГГц	1.875	1.75	1.75
	6 ГГц	1.875	1.875	1.75
	7 ГГц	1.75	1.75	1.675
	8 ГГц	1.75	1.75	1.75
	9 ГГц	1.75	1.75	1.675
	10 ГГц	1.75	1.75	1.675
	20 ГГц	1.675	1.675	1.675
	40 ГГц	1.675	1.675	1.675
	60 ГГц	1.375	1.50	1.50
80 ГГц	1.375	1.375	1.50	
0.058125	1.4 ГГц	3.50	3.125	3.00
	2 ГГц	2.625	2.375	2.25
	3 ГГц	2.125	2.375	2.00
	4 ГГц	2.00	1.875	1.75
	5 ГГц	2.00	1.75	1.75
	6 ГГц	1.875	1.75	1.625
	7 ГГц	1.875	1.75	1.75
	8 ГГц	1.75	1.675	1.675
	9 ГГц	1.875	1.75	1.675
	10 ГГц	1.675	1.675	1.50
	20 ГГц	1.675	1.675	1.50
	40 ГГц	1.50	1.50	1.50
	60 ГГц	1.25	1.375	1.50
80 ГГц	1.25	1.375	1.50	

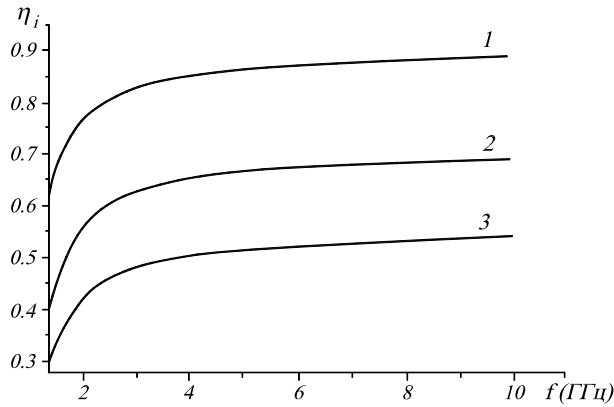


Рис. 20. Отношение  $\eta_i = \frac{\int_0^{r_1} Q(r, z=0) r dr}{\int_0^R Q(r, z=0) r dr}$ , где  $i = 1$

соответствует  $r_1 = 0.03875$  м,  $i = 2 - r_1 = 0.0517$  м,  $i = 3 - r_1 = 0.058$  м.

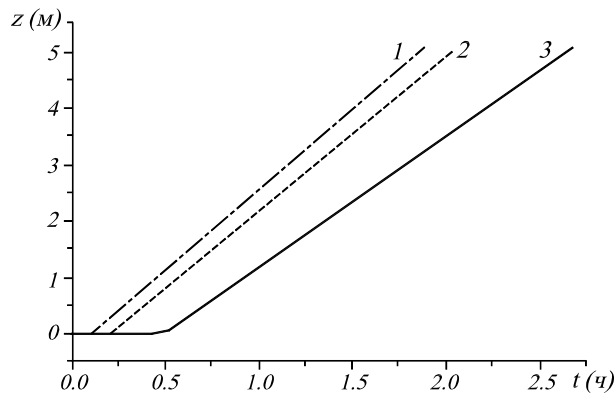


Рис. 21. Положение "электромагнитного крота" вдоль трубы нефтепровода, отсчитывающееся от начального положения, в различные моменты времени. Толщина парафиновой пленки 0.058 м, мощность источника 5 кВт, частота: 1 – 2 ГГц, 2 – 4 ГГц, 3 – 6 ГГц.

Представляет интерес исследовать соотношение между мощностью тепловыделения в парафиновом слое и мощностью тепловыделения по всему сечению нефтепровода для различной толщины пленки и частот. На рис. 20 показана зависимость отношения мощности тепловыделения в парафиновом слое к мощности тепловыделения по всему сечению трубы для различной толщины слоя как функция частоты. Как видно из этих рисунков, отношение указанных мощностей в области высоких частот слабо зависит от частоты. Это указывает на то, что эффективность ликвидации парафиновых отложений в этом диапазоне частот будет также слабо зависеть от частоты ВЧ излучения, что получило подтверждение результатами численного моделирования начально-краевой задачи (7)–(10), (22), (23).

Сводные данные по временам ликвидации парафиновой пленки для мощностей излучения  $P = 2$  кВт, 5 кВт и различных толщин пленки приведены в таблицах 2, 3. При этом мы предполагали, что начальная температура нефти однородна по всему занимаемому объему. В парафиновом слое поперечное распределение начальной температуры выбиралось из следующих соображений:

- на внутренней поверхности парафина она равна начальной температуре нефти;
- на внешней поверхности она равна температуре окружающей среды  $T_0 = 20$  °С;
- во внутренних точках парафинового слоя температура интерполируется по линейному закону.

Из приведенных таблиц 2,3 следует, что с увеличением мощности ВЧ источника зависимость времени очистки нефтепровода от начальной толщины парафинового слоя ослабляется. Это связано с тем, что при низких уровнях мощностей ВЧ излучения сильно сказываются потери в окружающую среду. Поэтому доля ВЧ мощности, затрачиваемая на плавление парафиновой пленки сравнительно невысока. Вследствие этого время плавления пленки существенно зависит от ее толщины. Для более высоких уровней мощностей ВЧ излучения влияние потерь тепла через боковую поверхность нефтепровода существенно ослабляется, соответственно, становятся более слабой зависимость времени устранения парафинового отложения от начальной толщины пленки, поскольку плотность мощности тепловыделения в рассмотренных нами случаях практически однородна по сечению парафинового слоя.

На рис. 21 изображена зависимость координаты местоположения "электромагнитного крота" от времени для ВЧ источника с мощностью 5 кВт и различных частот. Видно, что движение "крота" начинается с некоторого момента времени, необходимого на расплавление начального участка парафинового слоя. Затем ВЧ источник перемещается с постоянной скоростью. С ростом частоты скорость "крота" увеличивается, хотя и не значительно.

Отметим, что устранение парафиновых отложений на значительно более длинных участках нефтепровода движущимся источником микроволнового излучения будет происходить за большие времена, однако качественная картина процесса при этом сохраняется.

#### 4. Заключение

В работе исследованы процессы нагрева и расплавления парафиновых пробок в стволах нефтяных скважин и нефтепроводах мощным электро-

магнитным 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 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). 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 электромаг-

нитные 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 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, времени 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.

Поступила в редакцию 22 января 2001 года

## Список литературы

- [1] 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.
- [2] Ф.Л. Саяхов, М.А. Фатыхов, Н.Ш. Имашев Способ электродепарафинизации скважин // Открытия. Изобретения. – 1987. – N 20. – А.с. 1314756 СССР.
- [3] А.Т. Ахметов, А.И. Дьячук, А.А. Кислицын и др. Способ ликвидации ледяных, газогидратных и парафиновых пробок в выкидных линиях скважин и трубопроводах // Открытия. Изобретения. – 1992. – N 3. – А. с. 1707190 СССР.
- [4] Solution of Paraffin Deposition Problems in Oil Wells by Utilization of the Radio-Frequency

- Single Well Stimulation process / Homer L. Spencer, Gr. Calgary. – 1987.
- [5] Кислицын А.А. Численное моделирование высокочастотного электромагнитного прогрева диэлектрической пробки, заполняющей трубу // ПМТФ – 1996. – Т. 37, N 3. – С. 75–82.
- [6] 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. Севастопаль, Украина. Труды конференции. – С. 422–424.
- [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. – N 5. – С. 53–56.
- [8] Чистяков С.И., Саяхов Ф.Л., Бондаренко Л.Н. Экспериментальное исследование диэлектрических свойств безводных и обводненных нефтей в диапазоне частот 1000–3600 МГц // Нефтяное хозяйство – 1969. – N 11. – С. 51–63.
- [9] Вайштейн Л.А. Электромагнитные волны – М.: Радио связь – 1988. – 440 с.
- [10] Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1965. – Т. 5, N 5. – С. 816–827.