

На правах рукописи

**Фатыхов Ленарт Миннеханович**

**РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО  
МЕТОДА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА АСФАЛЬТОСМОЛОПАРАФИНОВЫЕ  
ОТЛОЖЕНИЯ В НЕФТЯНЫХ СКВАЖИНАХ**

Специальность 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков  
полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Пермь 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ) Министерства образования и науки Российской Федерации, г. Пермь.

Научный руководитель: **Галкин Сергей Владиславович**  
доктор геолого-минералогических наук,  
профессор

Официальные оппоненты: **Назаров Василий Федорович**  
доктор технических наук, профессор кафедры  
геофизики Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего  
образования "Башкирский государственный  
университет", доцент (г.Уфа)

**Шумилов Александр Владимирович**  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
геофизики ФГБОУ ВО «Пермский государственный  
национальный исследовательский университет»

Ведущая организация: ООО «ПИТЦ «Геофизика» (г. Пермь)

Защита состоится «20» декабря 2018 года в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 999.207.02 на базе ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева15, зал заседаний Учёного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева15.

Электронная версия текста диссертации доступна на сайте ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»: [www.psu.ru](http://www.psu.ru).

Электронная версия автореферата размещена на официальном сайте ВАК при Министерстве образования и науки РФ: [vak.ed.gov.ru/vak](http://vak.ed.gov.ru/vak) и на сайте ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»: [www.psu.ru](http://www.psu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Тел. (342) 239-62-89, факс: (342) 239-68-32;  
Ученый секретарь, к.т.н.

e-mail: [olgam.psu@gmail.com](mailto:olgam.psu@gmail.com)  
Мещерякова Ольга Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследований.** 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 асфальтосмолопарафинистых веществ (АСПВ), месторождения с низкопроницаемыми терригенными и карбонатными коллекторами и т.п.

В процессе нефтеизвлечения изменяются естественные термобарические условия залежей, что приводит к отложению асфальтосмолопарафинистых веществ на стенках скважин и подъёмных труб, в насосном оборудовании и наземных коммуникациях. Без проведения работ по предупреждению и удалению АСПВ в этих системах нельзя оптимизировать вопросы добычи, транспорта и сбора нефти. Для предотвращения отложений асфальтосмолопарафинистых веществ применяются обработки химическими реагентами (ингибиторами, деэмульгаторами и др.), магнитными и акустическими полями. Широкое применение находят тепловые методы удаления асфальтосмолопарафинистых веществ, в частности, закачка горячей нефти или реагентов-растворителей, при взаимодействии с которыми протекают экзотермические реакции.

Результаты исследований, проведённых 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 её поляризации.

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

Таким образом, актуальность темы диссертации обусловлена её направленностью на повышение эффективности эксплуатации фонда скважин с применением ВЧ и СВЧ ЭМ метода для предупреждения и удаления асфальтосмолопарафиновых отложений.

**Соответствие паспорту специальности.** Тема и содержание диссертационной работы соответствуют формуле специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых –

«Технические средства», «Измерительная техника, средства, технологии; геофизические излучающие и измерительные системы»

**Целью работы** является разработка теплофизических основ высокочастотного электромагнитного метода борьбы с асфальтосмолопарафиновыми отложениями в нефтяных скважинах.

#### **Основные задачи исследований**

1. Экспериментальные исследования влияния электромагнитного поля на интенсивность образования асфальтосмолопарафиновых отложений;
2. Создание физических основ и методики определения коэффициента стоячей ЭМ волны в нефтедобывающих скважинах с учётом взаимодействия источника ЭМ энергии и скважины;
3. Обоснование условий эффективного применения электромагнитного метода для удаления асфальтосмолопарафиновых отложений из скважин.

#### **Научная новизна**

1. Разработана математическая модель, описывающая процессы электро- и теплопереноса в парафиновой пробке, образующейся в нефтедобывающих скважинах, обрабатываемых ЭМ излучением.
2. Разработана методика расчёта коэффициента стоячей электромагнитной волны для осложнённых выпадением асфальтосмолопарафиновыми отложениями зон в нефтедобывающих скважинах с электрическими потерями.
3. Выявлены основные параметры электромагнитного воздействия, позволяющие предупредить образование асфальтосмолопарафиновых отложений и влияющие на эффективность плавления пробки парафина перемещающимся источником излучения.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость работы заключается в разработке математической модели, описывающей процессы электро- и теплопереноса в парафиновой пробке, образующейся в нефтедобывающих скважинах, методики расчёта коэффициента стоячей электромагнитной волны для осложнённых выпадением асфальтосмолопарафиновых отложений зон нефтедобывающих скважин.

1. Предложен способ повышения эффективности работы нефтедобывающих скважин методом анализа эффектов многократного отражения электромагнитных волн от границ разделов, образующихся в нефтедобывающих скважинах вследствие плавления (разрушения) многофазных сред, и оценки коэффициента стоячей электромагнитной волны в скважинах.

2. Разработана программа расчёта температурных полей в парафиновой пробке, заполняющей насосно-компрессорные трубы (НКТ) и взаимодействующей с движущимся СВЧ излучением.

3. Результаты исследований использованы в учебной деятельности на практических занятиях по дисциплине «Термодинамика сред в электромагнитном поле» магистрантами ФГБОУ ВО «БГПУ им. М. Акмуллы» по направлению подготовки 44.04.01 Педагогическое образование по программе «Физическое образование».

**Методология и методы исследований.** Поставленные в диссертационной работе задачи решались на основе экспериментальных и аналитических

исследований с использованием апробированных методик. Для обработки результатов применялись современные математические методы и вычислительная техника.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты исследований влияния электрофизических свойств скважины и пласта на энергетическую эффективность электромагнитного метода плавления асфальтосмолопарафиновых отложений;

2. Методика определения коэффициента стоячей электромагнитной волны в нефтескважинах с учётом взаимодействия источника электромагнитной энергии и скважины;

3. Тепло- и электрофизические параметры, влияющие на особенности плавления пробки парафина движущимся источником сверхвысокочастотного электромагнитного излучения.

**Апробация работы и публикации.** Достоверность и обоснованность подходов подтверждается сравнением фактических значений температуры вдоль скважины, полученных при добыче битумных и высокопарафинистых нефтей ВЧ электромагнитным методом, и на моделях скважины, заполненной парафином, а также в основу математических моделей положены фундаментальные законы сохранения массы, движения и энергии, корректностью использования математического аппарата.

Результаты работы докладывались и обсуждались на: IV научно-технической конференции молодых специалистов ООО РН-УфаНИПИнефть (г. Уфа, 2010); международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы технических, естественных и гуманитарных наук» (г. Уфа, 2010); VI Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике» (г. Москва, 2011); III Международной научно-практической конференции молодых учёных, посвящённой году химии «Актуальные проблемы науки и техники» (г. Уфа, 2011); XIV Минском международном форуме по тепломассообмену (г. Минск, 2012); Международной научно-технической конференции «Синергетика – III» (г. Уфа, 2012); Международной школе-конференции, для студентов, аспирантов и молодых учёных «Фундаментальная математика и её приложения в естествознании» (г. Уфа, 2012); Всероссийской научной конференции «Инновационный потенциал молодёжной науки» (г. Уфа, 2012); II Международной научно-практической конференции «Приоритетные направления развития науки и образования» (г. Чебоксары, 2014); Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в нефтегазовом комплексе» (г. Уфа, 2014); Международной научно-практической конференции «Фундаментальные проблемы науки» (г. Тюмень, 2016); Международной научно-практической конференции «Роль инновации в трансформации современной науки» (г. Уфа, 2017).

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 25 работах, в том числе 9 – в научных журналах, включенных в перечень изданий ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы, включающего

154 наименования, и одного приложения. Работа изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 56 рисунков и 8 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и основные задачи исследований, основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** рассмотрена проблема отложения АСПВ в нефтепромысловом оборудовании и методы её решения. Выбор оптимальных способов борьбы с АСПО зависит от многих факторов, в частности, от способов эксплуатации скважин, термобарических условий в её стволе, состава и свойств добываемой продукции. Воздействуя на эти факторы, можно управлять структурообразованием АСПВ в добываемой жидкости. Одним из приёмов, позволяющих воздействовать на АСПО, является использование энергии ВЧ и СВЧ ЭМ излучения.

Анализ показывает, что диэлькометрический метод, основанный на особенностях взаимодействия ВЧ ЭМП малой мощности с неоднородными средами, является информативным методом определения условий выпадения АСПВ в нефтях. Проведены экспериментальные исследования влияния частоты электромагнитных колебаний в диапазоне 30 – 300 МГц и температуры в диапазоне 25 – 80 °С методом куметра (рис. 1 – 3) на величины тангенсов угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  нефти с добавлением песка и парафина.

Зависимость  $\text{tg}\delta$  исследованных сред от частоты электромагнитных колебаний подчиняется закономерностям, характерным для полярных жидкостей. Так как в измерительной ячейке поддерживалась одинаковая масса, для нефти с песком  $\text{tg}\delta$  зависит от количества песка – чем больше масса песка, тем меньше  $\text{tg}\delta$  смеси.

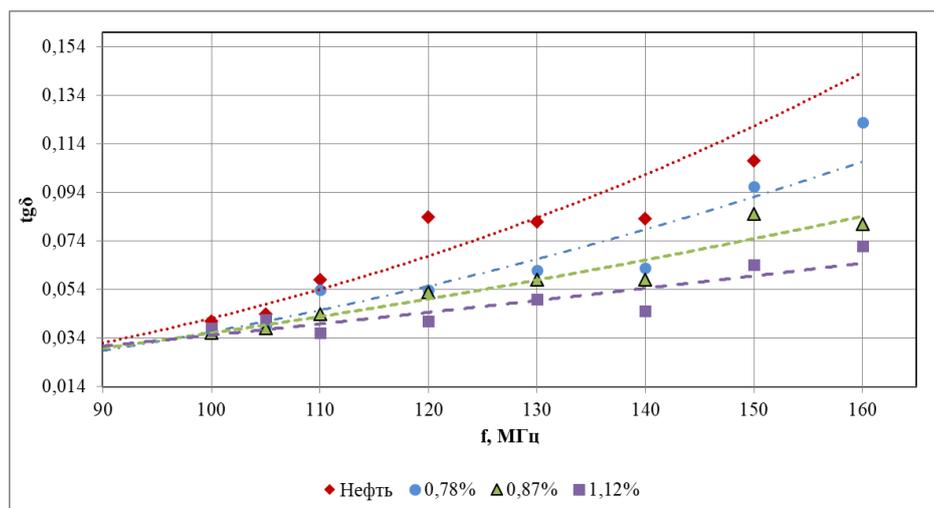


Рис. 1. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь смесей нефти с песком

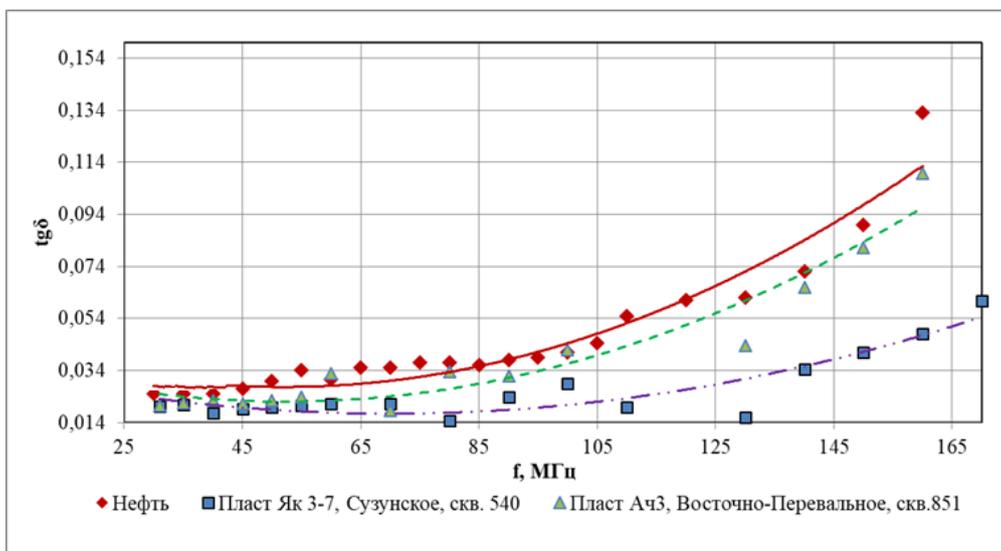


Рис. 2. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь нефти и образцов АСПО от частоты электромагнитных колебаний парафина

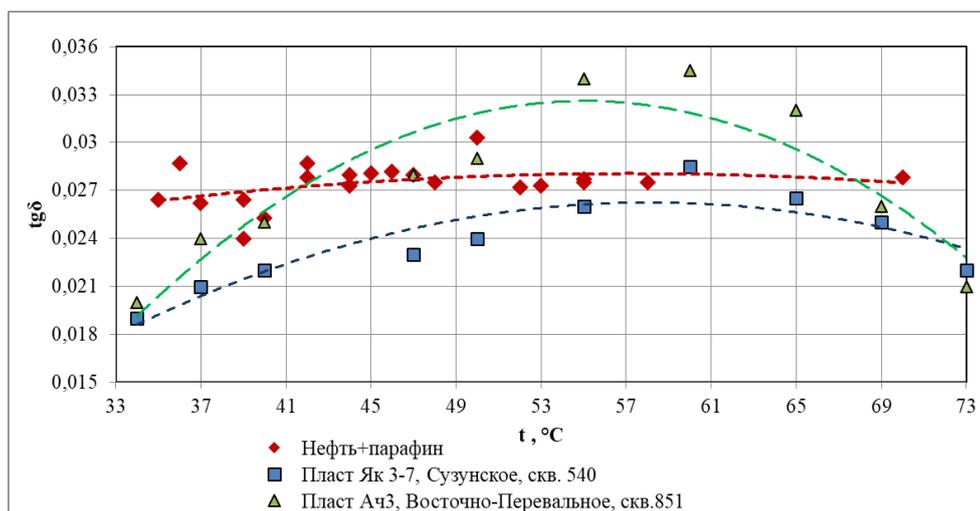


Рис. 3. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь нефти с дополнительным содержанием парафина (АСПО) на частоте 35 МГц

Аппроксимировав данные, представленные на рисунке 3, можно установить температуру кристаллизации парафина по значению экстремума  $tg\delta$ . Например, для нефти с добавлением парафина, равна  $53 \pm 1$  °С, пласта Як 3-7 -  $58 \pm 1$  °С, пласта Ач3 -  $56 \pm 1$  °С. Более того, с ростом температуры увеличивается  $tg\delta$  сред. Эту закономерность можно использовать для контроля роста кристаллов парафина (АСПО), а, следовательно, предотвращения образования отложений.

Образование АСПО обусловлено, в частности, добычей водонефтяных эмульсий. Одним из успешных методов их разрушения является СВЧ ЭМП. Выбор диапазона воздействия обуславливается тем, что в СВЧ ЭМП основная энергия поглощается в глобулах воды, покрытых бронирующей оболочкой. В результате в них возникают объёмные источники тепла, приводящие к интенсивному нагреву и разрушению оболочки.

В СВЧ диапазоне дисперсия обусловлена поляризацией молекул воды. Для исследования эволюции микроструктуры водонефтяной эмульсии 15 %-ной

концентрации производился их визуальный анализ по фотографиям, сделанным при помощи оптического микроскопа модели Axio Imager A2 фирмы Carl Zeiss (Карл Цейс).

На рисунке 4 представлены зависимости изменения диаметров глобул воды.

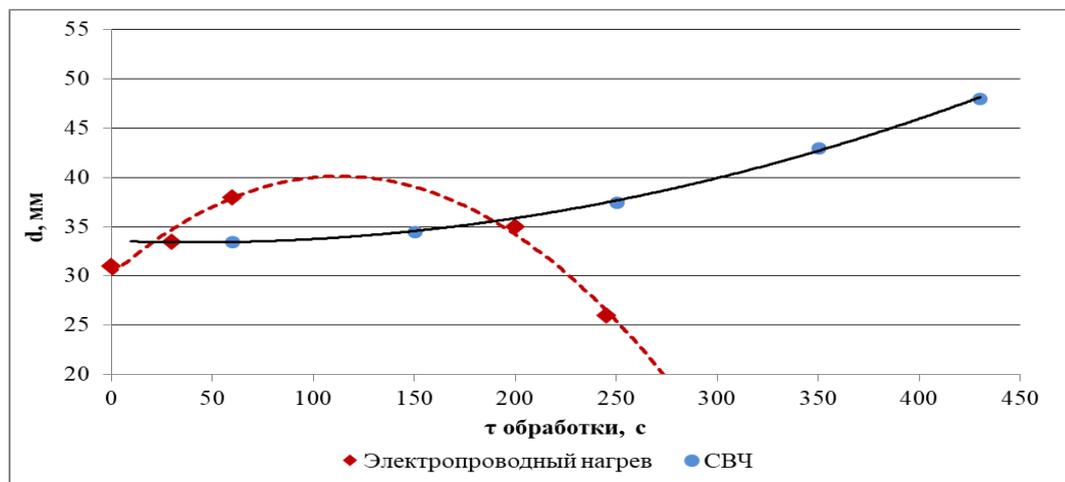


Рис. 4. Зависимость среднего диаметра глобул воды от времени обработки при СВЧ излучении и электронагреве

Из представленных данных видно, что при электронагреве глобулы воды сначала растут, затем лопаются на мелкие глобулы. Присутствующая в нефти в растворённом или мелкодисперсном состоянии вода под действием ЭМП объединяется в глобулы. В условиях скважины эта вода может улучшить гидрофильность поверхности промышленного оборудования, препятствуя отложения на нем АСПВ.

Методом атомно-силовой микроскопии установлен эффект выброса расплавленной массы из объемных слоев парафина, подвергнутый воздействию СВЧ излучения.

**Во второй главе** рассмотрены физические основы распространения ЭМ волн в нефтедобывающих скважинах. Принципиальная схема воздействия ЭМВ на добываемую скважинную продукцию заключается в следующем (рис. 5). К добываемой продукции от ВЧ или СВЧ источника через НКТ и обсадную колонну (электродов) подводится ЭМ энергия. Установки состоит из трех основных блоков: нагрузки (призабойная зона пласта, пласт), передающей линии (оборудование скважин, радиочастотный кабель) и источника энергии или генерирующего устройства. Их взаимодействие характеризуется многими факторами, основными из которых являются технологические, определяющие электрические свойства генерирующего устройства и передающей линии. Эти параметры определяются конечной целью технологического процесса: температурой плавления АСПВ, и, в результате, увеличением пропускной способности НКТ нефтедобывающей скважины.

В нефтегазоносных районах Западной Сибири и Крайнего Севера глубина твёрдых отложений АСПВ в скважинах доходит до 600 м от устья, в зависимости от условий их эксплуатации. Для нагрева таких сред возможно

применение спектра ЭМ волн с частотой от 10 МГц до 3 ГГц, что соответствует длинам волн от 0,1 до 30 м в воздухе. Так как длины ЭМ волн в АСПВ существенно меньше, чем глубины скважин и толщин пробок АСПВ, скважина в радиофизическом смысле является длинной линией передачи ЭМ энергии.

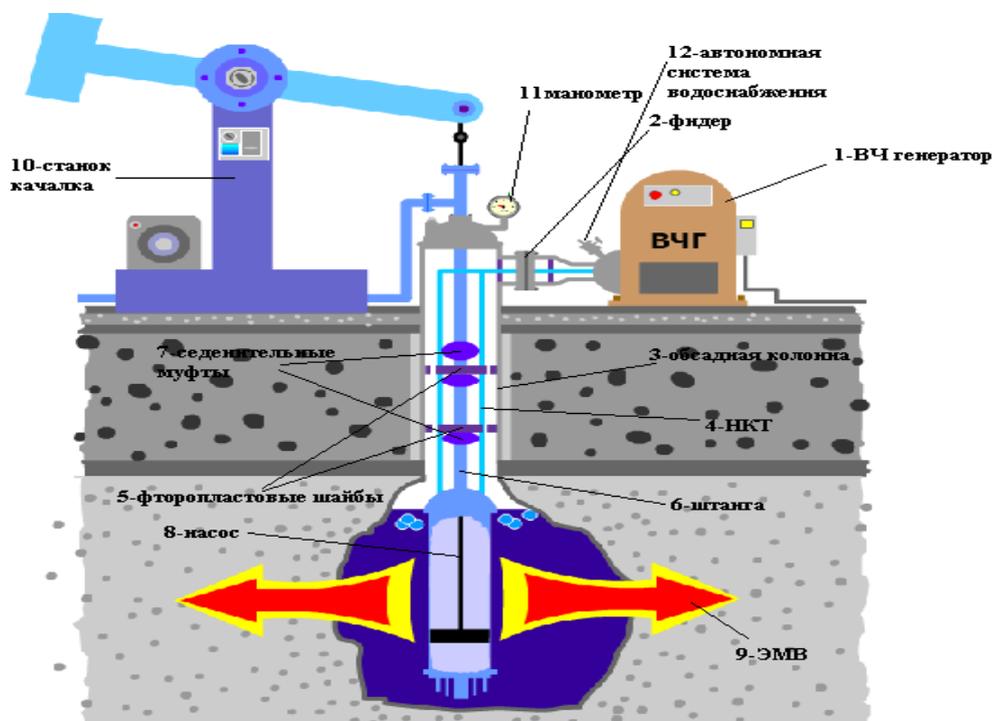


Рис. 5. Схема установки, оборудованная для воздействия ВЧ ЭМП на пласт и одновременной добычи скважиной нефти

Нефтедобывающая скважина, как коаксиальная система, характеризуется следующими первичными электрическими параметрами, отнесёнными к единице длины  $l$  (погонными параметрами): суммарное сопротивление обоих  $r_0$  проводников (обсадной колонны скважин и НКТ), суммарная индуктивность  $L_0$ , ёмкость  $C_0$ , проводимость среды между проводниками  $g_0$ . Эти параметры зависят от конструкции, геометрических размеров и материалов скважин, частоты ЭМ колебаний и могут быть рассчитаны по формулам:

$$r_0 = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \sqrt{\pi f \mu_m \mu_0 \rho_m}, \quad L_0 = \frac{\mu_r \mu_0}{2\pi} \ln \frac{b}{a}, \quad C_0 = \frac{2\pi \varepsilon_r \varepsilon_0}{\ln \frac{b}{a}}, \quad g_0 = 2\pi f C_0 \operatorname{tg} \delta_r \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\varepsilon_r, \mu_r$  – относительная диэлектрическая и магнитная проницаемость среды между проводниками;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\operatorname{tg} \delta_r$  – тангенс угла диэлектрических потерь диэлектрика;  $f$  – ЭМ частота;  $\mu_m, \rho_m$  – относительная магнитная проницаемость и удельное электрическое сопротивление проводников;  $a$  и  $b$  – внутренний и внешний радиусы проводников.

Зависимости электрических параметров нефтедобывающей скважины, заполненной парафином, от частоты ЭМ волн приведены в таблице 1.

Значения первичных электрических параметров  
нефтедобывающей скважины как коаксиальной линии  
( $a = 146,1$  мм,  $b = 73,0$  мм,  $\varepsilon_r = 3,7$ ;  $\rho_m = 0,139 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$ ;  $\mu_r = 100$ )

$f$	1 Гц	1кГц	1МГц	1 ГГц
$r_0, \text{ Ом/м}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-2}$	1,5
$L_0 = 138,5 \text{ нГн/м}$ , $X_{0L} = \omega L_0, \text{ Ом/м}$	$0,87 \cdot 10^{-6}$	$0,87 \cdot 10^{-3}$	0,87	869,68
$C_0 = 297 \text{ пФ/м}$ , $G_{0C} = \omega C_0, 1/(\text{Ом} \cdot \text{м})$	$1,9 \cdot 10^{-9}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	1,9
$g_0, 1/(\text{Ом} \cdot \text{м})$	$8,2 \cdot 10^{-11}$	$8,2 \cdot 10^{-8}$	$8,2 \cdot 10^{-5}$	0,082

Как видно из данных таблицы 1, в реальной длинной линии передачи ЭМ энергии, каковой является скважина, выполняются условия  $r_0 > 0$  и  $g_0 > 0$ . Поэтому рассматриваемая коаксиальная линия относится к линиям с электрическими потерями. Волновое сопротивление в скважине  $Z_B = R_B \approx 21,6 \text{ Ом}$ . Типовыми величинами волновых сопротивлений длинных линий передачи ЭМ энергии являются 50 и 75 Ом. Так как эти значения существенно различаются, часть ЭМ энергии отражается уже на входе в скважину.

Поскольку волновые сопротивления выхода генератора и нагрузки (например, скважины) также значительно отличаются, в скважине устанавливается режим смешанных волн. Поведение таких волн характеризуется коэффициентом стоячей волны (КСВ), описываемого выражением:

$$K_{cm} = \frac{U_{nad} + U_{omp}}{U_{nad} - U_{omp}} = \frac{1 + \frac{U_{omp}}{U_{nad}}}{1 - \frac{U_{omp}}{U_{nad}}} = \frac{1 + |n_2|}{1 - |n_2|} \geq 1, \quad (2)$$

где:  $U_{nad}, U_{omp}$  – напряжения падающей и отражённой волн,  $n_2 = \frac{U_{omp}}{U_{nad}}$  – коэффициент отражения электромагнитной волны от нагрузки.

Для определения КСВ (коэффициента стоячей волны) теоретически было исследовано распределение напряжения в коаксиальной линии. При этом было принято, что в начальный момент подачи гармонического сигнала, на входе в линию возникают падающие напряжение и ток. Первая падающая волна напряжения падает на поверхность пробки с АСПВ или достигает динамического уровня жидкости в скважине, заполняющей межтрубное пространство, отражается от них, и в линии появляется первая отражённая волна. Эта волна движется к началу коаксиальной линии, отражается от входа, и в коаксиальной линии распространяется вторая падающая волна, движущаяся к концу линии. Таким образом, процесс последовательного отражения ЭМ волн в межтрубном пространстве скважины многократно повторяется.

Анализируя решение телеграфного уравнения, были получены максимальные и минимальные значения электрического напряжения между проводниками, и далее, исходя из формулы (1), было получено соотношение:

$$K_{cm} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{e^{2\alpha l} + |n_2|}{e^{2\alpha l} - |n_2|}, \quad (3)$$

где  $\alpha = \alpha_c + \alpha_r$ ,  $\alpha_c = \frac{\sqrt{\pi f \mu_m \rho_m}}{2Z_c \ln \frac{b}{a}} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$ ,  $\alpha_r = 2\pi f \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0}{2}} \left( \sqrt{1 + tg^2 \delta_r} - 1 \right)$ ,

$$n_2 = \frac{Z_{лс} - Z_{лг}}{Z_{лг} + Z_{лг}}, Z_{лг} = 60 \ln \frac{b}{a}, Z_{лг} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln \frac{b}{a}, Z_c = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}},$$

$Z_{лг}, Z_{лр}, Z_c$  – волновое сопротивление скважины выше и ниже раздела сред в межтрубном пространстве (например, динамического уровня жидкости), в свободном пространстве, соответственно;  $\alpha_c, \alpha_r$  – коэффициенты поглощения ЭМВ в скважине и диэлектрике, заполняющем межтрубное пространство скважины.

Значение КСВ в скважине определяется двумя безразмерными параметрами: коэффициентами затухания ЭМВ в скважине  $a = \alpha l$  и отражения их от нагрузки  $n_2$ . Нагрузкой является часть скважины ниже динамического уровня жидкости в межтрубном пространстве.

В частности, при  $a = 146,1$  мм,  $b = 73,0$  мм,  $\varepsilon_r = 1; \mu_m = 2,72, l = 500$  м на частоте 13,56 МГц имеем  $\alpha = \alpha_c \approx 0,0018 \text{ м}^{-1}$ ,  $n_2 \approx 0,8$ ,  $K_{cm} \approx 1,2 \div 1,4$ .

Это значение необходимо учитывать при расчётах поглощаемой средой электромагнитной энергии.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований плавления АСПО на опытных образцах и в нефтедобывающих скважинах под воздействием СВЧ ЭМ излучения.

Для оценки влияния ЭМ поля на параметры фазового перехода проводились экспериментальные исследования образцов парафина одного и того же сорта и одинаковой массы. Один из образцов нагревали посредством теплопроводности, другой – в СВЧ печи (мощность 800 Вт) до 70 – 75 °С. Изучая динамику остывания расплавленных образцов, было установлено, что ЭМ поле не влияет на температуру кристаллизации парафина, т.е. для исследованных образцов парафина она одинакова как при электронагреве, так и ЭМ воздействии. Между тем, удельная теплота плавления парафина, нагретого посредством теплопроводности, на 29 % больше, чем при ЭМ нагреве. Следовательно, для плавления парафина в ЭМ поле требуется меньшее количества тепла, чем при электронагреве. При этом удельная теплота плавления парафина линейно увеличивается с повышением массового содержания в нём песка.

Для экспериментальных исследований плавления АСПО в нефтедобывающих скважинах СВЧ ЭМ излучением была разработана установка, принципиальная схема которой приведена на рисунке 6.

Основными элементами установки являются источник СВЧ ЭМ энергии с генерирующей частотой 2375 МГц, коаксиальная линия (скважина), узел передачи ЭМ энергии в коаксиальную линию, макет насыщенной пористой среды (с водонасыщенностью 0,3) и измерительная аппаратура.

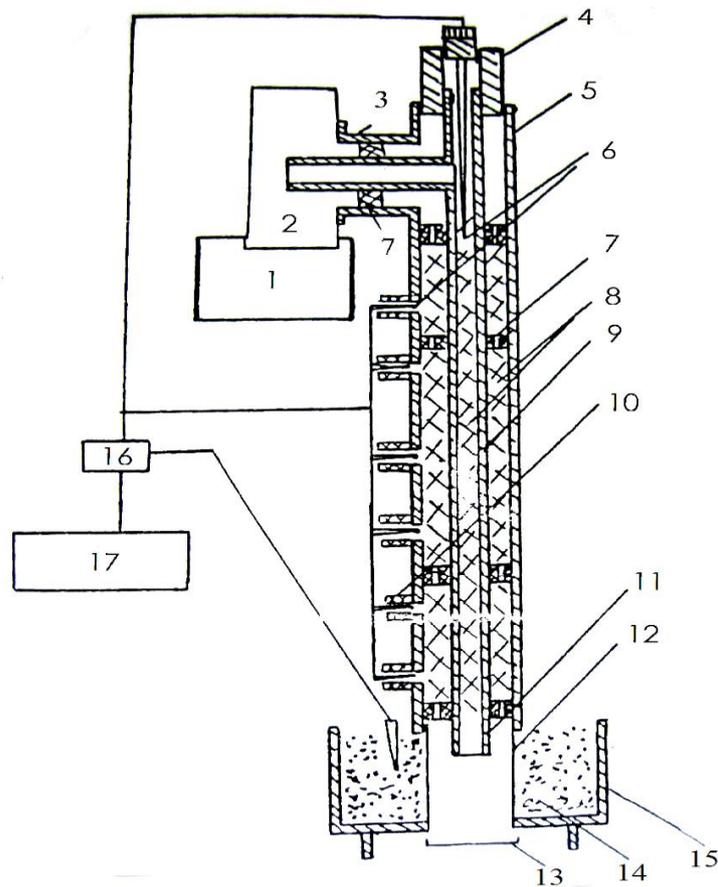


Рис. 6. Схема экспериментальной установки

(1 – СВЧ генератор; 2 – прямоугольный волновод; 3 – коаксиально - волноводный переход; 4 – согласующий поршень; 5 – внешняя труба; 6 – термопары; 7 – диэлектрические шайбы; 8 – твёрдый парафин; 9 – внутренняя труба; 10 – диэлектрические патрубки; 11 – ЭМ излучатель; 12 – диэлектрический стакан; 13 – «подстилка»; 14 – макет пласта; 15 – цилиндрический кожух; 16 – пакетный переключатель; 17 – регистрирующий прибор)

Принцип работы экспериментальной установки заключается в следующем. СВЧ ЭМ колебания генерируются СВЧ источником и распространяются в прямоугольном волноводе, на конце которого установлена водяная нагрузка. От волновода с помощью штыря, выступающего от фидера, СВЧ энергия передаётся в межтрубное пространство коаксиальной системы. ЭМ волны, распространяясь в межтрубном пространстве, частично затухают в коаксиальной системе из-за конечной проводимости материалов внешней и внутренней труб и диэлектрических потерь в парафиновых отложениях (в качестве парафина был использован осветительный парафин), заполняющих пространство между ними, оставшаяся часть ЭМ энергии поглощается пластом, т.е. в межтрубном пространстве, и в пласте создаются объёмные источники, из которых выделяется тепло.

Мощность СВЧ ЭМ излучения, подаваемой в модель скважины, определялась калориметрическим способом и составляла 550 Вт.

Из результатов эксперимента видно, что температура в парафиновой пробке, а, следовательно, во внутренней и внешней трубах, распределена неравномерно. Она изменяется по закону, близкому к гармоническому (рис. 7-8).

Вторая особенность распределения температуры в разомкнутой коаксиальной линии передачи ЭМ энергии заключается в том, что вначале значения температур наверху (в области ввода ЭМ энергии в коаксиальную систему) превышают значения температур нижних частей труб. Однако с течением времени эта зависимость изменяется в противоположную сторону: на нижнем конце коаксиальной системы температура выше, чем наверху. При этом волнообразный характер пространственного изменения температуры вдоль коаксиальной системы не нарушается. Между тем, значения температур в пласте значительно превышают их значения в самой коаксиальной системе.

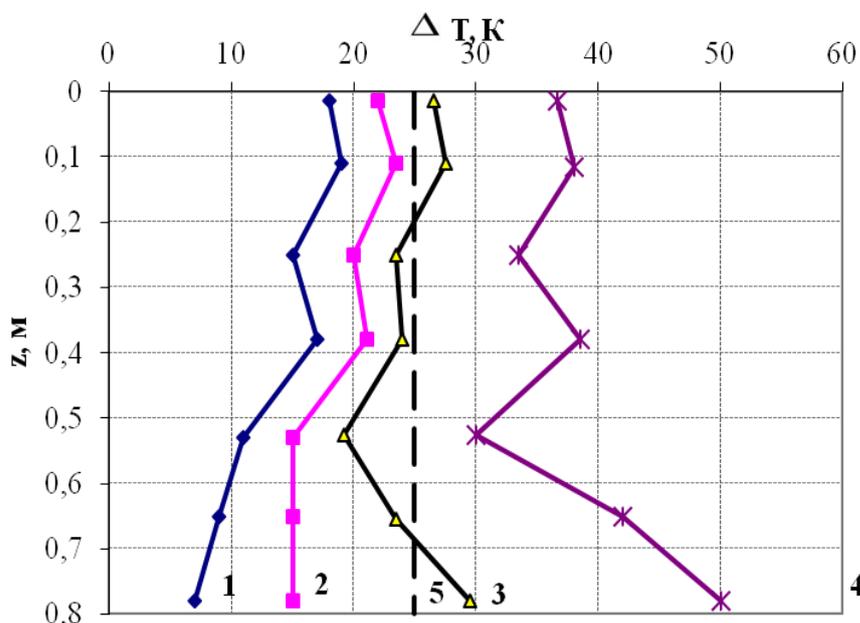


Рис. 7. Изменение температуры вдоль внутренней трубы, межтрубное пространство пустое ( $T = T_0 + \Delta T$ ):

1 – 60 мин; 2 – 110 мин; 3 – 195 мин; 4 – 285 мин; 5 – изотерма плавления

Зависимость изменения количества расплавившегося парафина, выходящего из коаксиальной системы, со временем (как и зависимость изменения температуры) нелинейная. Появляясь через некоторое время, количество расплавленного парафина вначале линейно возрастает, затем выходит на стационарный режим и вновь резко увеличивается.

Представлены результаты второй серии экспериментов, иллюстрирующие влияние пробки парафина, заключённого в межтрубном пространстве скважин, на интенсивность плавления парафиновой пробки во внутренней трубе. При сохранении пространственной гармонической зависимости, изменение температуры наверху коаксиальной системы значительно превышает изменение температуры внизу, причём снижение температуры по длине коаксиальной системы в этой серии экспериментов превышает аналогичное убывание температуры проводников, полученное в первой серии экспериментов.

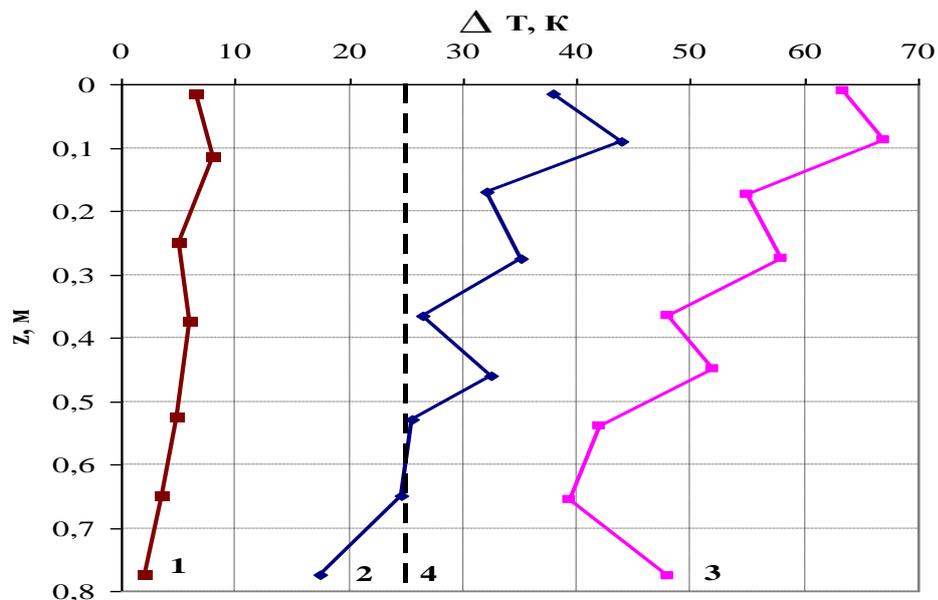


Рис. 8. Изменение температуры в трубах (1– на внешней трубе, межтрубное пространство пустое (60 мин), 2, 3 – на внутренней трубе, межтрубное пространство заполнено парафином (2 – 90 мин, 3 – 180 мин), 4 – изотерма плавления)

В зависимости от заполнения межтрубного пространства скважины АСПО, плавление их может происходить как вследствие нагрева посредством теплопроводности, так и вследствие возникновения распределённых источников тепла в системе под воздействием ЭМП. В последнем случае скорость нагрева и плавления АСПО в коаксиальной системе значительно выше, чем в первом. На эти закономерности существенное влияние оказывают диэлектрические свойства АСПО и ЭМ свойства материалов труб. При прочих равных условиях процесс нагрева и плавления АСПО происходит в поле стоячей ЭМ волны, образовавшейся вследствие её отражения от неоднородностей поверхностей труб коаксиальной линии.

Расчётные исследования КСВ в модели скважины составляли:  $K_{cm} = 6,5$ . Показано, что с увеличением температуры АСПО КСВ монотонно уменьшается. С учётом коэффициента полезного действия генератора, доля ЭМ энергии, дошедшей до модели пласта, равна  $\eta \approx 0,04$ . Эти оценки указывают на перспективность применения ЭМ энергии для нагрева и удаления отложений.

**В четвёртой главе** приведены результаты исследования энергетической эффективности ВЧ установки для плавления и удаления АСПО (ВЧ УПиУ АСПО). Под энергетической эффективностью ВЧ УПиУ АСПО подразумевается её энергетический коэффициент, определяемый соотношением:

$$\eta_{\text{эн}} = \frac{P_{\text{погл}}}{P}, \quad (4)$$

где  $P_{\text{погл}}$  – мощность, поглощённая в скважине;  $P$  – мощность ВЧ генератора.

Применительно к лабораторной модели ВЧ УПиУ АСПО  $\eta_{\text{эн}} = 0,6$ , что указывает на достаточно высокую энергетическую эффективность СВЧ ЭМ нагрева и плавления парафиновых отложений.

ЭМ волна, генерируемая источником и передаваемая через фидер на поверхность АСПО, в скважине отражается, что приводит к уменьшению КПД ВЧ УПиУ АСПО. Величина коэффициента отражения определяется диэлектрическими свойствами АСПО, заполняющими межтрубное пространство скважины, и размерами труб. Для повышения энергетической эффективности необходимо либо уменьшить величину коэффициента отражения ЭМ волны от пробки АСПО, либо увеличить его относительно пласта.

Для реализации первого способа построена математическая модель и проведены численные исследования нагрева и плавления парафиновых пробок в НКТ скважин передвижным источником ЭМ излучения. Скорость его перемещения определялась движением границы раздела жидкого и твёрдого АСПО.

Установлено, что распределение источников тепла и температуры по сечению трубы неравномерно (рис. 9 -10). Регулированием частоты генератора ЭМ волн можно значительно повысить эффективность удаления АСПВ в трубопроводах и НКТ. Образуются две конические формы расплавленной зоны АСПО (рис. 9). Следовательно, можно отключить генератор ЭМ волн, а оставшиеся возле стенок труб АСПО удалить, например, закачкой растворителя.

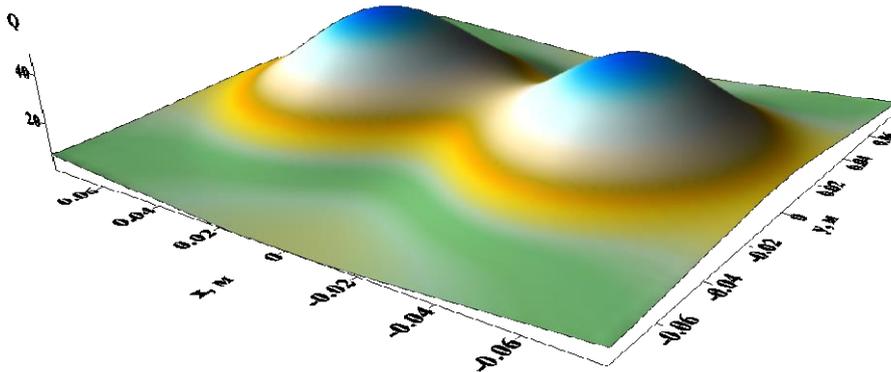


Рис. 9. Пространственное распределение плотности источников тепла на частоте ЭМ поля 2 ГГц

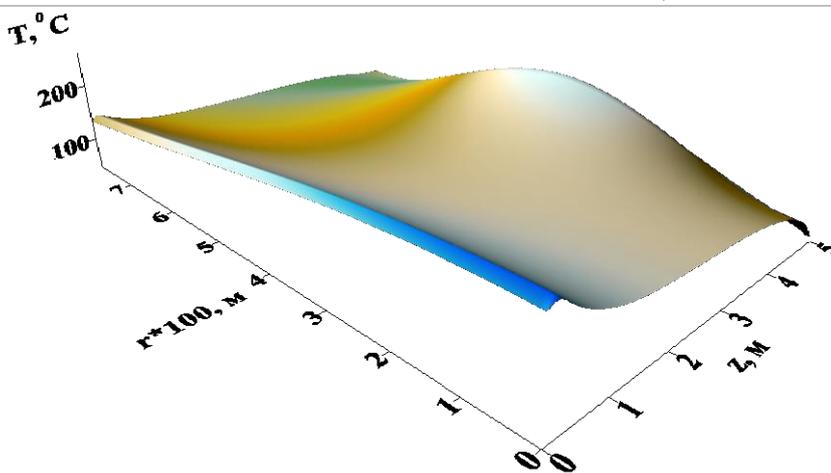


Рис. 10. Распределение температуры в трубе с парафином через время  $t=4,5$  час.

Время устранения парафиновой пробки движущимся источником ЭМ излучения зависит от его частоты (таблица 2).

Таблица 2

Продолжительность полного расплавления пробки парафина передвигающимся источником ЭМ излучения различной частоты

$f$ , ГГц	1,5	2,0	2,4	3,0	4,0
$t$ , мин	325,5	316,7	316,75	316,8	319,4

Приведены данные теоретического исследования коэффициента полезного использования электромагнитной энергии для предотвращения и удаления АСПО.

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Установлено, что присутствующая в нефти в растворённом или мелкодисперсном состоянии вода, под действием электромагнитного поля объединяется в глобулы. В условиях добычи скважинной продукции она может улучшить гидрофильность поверхности промыслового оборудования, препятствуя образованию асфальтосмолопарафиновых отложений. Показано использование зависимости тангенса угла диэлектрических потерь нефти от температуры для прогнозирования предотвращения образования асфальтосмолопарафиновых отложений.

2. Разработаны физические основы и выведена формула для определения коэффициента стоячей волны с учётом взаимодействия высокочастотного (или сверхвысокочастотного) генератора и нефтедобывающей скважины. Для определения его численного значения необходимо вычислить безразмерный коэффициент поглощения электромагнитных волн в скважине с асфальтосмолопарафиновыми отложениями и коэффициент их отражения от пласта.

3. Результаты экспериментальных исследований плавления пробки парафина на модели скважины с учётом коэффициента стоячей волны подтвердили достаточно высокую энергетическую эффективность метода электромагнитного воздействия на асфальтосмолопарафиновые отложения. Выявлены параметры электромагнитного воздействия, влияющие на эффективность разрушения парафиновой пробки, созданного перемещающимся источником сверхвысокочастотного электромагнитного излучения. Чем меньше частота возбуждаемых электромагнитных волн, тем больше неравномерность распределения температуры по поперечному сечению насосно-компрессорной трубы. Выявлено образование двух конусоподобных форм расплавленной зоны, что может привести к ускоренному полному расплавлению отложений. При сверхвысокочастотной электромагнитной мощности 6 – 10 кВт пробка парафиновых отложений длиной 5 м в насосно-компрессорной трубе расплавляется за 5–6 часов. Эффективность нагрева и удаления парафиновой пробки составляет 60 %. При высокочастотной мощности 60 кВт в коаксиальной скважине за 44 часа устраняется парафиновая пробка длиной 100 м.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Материалы, опубликованные в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, утвержденных ВАК РФ:

1. Багаутдинов, Н.Я. Выбор частоты электромагнитного воздействия на гидратопарафиновые отложения в подземном оборудовании скважин [Текст] / Н. Я. Багаутдинов, М. А. Фатыхов, Л. М. Фатыхов // Нефтепромысловое дело. – 2007. – № 7. – С. 48 – 51.

2. Фатыхов, Л.М. Технология очистки скважин от асфальтеносмолопарафиновых отложений путем воздействия высокочастотного и сверхвысокочастотного электромагнитного излучения [Текст] // Вестник ПНИПУ. Геология, нефтегазовое и горное дело. – Т. 17. – №2. – С.152-165.

3. Фатыхов, Л.М., Галкин С.В., Фатыхов М.А. Применение численного моделирования для оценки эффективности электромагнитной очистки скважин от асфальтосмолопарафиновых отложений // Нефтяное хозяйство. – 2018. – №8. – С. 56-59.

4. Багаутдинов, Н. Я. Определение частоты электромагнитного воздействия на гидратопарафиновые отложения в подземном оборудовании скважин [Текст] / Н. Я. Багаутдинов, М. А. Фатыхов, Л. М. Фатыхов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2007. <http://www.ogbus.ru/authors/Fatykhov/Fatykhov4.pdf>. С. 1 – 10.

5. Фатыхов, М. А. Исследование коэффициента стоячей волны в высокочастотной токоведущей длинной линией с потерями [Текст] / М. А. Фатыхов, Л. М. Фатыхов // В мире научных открытий. – 2013. – № 6 (Математика. Механика. Информатика). – С. 272 – 282.

6. Фатыхов, М. А. Динамические особенности фазовых переходов в сверхвысокочастотном электромагнитном поле [Текст] / М. А. Фатыхов, Л. М. Фатыхов, Р. И. Идрисов // Естественные и технические науки. – 2014. – № 7 (75). – С. 20 – 23.

7. Фатыхов, М. А. Особенности фазовых переходов в сверхвысокочастотном электромагнитном поле [Текст] // М. А. Фатыхов, Л. М. Фатыхов // Научное обозрение. – 2014. – № 8 (2). – С. 576 – 581.

8. Фатыхов, М. А. СВЧ электромагнитный метод плавления парафиновой пробки в разомкнутой коаксиальной линии [Текст] / М. А. Фатыхов, Л. М. Фатыхов // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88. – № 3. – С. 697 – 702.

9. Фатыхов, М.А. Моделирование распределения температуры в трубе с твердым нефтяным отложением, взаимодействующим с электромагнитным излучением [Текст] / М.А. Фатыхов, Р.И.Идрисов, Л.М.Фатыхов //Естественные и технические науки. – 2017. –№4(106). – С.105-107.

### Материалы, опубликованные в прочих изданиях:

10. Фатыхов, М. А. Исследование плавления парафиновых отложений в эксплуатационной скважине в высокочастотном электромагнитном поле [Текст] / М. А. Фатыхов, Л. М. Фатыхов // Матер. междунар. научно-техн. конф. «Актуальные проблемы технических, естественных и гуманитарных наук». Уфа: УГНТУ, 2010. – Вып. 5. – С. 65 – 69.

11. Фатыхов, Л. М. Исследования плавления АСПО в скважине под воздействием высокочастотного электромагнитного излучения [Текст] / Л. М. Фатыхов // Матер. IV научно-техн. конф. молодых специалистов ООО «РН-УфаНИПИ-нефть». Уфа, 2010. – С. 192 – 196.

12. Фатыхов, Л. М. Исследование влияния согласования с источником на плавление АСПО в скважине под воздействием электромагнитного излучения [Текст] / Л. М. Фатыхов // Сборник науч. трудов III междунар. научно-практ. конф. молодых учёных, посвящённой году химии «Актуальные проблемы науки и техники». Уфа, 2011. – С. 89 – 94.

13. Фатыхов, Л. М. Объёмное плавление отложений в высокочастотном электромагнитном поле [Текст] / Л. М. Фатыхов // Учёные записки: сб. научн. статей. – Вып.12. – Уфа: Изд-во Баш. гос. пед. универс., 2011. – С. 94 – 98.

14. Фатыхов, Л. М. Плавление парафиновых отложений в трубе высокочастотным электромагнитным излучением [Текст] / Л. М. Фатыхов, М. А. Фатыхов // Матер. 6-й всеросс.

конф. «Необратимые процессы в природе и технике». Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – С. 243 – 247.

15. Фатыхов, Л. М. Сквaziна как коаксиальная линия передачи электромагнитной энергии [Текст] / Л. М. Фатыхов // Матер. всеросс. научн. конф. «Инновационный потенциал молодой науки». Уфа, 2012. – С. 77 – 80.

16. Фатыхов, М. А. Физические основы метода исследования фазовых переходов в электромагнитном поле [Текст] / М. А. Фатыхов, Л. М. Фатыхов // Учёные записки: сб. научн. статей. Вып.13. – Уфа: Изд-во Баш. гос. пед. универс., 2012. – С. 77 – 81.

17. Фатыхов, М. А. Влияние изменения температуры на распространение электромагнитных волн в коаксиальной системе [Текст] / М. А. Фатыхов, Л. М. Фатыхов // Тезисы докл. междунар. научно-техн. конф. «Синергетика –III». Уфа, 2012. – С. 194 – 197.

18. Фатыхов, М. А. Исследования ввода и нагрева высокочастотного электромагнитного воздействия на продуктивные пласты [Текст] / М. А. Фатыхов, Л. М. Фатыхов, Н. Р. Шагиев, Ф. А. Нагаев // Матер. школы-конф. для студентов, аспирантов и молодых учёных «Фундаментальная математика и её приложения в естествознании», т. 2. Физика. Уфа, РИЦ Баш. гос. универс., 2012. – С. 213 – 222.

19. Фатыхов, М. А. Экспериментальное исследование фазовых переходов в электромагнитном поле [Текст] / М. А. Фатыхов, Л. М. Фатыхов // Тезисы докл. XIV Минского междунар. форума по теплообмену, Т. 1., Ч. 1. Минск: Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова, 2012. – С. 638 – 640.

20. Фатыхов, М. А. Исследование интерференции электромагнитных волн в коаксиальной линии с потерями [Текст] / М. А. Фатыхов, Л. М. Фатыхов // Учёные записки: сб. научн. статей. Вып. 1. – Уфа, 2013 – С. 62 – 68.

21. Фатыхов, М. А. Исследование особенностей передачи электромагнитной энергии в пласт через коаксиальную линию, заполненную твёрдыми отложениями [Текст] / М. А. Фатыхов, Л. М. Фатыхов // Матер. докл. междунар. научно-практ. конф. «Инновационные технологии в нефтегазовом комплексе». г. Уфа, 2014. – С. 150 – 154.

22. Фатыхов, М. А. Особенности распространения высокочастотных электромагнитных волн в коаксиальной линии с диэлектрической нагрузкой [Текст] / М. А. Фатыхов, Л. М. Фатыхов // Матер. докл. междунар. научн. - практ. конф. «Приоритетные направления развития науки и образования», г. Чебоксары, 2014. – С. 221 – 224.

23. Фатыхов, М. А. Электромагнитно-механическое воздействие на парафины и газогидраты. Монография / М. А. Фатыхов, Н. Я. Багаутдинов, Л. М. Фатыхов. – Германия, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH Co.KG, 2012. – 267 с.

24. Fatykhov, M. A. Microwave electromagnetic method of melting the paraffin plug in an open coaxial system [Text] / M. A. Fatykhov, L. M. Fatykhov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2015. – V. 88. – № 3. – P. 724 – 729.

25. Фатыхов, М.А. Физическое обоснование влияния электромагнитного поля на фазовые переходы /М.А.Фатыхов, М.С. Юланова, Л.М. Фатыхов // Сб. статей междунар. научн. - практ. конф. «Фундаментальные проблемы науки», г. Тюмень, 2016. – С.117 –120.