

УДК 622.245.5

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2018

ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ СКВАЖИН ОТ АСФАЛЬТЕНОСМОЛОПАРАФИНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПУТЕМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО И СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Л.М. Фатыхов

Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг “ПермНИПИнефть”» в г. Перми
(614066, Россия, г. Пермь, ул. Советской Армии, 29)

CLEANING THE WELL FROM WAX DEPOSITION BY HIGH-FREQUENCY AND ULTRA HIGH-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC EXPOSURE

Lenart M. Fatykhov

PermNIPIneft branch of LUKOIL-Engineering LLC in Perm
(29 Sovetskoy Armii st., Perm, 614066, Russian Federation)

Получена / Received: 28.05.2018. Принята / Accepted: 09.06.2018. Опубликовано / Published: 29.06.2018

Ключевые слова:

отложения асфальтеносмоло-парафиновых веществ, нефтепровод, скважина, высокочастотный и сверхвысокочастотный метод, температура, диэлектрические потери, частота.

Key words:

wax deposits, oil pipeline, well, high-frequency and ultrahigh-frequency method, temperature, dielectric loss, frequency.

Как показывает мировая практика, при добыче высокопарафинистой нефти серьезной проблемой, вызывающей осложнения в работе скважин, является образование асфальтеносмолопарафиновых отложений (АСПО) на внутренней поверхности нефтепромыслового оборудования, которое приводит к снижению производительности системы и эффективности работы насосных установок, к сбою в работе скважин, контрольно-измерительных приборов и систем сбора и транспорта нефти. Образование АСПО может привести к полному перекрытию подъемных труб и кольцевых каналов в межтрубном пространстве, что вызывает необходимость проведения подземных ремонтных работ с целью ликвидации депарафинизации скважин.

В настоящей статье описаны геофизические основы воздействия высокочастотных и сверхвысокочастотных электромагнитных полей для нагрева и удаления АСПО из скважин. Приведены результаты экспериментальных исследований диэлектрических потерь в образцах АСПО некоторых нефтяных месторождений. Установлена зависимость их от частоты и температуры, а также от содержания смол и асфальтенов в образцах. Показана возможность экспериментального определения температуры плавления АСПО по данным диэлектрических исследований.

Проведены расчетные исследования нагрева и расплавления пробки из АСПО в нефтепроводе воздействием одного из типов электромагнитных волн, способных распространяться в нем как в круглом волноводе. Полагается, что источник электромагнитных волн движется. Это позволяет избежать перегрева среды в одних точках и расплавлять твердые отложения по всей длине пробки. Результаты численных исследований позволяют осуществлять мониторинг динамики нагрева и ликвидацию пробки АСПО электромагнитным воздействием.

According to information over the world, production of high content paraffin oil is followed by a serious problem causing challenges in operation of wells. The problem is wax deposition on the inner surface of oil field equipment. The problem decreases system production and efficiency of operation of pumps, the failure of wells, control devices and oil collection and interconnection systems. Wax deposition can lead to a complete closure of lifting pipes and annular channels in the interconnecting space, which causes the necessity of workovers to eliminate the wax deposition.

This article describes the geophysical bases of the influence of high-frequency and ultra high-frequency electromagnetic fields for the heating and removal of wax from wells. Results of experimental studies of dielectric losses in wax samples of some oil fields are presented. Their dependence on frequency and temperature, as well as on the content of resins and asphaltene in samples is established. The possibility of experimental determination of the melting point of wax by the data of dielectric studies is shown.

Calculation studies of heating and melting the wax plugs in the oil pipeline were carried out under the influence of the type of electromagnetic waves capable of propagating in it as in a round waveguide. It is believed that the source of electromagnetic waves is moving. That allows overheating of the medium at some points and melts solid deposits along the entire length of a plug. Results of numerical studies allow monitoring the dynamics of heating and elimination of a wax plug by electromagnetic action.

Фатыхов Ленарт Миннеханович – руководитель группы проектирования и мониторинга разработки Печорской группы месторождений (тел.: +007 987 250 60 92, e-mail: lenfort@inbox.ru).

Lenart M. Fatykhov – Head of Team for Design and Monitoring of Development of Pechora Group of Fields (tel.: +007 987 250 60 92, e-mail: lenfort@inbox.ru).

Введение

Развитие нефтяной промышленности, особенно в старых нефтегазодобывающих районах, характеризуется перемещением работ в более сложные геолого-технологические условия разработки и, как следствие, снижением качества запасов. Вследствие этого в общем балансе разрабатываемых месторождений сегодня преобладают месторождения, вступившие в позднюю стадию разработки, наблюдается тенденция к увеличению доли трудноизвлекаемых запасов нефти [1]. К ним относятся, в частности, месторождения с нефтью, характеризующейся высокими вязкостью и содержанием асфальтено-смолопарафиновых (АСПО) веществ.

В процессе нефтеизвлечения изменяются естественные термобарические условия залежей, что приводит к отложению асфальтеносмолопарафиновых веществ на стенках скважин и подъемных труб, в насосном оборудовании и наземных коммуникациях [2]. Для предотвращения подобных отложений применяются обработки химическими реагентами (ингибиторами, деэмульгаторами и др.), магнитными и акустическими полями. Широкое применение находят тепловые методы удаления асфальтеносмолопарафиновых веществ, в частности, закачкой горячей нефти или реагентов-растворителей, при взаимодействии с которыми протекают экзотермические реакции [3, 4].

Развитие технологии и техники борьбы с образованием асфальтеносмолопарафиновых отложений имеет длительную историю [5]. Однако нельзя сказать, что к настоящему времени все трудности, связанные с решением данной проблемы, преодолены. Многообразие условий разработки месторождений и характеристик добываемой нефти требует индивидуальных подходов [3, 6–9].

Исходя из модели образования парафинов или кристаллогидратов вследствие изменения термобарических условий и механического прилипания отложений к стенкам скважины, удаление АСПО и кристаллогидратов производится либо путем подачи в скважину различных реагентов, которые растворяют отложения (или прогревают их зону), либо скважинными нагревателями, либо механическими способами с использованием скребков. Некоторые технологии позволяют удалять отложения даже

при отсутствии циркуляции внутри насосно-компрессорной трубы (НКТ) [3].

В частности, для предотвращения образования кристаллогидратов в газопроводе в поток газа добавляют метанол.

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

Такое положение дел заставляет искать новые более дешевые и безопасные методы предотвращения образования и разрушения кристаллогидратных и парафиновых пробок. Результаты исследований, проведенных как в нашей стране, так и за рубежом, свидетельствуют о том, что одним из эффективных методов борьбы с АСПО, который принципиально отличается от традиционных, является использование энергии высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных полей (ЭМП) [10–19]. При этом наиболее значимым эффектом является нагрев, происходящий в результате перехода энергии электромагнитного излучения во внутреннюю энергию среды в процессах ее поляризации.

Технология борьбы с асфальтеносмолопарафиновыми отложениями 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 транспортируется энергия ЭМП. Эффективность данного технологического процесса зависит от электромагнитной мощности в скважине.

Физические основы и технико-технологические особенности воздействия высокочастотных электромагнитных полей на асфальтеносмолопарафиновые отложения в скважине

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 [4–12]. 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, изменяя уровень мощности ВЧ-генератора и частоту электромагнитного излучения, можно управлять процессом разогрева, так как диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь материала пробки зависят от частоты излучения и температуры.

Физической основой метода является выделение тепла в среде, заполняющей межтрубное пространство, и в стенках труб скважины при распространении вдоль нее электромагнитных волн от наземного генератора. Используется то обстоятельство, что система из насосно-компрессорных труб и обсадной колонны скважины является в электротехническом отношении коаксиальной линией передачи с неидеально проводящими стенками, а межтрубное пространство заполнено диэлектриком, хорошо поглощающим энергию электромагнитного поля. В результате часть электромагнитной энергии переходит в тепловую, твердые отложения нагреваются и расплавляются одновременно во всем объеме.

Асфальтеносмолопарафиновые отложения представляют собой диэлектрики, которые характеризуются комплексной относительной диэлектрической проницаемостью:

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}_d(\omega, T, p) &= \epsilon'_d(\omega, T, p) - j\epsilon''_d(\omega, T, p), \\ j &= \sqrt{-1},\end{aligned}\quad (1)$$

где ϵ'_d , ϵ''_d – действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости среды; ω – циклическая частота, $\omega = 2\pi f$; f – линейная частота электромагнитной волны; T и p – температура и давление.

Мнимая часть диэлектрической проницаемости определяет плотность источников тепла,

возникающих в материале при его взаимодействии с высокочастотным электромагнитным полем (ВЧ ЭМП) вида

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

Плотность источников тепла описывается формулой:

$$q = 0,5\omega\epsilon'_d\epsilon_0\operatorname{tg}\delta\dot{E}_0\dot{E}_0^*, \quad \operatorname{tg}\delta \approx \frac{\epsilon''_d}{\epsilon'_d}. \quad (3)$$

Пространственно-временное изменение температуры в АСПО, заполняющем скважину, находится из решения уравнения теплопроводности:

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda\Delta T + q. \quad (4)$$

В формулах (2)–(4) ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; $\dot{E}$, $\dot{H}$ – напряженность электрического и магнитного полей соответственно; $\dot{E}_0$, $\dot{H}_0$ – их амплитуды, зависящие от пространственных координат и времени; c , ρ , λ – удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности среды соответственно. Таким образом, возникновение внутренних источников тепла в АСПО при его взаимодействии с ВЧ ЭМП и, как следствие, изменение температуры и давления в нем позволяют применить энергию мощного электромагнитного излучения для ликвидации АСПО, образующихся в различных узлах оборудования.

Одним из преимуществ данного метода является также выделение дополнительного тепла в материале узлов оборудования вследствие конечной проводимости.

Особенности воздействия ВЧ и СВЧ ЭМП на АСПО или на его составляющие изучены рядом авторов. Так, в работе [15] исследованы процессы нагрева и расплавления парафиновых пробок в стволах нефтяных скважин и нефтепроводах мощным электромагнитным излучением в режиме непрерывной генерации электромагнитных волн. Для выбранных мощностей и частот ВЧ-источника определены времена проплавления сквозного канала в пробке и времена ее полной ликвидации с учетом неоднородности распределения ВЧ-мощности по сечению ствола скважины и омического поглощения ВЧ-мощности в металлических стенках труб скважины. Поскольку металлические стенки

находятся в тепловом контакте с парафиновой пробкой, то появляется дополнительный фактор разогрева парафиновой пробки. В ряде случаев, в частности в случае оборудования ствола нефтяной скважины, учет нагрева пробки стальными стенками существенно сокращает время проплавления парафиновой пробки. Процесс расплавления идет постепенно от центральной области ствола скважины к периферии так, что расплавленная зона парафина имеет коническую форму. Коническая форма расплавленной зоны может привести к разрушению пробки до ее полного расплавления. В рассмотренных численных примерах [13–15] 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.

Скважина в электродинамическом смысле является коаксиальной линией передачи. В силу особенности дисперсии волн в коаксиальной линии всегда может быть выбрано оптимальное значение рабочей частоты, которое соответствует значению коэффициента поглощения ВЧ-мощности в пробке, равному обратной длине пробки. Нефтепровод можно рассматривать как

цилиндрический волновод, способный пропускать электромагнитные волны с частотой выше частоты отсечки. На этих частотах происходят 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. Определены скорость движения источника ВЧ-мощности, время полной ликвидации пробки. Показано, что для выбранных параметров движущегося ВЧ-источника и парафиновой пробки доля энергии, затраченной на плавление парафиновой пробки, достигает 70 %.

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

Ранее процессы разогрева и плавления парафиновых пробок в нефтескважине были рассмотрены в работе [15]. 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 кабельных волн (ТЕМ-тип)

распределение ВЧ-мощности в поперечном сечении сильно неоднородно. Учет неоднородного радиального распределения ВЧ-мощности приводит к качественным и количественным особенностям разогрева и плавления пробки в стволе скважины. Кроме того, учтено дополнительное затухание ТЕМ-волн в скважине, обусловленное потерями ВЧ-мощности в стенках ствола скважины. Диссипация ВЧ-мощности в стальных стенках труб приводит к их нагреву. А поскольку стальные стенки находятся в тепловом контакте с парафиновой пробкой, то появляется дополнительный канал разогрева пробки.

В работе [16] разработана лабораторная установка и проведены исследования нагрева и плавления парафина под воздействием энергии электромагнитных колебаний в короткозамкнутой коаксиальной системе. Показано, что в зависимости от заполнения межтрубного пространства парафином или воздухом плавление парафина может происходить как вследствие его нагрева посредством теплопроводности, так и вследствие возникновения распределенных источников тепла в системе под воздействием электромагнитного поля. В последнем случае скорость нагрева и плавления парафина в коаксиальной системе значительно больше, чем в первом случае. На эти закономерности существенное влияние оказывают диэлектрические свойства парафина и электромагнитные свойства материалов труб. При прочих одинаковых условиях процесс нагрева и плавления парафина происходит в поле стоячей электромагнитной волны, образовавшейся из-за ее отражения от неоднородностей поверхностей труб коаксиальной линии.

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

Интенсивнее всего преобразование электромагнитной энергии в тепловую энергию происходит в диапазоне высокочастотных волн. Вопрос в том, как передать электромагнитную энергию в предназначенную для этого среду. Не всякая линия передачи может передавать электромагнитные волны любой частоты. Например, по коаксиальной линии передачи электромагнитная энергия передается посредством ТЕМ-волн, в которых не существует ограничений на частоту. А в волноводах имеются

критические частоты, ниже которых электромагнитные волны не могут быть переданы [20].

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

В круглом волноводе могут распространяться только волны типа E или H [20]. Если нефтепровод имеет небольшой радиус, в нем могут распространяться электромагнитные волны только очень большой частоты, которые из-за сильного поглощения электромагнитной энергии средой быстро затухают. Поэтому среда греется крайне неравномерно. В одних точках могут быть сильный перегрев и большие потери тепла в окружающую нефтепровод среду. В других точках, наоборот, не достаточный для плавления среды нагрев. Вследствие этого разрушение пробки может быть только на небольшую глубину. В этих условиях возможно разрушение АСПО с помощью движущегося источника ВЧ электромагнитных волн – «ЭМ крот». В этом способе источник ВЧ электромагнитного излучения передвигается по мере плавления среды и появления возможности перемещения. Разрушение диэлектрической пробки, каковой является парафин, получается более эффективным. Особенности такого метода частично исследованы в работах [13, 14].

В волноводе возможно распространение нескольких типов волн, но не все из них легко могут быть возбуждены [20]. Особенно если это касается источника электромагнитных волн, проталкиваемого вглубь трубопровода в расплавленную среду. Необходимо изучение всех возможных вариантов. В данном случае рассмотрен вариант распространения в волноводе волны типа H_{11} , у которого наименьшая критическая частота [20].

В последние годы исследования применения электромагнитных полей для решения задач нефтегазодобычи развиваются в направлениях, освещенных в работах [21–28].

Диэлектрические свойства асфальтеносмолопарафиновых отложений

Выбор оптимальных способов борьбы с АСПО зависит от многих факторов, в частности, от способов эксплуатации скважин, термобарических условий в ее стволе, состава и свойств добываемой продукции. Воздействуя на эти факторы и характер взаимоотношений между парафинами, смолами и асфальтенами, можно управлять структурообразованием асфальтеносмолопарафиновых веществ в добываемой жидкости. Одним из приемов, позволяющих воздействовать на них, является использование энергии ВЧ и СВЧ электромагнитного излучения.

Как видно из данных, приведенных в предыдущем разделе, взаимодействие вещества АСПО с электромагнитным полем определяется характером зависимости его диэлектрических свойств от частоты, температуры и давления. Эти зависимости могут быть определены только экспериментальным путем.

АСПО не является простой смесью асфальтенов, смол и парафинов, а представляет собой сложную структурированную систему с ярко выраженным ядром асфальтенов и сорбционно-сольватным слоем из нефтяных смол [1]. Асфальтосмолистые вещества представляют собой гетероциклические соединения сложного гибридного состояния, в состав которых входят азот, сера, кислород и металлы [39, 40].

В таблице представлены свойства исследованных образцов АСПО. Как видно из таблицы, АСПО содержит также механические примеси, в частности песок.

Свойства образцов АСПО

Параметр	Объект	
	Восточно-Перевальное месторождение, «Когалымнефтегаз», пласт А23	Як 3-7, скв. 540 межпромыслового трубопровода Сузун-Ванкор
Асфальтены, %	4	0,6
Смолы, %	9	12
Парафины, %	27	41
Мехпримеси, %	1,4	5
Нефтяной остаток, %	59	41
Температура плавления АСПО, °С	53,6	61
Температура плавления парафина, °С	54	63

Анализ показывает, что диэлькометрический метод, основанный на особенностях взаимодействия ВЧ ЭМП малой мощности с неоднородными средами, является информативным для определения условий выпадения асфальтеносмолопарафиновых веществ в нефти. С этой целью были проведены экспериментальные исследования тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ нефти с добавлением песка и парафина в зависимости от частоты электромагнитных колебаний в диапазоне 30–300 МГц и температуры в диапазоне 25–80 °С методом куметра (рис. 1).

Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ исследованных сред от частоты электромагнитных колебаний подчиняется закономерностям, характерным для полярных жидкостей [27, 41]. Так как в измерительной ячейке поддерживалась одинаковая масса, для нефти с песком $\operatorname{tg} \delta$ зависит от количества песка – чем больше масса песка, тем меньше $\operatorname{tg} \delta$ смеси.

Аппроксимируя данные, представленные на рис. 1, в, можно установить температуру кристаллизации парафина по значению экстремума $\operatorname{tg} \delta$. Например, для нефти с добавлением парафина, она равна 53 ± 1 °С, пласта Як 3-7 – 58 ± 1 °С, пласта Ач3 – 56 ± 1 °С. Более того, с ростом температуры увеличивается $\operatorname{tg} \delta$ сред. Эту закономерность можно использовать для контроля роста кристаллов парафина, а следовательно, для контроля образования АСПО и предотвращения их образования.

Мониторинг изменения температуры асфальтеносмолопарафиновых отложений в скважине под воздействием движущегося электромагнитного излучения

В настоящем разделе проводится численное исследование процесса нагрева и плавления парафиновой пробки в оборудовании нефтяных трубопроводов сверхвысокочастотным электромагнитным излучением.

В силу уравнения (4), полагая, что твердые отложения полностью закупорили трубопровод, решается уравнение теплопроводности

$$\rho c_T \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(r, z, t), \quad (5)$$

где ρ , c_T , λ – плотность, теплоемкость, теплопроводность среды, нагрев и расплавление которой производится.

У волны типа H_{11} цилиндрическая составляющая напряженности электромагнитного поля $E_z = 0$ [14]. Остаются компоненты поля:

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

$$E_\varphi = i \frac{\omega \mu_0}{\chi} H_0 J'_1(\chi r) \cos \varphi \cdot e^{-i\alpha(z-z_0)}; \quad (7)$$

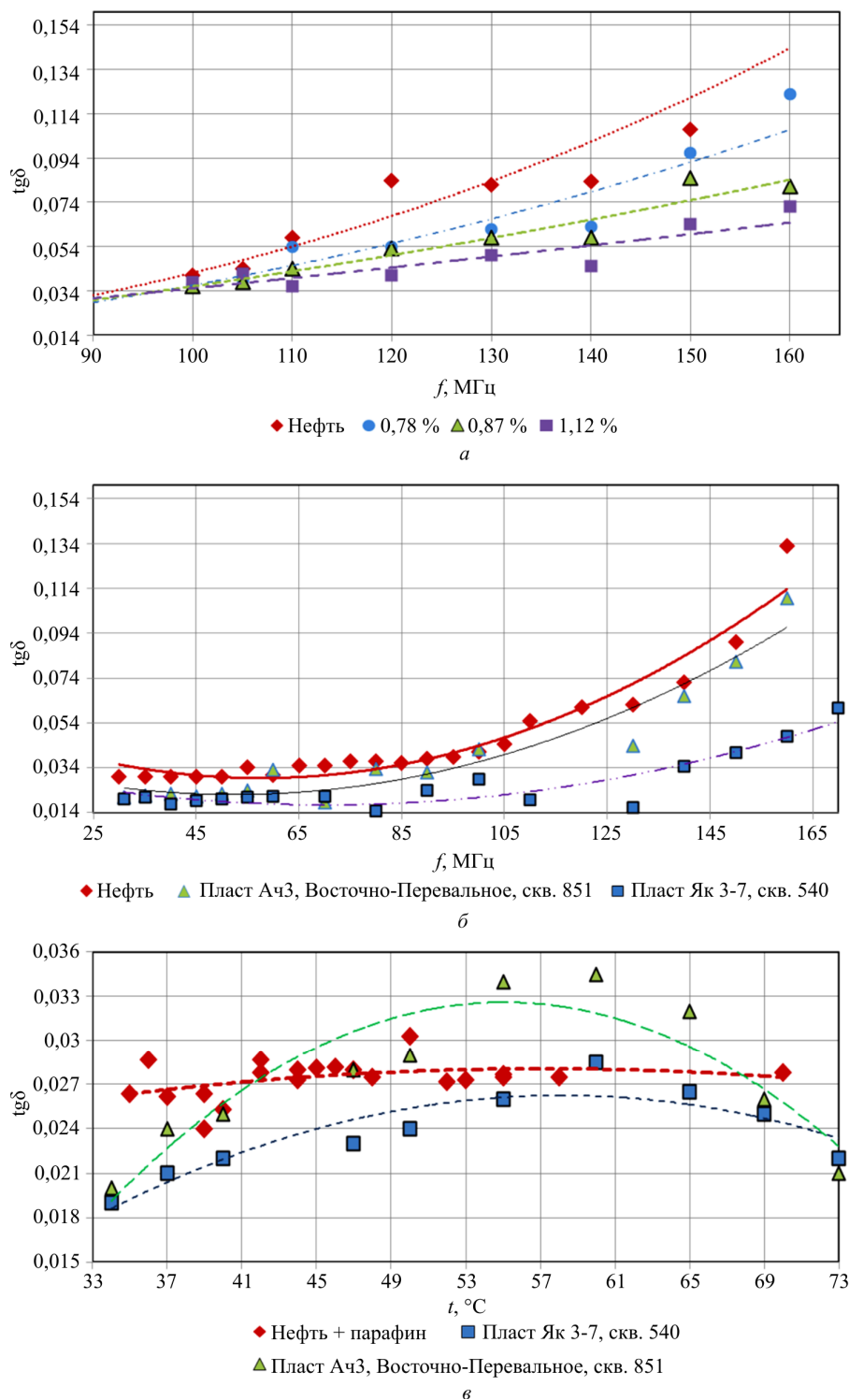


Рис. 1. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь: а – смесей нефти с песком; б – нефти и образцов АСПО от частоты электромагнитных колебаний; в – нефти с дополнительным содержанием парафина (АСПО) на частоте 35 МГц

$$H_r = -i \frac{\alpha}{\chi} H_0 J'_1(\chi r) \cos \varphi \cdot e^{-i\alpha(z-z_0)}; \quad (8)$$

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

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

где i – мнимая единица; ω – круговая частота электромагнитного поля; μ_0 – магнитная постоянная (полагается, что среда в волноводе – немагнитный диэлектрик); χ – поперечный

волновой коэффициент, $\chi = \frac{\mu_n}{R}$; α – коэффи-

циент затухания мощности электромагнитных волн вдоль волновода, ось которого совпадает с осью цилиндрической системы координат r, φ, z , $\alpha = \alpha_V + \alpha_S = 2k_z''$; α_V – коэффициент затухания, обусловленный объемными потерями в диэлектрической пробке,

$\alpha_V = \frac{\omega^2 \varepsilon_0''}{c^2 k_z'}$; α_S – коэффициент затухания,

обусловленный поверхностными потерями в металлических стенках цилиндрического

волновода, $\alpha_S = \frac{\omega \varepsilon_0'}{c R k_z'} \sqrt{\frac{\omega}{2\pi\sigma}}$; c – скорость

света; $\varepsilon_0', \varepsilon_0''$ – действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости парафина, $\varepsilon_0 = \varepsilon_0' + i\varepsilon_0''$; k_z', k_z'' – действительная и мнимая части продольного волнового числа, $k_z = k_z' + ik_z''$; σ – проводимость металла, из которого сделаны стенки труб; H_0 – амплитуда напряженности магнитной составляющей поля; J_1 – функции Бесселя первого порядка; ' – знак производной; z_0 – координата подвижного источника электромагнитных волн; в начале электромагнитного воздействия источник расположен в точке $z = 0$; μ_n – значение n -го корня функции Бесселя; R – радиус волновода. Для волны типа $H_{11} - \mu_n = 1,841$.

В выводах ряда формул, представленных в настоящей работе, использована работа [19].

Как видно из выражений (6)–(10), электромагнитное поле имеет две составляющие напряженности электрического поля E_r и E_φ . Они и определяют распределение тепловых источников, так как плотность тепловых источников пропорциональна сумме квадратов напряженности электрических составляющих

электромагнитного поля. Выражение плотности тепловых источников для неподвижного источника работы имеет вид

$$Q_0 = \frac{\varepsilon_0''}{\pi \operatorname{Re}(k_z \varepsilon_0)} \frac{\mu_n^2}{R^4} P \times \\ \times \left[\frac{|k_z|^2 R^4}{r^2 \mu_n^4} J_1^2 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) \sin^2 \varphi + \frac{|k_z|^2 R^2}{\mu_n^2} \times \right. \\ \left. \times \left(J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) - \frac{R}{r \mu_n} J_1 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) \right)^2 \cos^2 \varphi \right], \quad (11)$$

где P – мощность источника электромагнитных волн.

В выражении (11) использована формула дифференцирования [15]

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

Задача решается численно методом сквозного счета без явного выделения фаз. Плотность и теплопроводность нефти считаются не зависящими от температуры, а теплоемкость при температуре фазового перехода T_S имеет δ -образную особенность

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

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

Плотность мощности объемного тепловыделения записывается в виде

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

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

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

Значение P в выражении (11) не отображает действительную поглощаемую мощность электромагнитной энергии. Чтобы определить ее методом прямоугольников, вычисляется объемный интеграл

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{общ}} = \int_0^H \int_0^{2\pi} \int_0^R Q(r, z) r dr d\varphi dz,$$

вычисляется коэффициент, показывающий, насколько действительная поглощаемая

мощность отличается от задаваемой мощности, затем выражение (11) умножается на этот коэффициент. В интеграле H – длина парафиновой пробки.

На рис. 2 приведена зависимость мнимой части продольного волнового числа k_z'' от частоты электромагнитного поля. Критическая частота H_{11} волны для рассматриваемого цилиндрического волновода с радиусом $R = 0,0775$ м – $f_0 \approx 0,746 \cdot 10^9$ Гц. Мнимая часть продольного волнового числа имеет минимум $k_z'' \approx 0,2874$ м⁻¹ на частоте $f \approx 1,06 \cdot 10^9$ Гц. На рис. 3 приведено распределение плотности тепловых источников $Q(r, \varphi, z = 0)$, нормированных на мощность источника электромагнитных волн, в поперечном сечении волновода для частоты $f = 1,4 \cdot 10^9$ Гц. Для удобства изображения на рисунке цилиндрические координаты преобразованы в декартовы x, y, z . В таком случае круглый волновод представляется как круг, вписанный в прямоугольник. Как видно из рис. 3, распределение тепловых источников в поперечном сечении волновода выглядит как эллипс из-за зависимости от угла φ . От координаты r плотность тепловых источников тоже сильно зависит и тем сильнее, чем выше частота электромагнитных волн, т.е. распределение тепловых источников в поперечном сечении волновода очень неравномерно. Но у этого типа волны есть и преимущество по сравнению с другими – у него наименьшая критическая частота, т.е. им возможен наиболее глубокий прогрев вдоль пробки. Максимум тепловых источников получается на оси волновода, а в целом конфигурация тепловых источников от частоты не зависит. Это тоже дает преимущество, так как источник электромагнитных волн удобнее всего располагать в центре трубы. В продольном направлении плотность тепловых источников падает по экспоненциальному закону.

На рис. 3 еще можно отметить симметрию относительно правой и левой, верхней и нижней половин поперечного сечения волновода. Это позволяет рассматривать процессы только в четверти круга и иметь представление о том, что творится во всем круге. Таким образом, можно экономить ресурсы ЭВМ при численном решении задачи и рассматривать процессы только в 1-м квадранте.

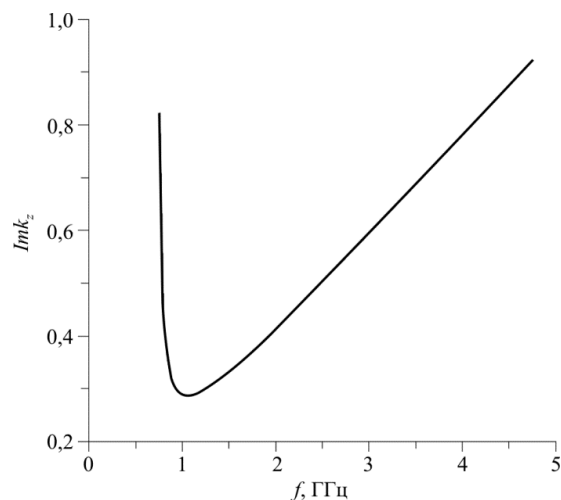


Рис. 2. Мнимая часть продольного волнового числа как функция частоты для металлического цилиндрического волновода, заполненного парафином

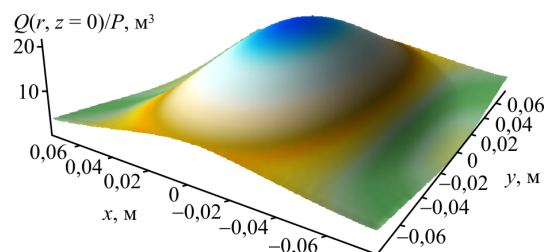


Рис. 3. Поперечное распределение плотности тепловых источников, нормированных на мощность источника в цилиндрическом волноводе

Для решения уравнения (5) принимались граничные условия. На торце пробки $z = 0$ задавался конвективный теплообмен по закону Ньютона

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

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

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

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

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

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

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

В точке $r = 0$ теплообмен отсутствует:

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

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

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

Скорость движения источника электромагнитных волн v вдоль координаты z задавалась постоянной и подбиралась так, чтобы за источником не оставалось зон с нерасплавленным парафином (в расчетах использовалось значение $v = 1,5$ м/ч).

При проведении расчетных исследований использовались параметры высокопарафинистой нефти: $\rho = 950$ кг/м³; $c_0 = 3$ кДж/(кг·К); $\lambda = 0,125$ Вт/(м·К); $L = 3$ МДж/кг; $\kappa = 1,613$ Вт/(м²·К); $\text{Nu} = 1$ (труба в сухом грунте); $\kappa_1 = 0,2$ Вт/(м²·К); $T_0 = 20$ °С;

$T_S = 50$ °С; $H = 5$ м; $P = 6,5$ кВт; $f = 1,4 \cdot 10^9$ Гц; $\varepsilon'_0 = 2,3$; $\text{tg} \delta = \varepsilon''_0 / \varepsilon'_0 = 0,012$; $\sigma = 3,4 \cdot 10^6$ Ом⁻¹·м⁻¹.

Задача решалась неявным методом переменных направлений с равномерной прямоугольной сеткой. Дельта-функция в выражении для теплопроводности аппроксимировалась ступенькой с полушириной, равной 0,4 °С.

Результаты численного моделирования процесса нагрева и расплавления парафиновой пробки «ЭМ крот» для различных моментов времени приведены на рис. 4.

На рис. 4, *а* показаны распределения температуры в поперечном сечении трубопровода в декартовых координатах на различных расстояниях от начала пробки; на рис. 4, *б* – в продольном сечении трубопровода в цилиндрических координатах при различных углах φ до начала движения «ЭМ крот»; на рис. 4, *в* – после начала движения «ЭМ крот» со скоростью $v = 1,5$ м/ч.

«ЭМ крот» начал движение через 135 минут после начала процесса нагрева. На рис. 4, *б*, *в* для удобства изображения все значения вдоль координаты r умножены на 100. Как видно из

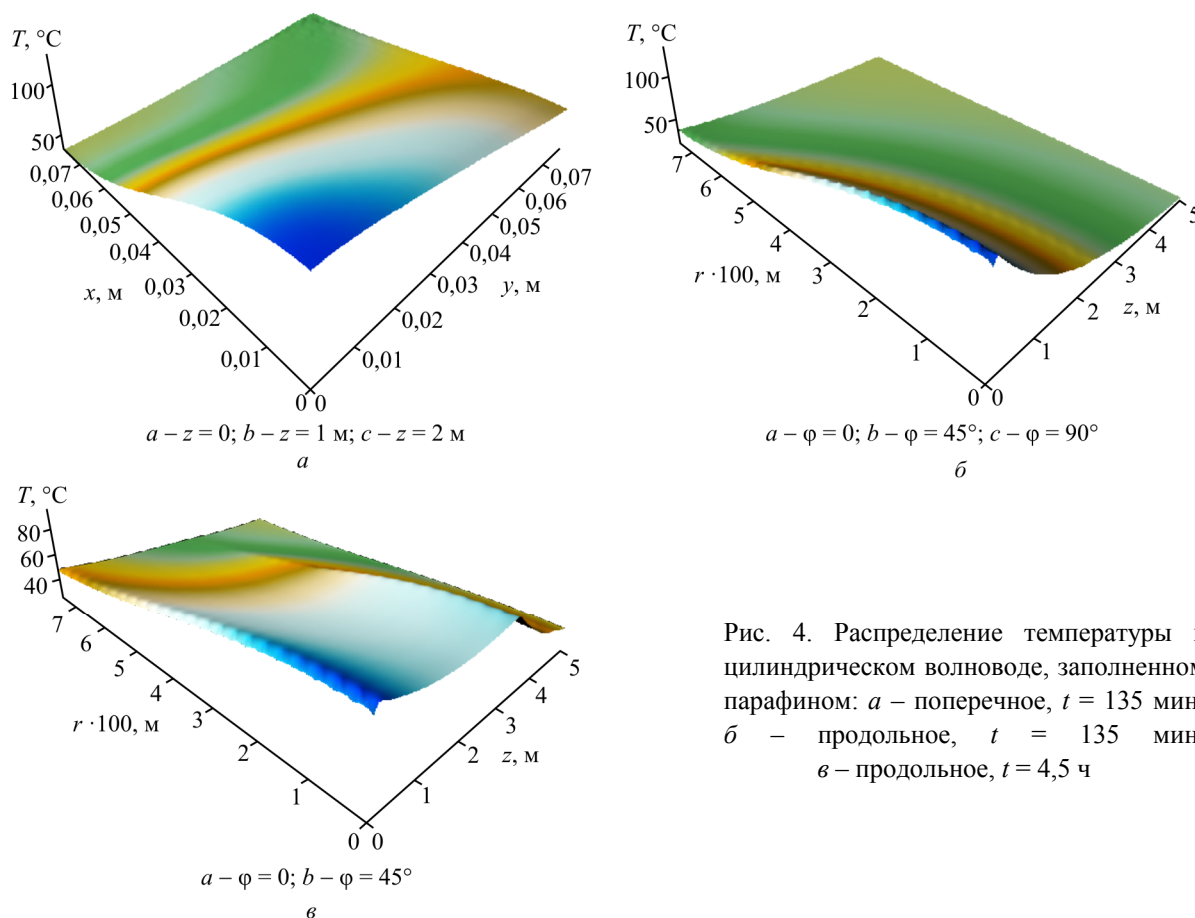


Рис. 4. Распределение температуры в цилиндрическом волноводе, заполненном парафином: *а* – поперечное, $t = 135$ мин; *б* – продольное, $t = 135$ мин; *в* – продольное, $t = 4,5$ ч

рисунков, процесс нагрева среды сильно зависит от распределения плотности тепловых источников. Местоположение первоначального проплавления пробки полностью определяется максимумом плотности тепловых источников. С течением времени распределение температуры и в поперечном направлении вследствие

теплопроводности среды, и в продольном направлении вследствие движения «ЭМ крот» становится более равномерным. Ради расплавления пробки по всему сечению трубопровода движение «ЭМ крот» приходится начинать длительное время спустя после начала нагрева.

Библиографический список

1. Галкин С.В. Методология учета геологических рисков на этапе поисков и разведки нефтяных месторождений // Вестник Пермского национального исследовательского университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – № 4. – С. 23–32.
2. Персиянцев М.Н. Добыча нефти в осложненных условиях. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2000. – 653 с.
3. Краснов В.А. Технология и оборудование для добычи нефти из скважин, осложненных асфальтосмолопарафиновыми отложениями [Электронный ресурс]. – URL: <http://runeft.ru/library/articles/46/5222/> (дата обращения: 15.05.2018).
4. Методы борьбы с отложениями парафина в фонтанных скважинах [Электронный ресурс]. – URL: <http://neftandgaz.ru/?p=425> (дата обращения 15.05.2018).
5. Тронов В.П. Механизм образования смолотпарафиновых отложений. – М.: Недра, 1970. – 192 с.
6. Турбаков М.С., Рябоконь Е.П. Совершенствование эффективности очистки нефтепроводов от отложений парафинов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 17. – С. 54–62. DOI:10.15593/2224-9923/2015.17.6
7. Устькачкинцев Е.Н., Мелехин С.В. Определение эффективности методов предупреждения асфальтосмолопарафиновых отложений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т. 15, № 18. – С. 61–70. DOI:10.15593/2224-9923/2016.18.7
8. Злобин А.А. Изучение механизма магнитной активации нефти для защиты добывающих скважин от асфальтосмолопарафиновых отложений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т. 16, № 1. – С. 49–63. DOI:10.15593/2224-9923/2017.1.6
9. Исследование возможности осаждения асфальтосмолопарафиновых веществ в стволе скважины и призабойной зоне пласта при снижении забойного давления / Т.Н. Юсупова, Е.Е. Барская, Ю.М. Ганеева, И.И. Амерханов, Р.С. Хисамов // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 1. – С. 39–41.
10. Саяхов Ф.Л., Фатыхов М.А., Имашев Н.Ш. Способ электродепарафинизации скважин // Открытия. Изобретения. – 1989. – № 35. – 4 с. А.с. 1314756 СССР.
11. Способ ликвидации ледяных, газогидратных и парафиновых пробок в выкидных линиях скважин и трубопроводах / А.Т. Ахметов, А.И. Дьячук, А.А. Кислицын [и др.] // Открытия. Изобретения. – 1992. – № 3. – С. 120. А.с. 1707190 СССР.
12. Кислицын А.А. Численное моделирование высокочастотного электромагнитного прогрева диэлектрической пробки, заполняющей трубу // ПМТФ. – 1996. – Т. 37, № 3. – С. 75–82.
13. СВЧ-метод устранения парафиновых пробок в нефтяных скважинах / В.А. Балакирев, Г.В. Сотников, Ю.В. Ткач, Т.Ю. Яценко // СВЧ-техника и спутниковые телекоммуникационные технологии: тр. 9-й Крымской и выставки и конференции. – Севастополь, 1999. – С. 422–424.
14. Разрушение асфальтотпарафинистых отложений в нефтяных трубопроводах движущимся источником высокочастотного электромагнитного излучения / В.А. Балакирев, Г.В. Сотников, Ю.В. Ткач, Т.Ю. Яценко // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 41, вып. 9. – С. 1–8.
15. Устранение парафиновых пробок в оборудовании нефтяных скважин и нефтяных трубопроводах высокочастотным электромагнитным излучением / В.А. Балакирев, Г.В. Сотников, Ю.В. Ткач, Т.Ю. Яценко // Электромагнитные явления. – 2001. – Т. 2, № 3 (7). – С. 123–145.
16. Фатыхов М.А. Особенности нагрева и плавления парафина в коаксиальной системе под воздействием высокочастотного электромагнитного излучения // Теплофизика высоких температур. – 2002. – Т. 40, № 5. – С. 802–809.
17. Fatykhov M.A., Fatykhov L.M. Microwave electromagnetic method of melting the paraffin plug in an open coaxial system // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – Vol. 88, iss. 3. – P. 724–729. DOI: 10.1007/s10891-015-1242-2
18. Fatykhov M.A. Research of the depth of heating of highly viscous dielectric liquid under high-frequency electromagnetic field using the method of dimensional theory // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2016. – Vol. 52, iss 1. – P. 79–84. DOI: 10.3103/S1068375516010051
19. Разрушение асфальтотпарафинистых отложений в нефтяных трубопроводах движущимся источником высокочастотного электромагнитного излучения / В.А. Балакирев, Г.В. Сотников, Ю.В. Ткач, Т.Ю. Яценко // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 41, вып. 9. – С. 1–8.
20. Диденко А.Н., Зверев Б.В. СВЧ-энергетика. – М.: Наука, 2000. – 264 с.
21. Experimental studies of Heating rheologically complex fluids with electromagnetic field / L.A. Kovaleva,

R.R. Zinnatullin, A.I. Mullayanov, I.I. Shrubkovskii // High Temperature. – 2016. – Vol. 54, № 4. – P. 612–614. DOI: 10.1134/S0018151X1604012X

22. Davletbaev A., Kovaleva L., Babadagli T. Combining solvent injection electromagnetic heating and hydraulic fracturing for multistage heavy oil recovery // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2016. – Vol. 30, № 2. – P. 207–224. DOI: 10.1080/09205071.2015.1102093

23. Kovaleva L., Musin A. Numerical modeling of heavy hydrocarbon liquid heating // Brazilian Journal of Chemical Engineering. – 2016. – Vol. 33, № 1. – P. 169–175. DOI: 10.1590/0104-6632.20160331s20140101

24. Multi-stage hydraulic fracturing and radio-frequency electromagnetic radiation for heavy-oil production / A.Y. Davletbaev, L.A. Kovaleva, N.M. Nasyrov, T. Babadagli // Journal of Unconventional Oil and Gas Resources. – 2015. – Vol. 12. – P. 15–22. DOI: 10.1016/j.juogr.2015.08.002

25. Bera A., Babadagli T. Effect of native and injected nano-particles on the efficiency of heavy oil recovery by radio frequency electromagnetic heating // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – Vol. 153. – P. 244–256. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.03.051

26. Bera A., Babadagli T. Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen recovery and future prospects: a review // Applied Energy. – 2015. – Vol. 151. – P. 206–226. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.04.031

27. Kovaleva L.A., Zinnatullin R.R. The determination of temperature – frequency and dielectric characteristics of oils // High Temperature. – 2006. – Vol. 44, № 6. – P. 954–956. DOI: 10.1007/s10740-006-0115-y

28. Oil recovery by using electromagnetic waves / M. Kashif, N. Yahya, H.M. Zaid A. Shafie, M. Jasamai, N. Nasir, M.N. Akhter // Journal of Applied Sciences. – 2011. – 11. – P. 1366–1370. DOI: 10.3923/jas.2011.1366.1370

29. Chakma A., Jha K.N. Heavy oil recovery from thin pay zones by electromagnetic heating // Proceedings of the 67th Annual Technical Conference and Exhibition. – Washington, DC, 1992. – P. 10–11. DOI: 10.2118/24817-MS

30. Chhetri A.B., Islam M.R. A critical review of electromagnetic heating for enhanced oil recovery // Petroleum Sci. Technol. – 2008. – 26. – P. 1619–1631. DOI: 10.1080/10916460701287607

31. Gunal O.G., Islam M.R. Alteration of asphaltic crude rheology with electromagnetic and ultrasonic

irradiation // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2000. – 26. – P. 263–272. DOI: 10.1016/S0920-4105(00)00040-1

32. Hamouda A.A., Karoussi O. Effect of temperature, wettability and relative permeability on oil recovery from oil-wet chalk // Energies. – 2008. – 1. – P. 19–34. DOI: 10.3390/en1010019

33. Jarvis J.B., Ingua R. Mathematical model for in situ oil shale retorting by electromagnetic radiation // Fuel. – 1988. – Vol. 67, iss. 7. – P. 916–926. DOI: 10.1016/0016-2361(88)90090-7

34. Electrical-heating-assisted recovery for heavy oil / E.R. Rangel-German, J. Schembre, C. Sandberg, A.R. Kovscek // J. Petroleum Sci. Eng. – 2004. – 45. – P. 213–231. DOI: 10.1016/j.petrol.2004.06.005

35. Sahni A., Kumar M., Knapp R.B. Electromagnetic heating methods for heavy oil reservoirs // Proceedings of the SPE/AAPG Western Regional Meeting. – Long Beach, CA, 2000. – P. 10–11. DOI: 10.2118/62550-MS

36. Soliman M.Y. Approximate solutions for flow of oil heated using microwaves // J. Petroleum Sci. Eng. – 1997. – Vol. 18, iss. 1–2. – P. 93–100. DOI: 10.1016/S0920-4105(97)00007-7

37. Recovery of bitumen from tar sand deposits with the radio frequency process / G.C. Sresty, H. Dev, R.H. Snow, J.E. Bridges // SPE Reservoir Eng. – 1986. – 1. – P. 85–94. DOI: 10.2118/10229-PA

38. Vermeulen F., McGee B. *In situ* electromagnetic heating for hydrocarbon recovery and environmental remediation // J. Can. Petroleum Technol. – 2000. – 39. – P. 24–28. DOI: 10.2118/00-08-DAS

39. Шарифуллин А.В., Байбекова Л.Р., Сулейманов А.Т. Особенности состава и строения нефтяных отложений // Технология нефти и газа. – 2006. – № 6. – С. 19–24.

40. Шарифуллин А.В., Байбекова Л.Р. Состав и структура асфальтосмолопарафиновых отложений Татарстана // Технология нефти и газа. – 2006. – № 6. – С. 34–41.

41. Чистяков С.И., Денисова Н.Ф., Саяхов Ф.Л. Экспериментальное исследование зависимости диэлектрических свойств нефти и ее фракций от частоты // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1972. – № 5. – С. 53–56.

References

1. Galkin S.V. Accounting methods of geological risks on the stage of oil fields exploration. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2012, no.4, pp.23–32.

2. Pershiantsev M.N. Dobycha nefiti v oslozhnennykh usloviyakh [Extraction of oil under complicated conditions]. Moscow, Nedra-Biznestsentr, 2000, 653 p.

3. Krasnov V.A. Tekhnologiya i oborudovanie dlia dobychi nefiti iz skvazhin oslozhnennykh asfaltosmoloparafinovymi otlozheniyami [Technology and equipment for production of oil from wells that are complicated by

wax deposits], available at: <http://runeft.ru/library/articles/46/5222/> (accessed 15 May 2018).

4. Metody borby s otlozheniyami parafina v fontannykh skvazhinakh [Methods of controlling paraffin deposits in fountain wells], available at: <http://neftandgaz.ru/?p=425> (accessed 15 May 2018).

5. Tronov V.P. Mekhanizm obrazovaniia smoloparafinovyykh otlozhenii [Mechanism of formation of resin and paraffin deposits]. Moscow, Nedra, 1970, 192 p.

6. Turbakov M.S., Riabokon E.P. Cleaning efficiency upgrade of oil pipeline from wax deposition. *Perm Journal*

of *Petroleum and Mining Engineering*, 2015, no.17, pp.54-62. DOI:10.15593/2224-9923/2015.17.6

7. Ustkachintcev E.N., Melekhin S.V. Determination of the efficiency of wax deposition prevention methods. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2016, vol.15, no.18, pp.61-70. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.18.7

8. Zlobin A.A. Study of mechanism of oil magnetic activation in order to protect production wells from wax deposition. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2017, vol.16, no.1, pp.49-63. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.1.6

9. Iusupova T.N., Barskaia E.E., Ganeeva Iu.M., Amerkhanov I.I., Khisamov R.S. Issledovanie vozmozhnosti osazhdeniia asfaltosmoloparafinovyykh veshchestv v stvole skvazhiny i prizaboinoi zone plasta pri snizhenii [Identification of wax deposits in the bottom-hole formation zone and wellbore in reducing of the pressure]. *Oil industry*, 2016, no.1, pp.39-41.

10. Saiakhov F.L., Fatykhov M.A., Imashev N.Sh. Sposob elektrodeparafinizatsii skvazhin [Method of electrodeparaffinization of wells]. *Otkrytiia. Izobretenia*, 1989, no.35, 4 p. A.s. 1314756 SSSR.

11. Akhmetov A.T., Diachuk A.I., Kislitsyn A.A. et al. Sposob likvidatsii ledianyykh gazogidratnykh i parafinovyykh probok v vykidnykh liniakh skvazhin i truboprovodakh [The method of eliminating ice, gas hydrate and paraffin plugs in the discharge lines of wells and pipelines]. *Otkrytiia. Izobretenia*, 1992, no.3, pp.120. A.s. 1707190 SSSR.

12. Kislitsyn A.A. Chislennoe modelirovanie vysokochastotnogo elektromagnitnogo progreva dielektricheskoi probki, zapolniaiushchei trubu [Numerical simulation of high-frequency electromagnetic heating of a dielectric stopper filling the pipe]. *PMTF*, 1996, vol.37, no.3, pp.75-82.

13. Balakirev V.A., Sotnikov G.V., Tkach Iu.V., Iatsenko T.Iu. SVCh-metod ustraneniia parafinovyykh probok v neftiannykh skvazhinakh [Microwave method for eliminating paraffin plugs in oil wells]. *SVCh-tehnika i sputnikovye telekommunikatsionnye tekhnologii. Trudy 9 Krymskoi vystavki i konferentsii*. Sevastopol, 1999, pp.422-424.

14. Balakirev V.A., Sotnikov G.V., Tkach Iu.V., Iatsenko T.Iu. Razrushenie asfaltoparafinistykh otlozhenii v neftiannykh truboprovodakh dvizhushchimsia istochnikom vysokochastotnogo elektromagnitnogo izlucheniia [Destruction of asphalto-paraffinic deposits in oil pipelines by a moving source of high-frequency electromagnetic radiation]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2001, vol.41, iss.9, pp.1-8.

15. Balakirev V.A., Sotnikov G.V., Tkach Iu.V., Iatsenko T.Iu. Ustranenie parafinovyykh probok v oborudovanii neftiannykh skvazhin i neftiannykh truboprovodakh vysokochastotnym elektromagnitnym izlucheniem [Removal of paraffin plugs in the equipment of oil wells and oil pipelines by high-frequency electromagnetic radiation]. *Elektromagnitnye iavleniia*, 2001 vol.2, no.3(7), pp.123-145.

16. Fatykhov M.A. Osobennosti nagreva i plavleniia parafina v koaksialnoi sisteme pod vozdeistviem

vysokochastotnogo elektromagnitnogo izlucheniia [Characteristics of heating and melting of paraffin in a coaxial system under the influence of high-frequency electromagnetic radiation]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2002, vol.40, no.5. pp.802-809.

17. Fatykhov M.A., Fatykhov L.M., Microwave electromagnetic method of melting the paraffin plug in an apen coaxial system. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2015, vol.88, is.3, pp.724-729. DOI: 10.1007/s10891-015-1242-2

18. Fatykhov M.A. Research of the depth of heating of highly viscous dielectric liquid under high-frequency electromagnetic field using the method of dimensional theory. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2016, vol.52, iss.1, pp.79-84. DOI: 10.3103/S1068375516010051

19. Balakirev V.A., Sotnikov G.V., Tkach Iu.V., Iatsenko T.Iu. Razrushenie asfaltoparafinistykh otlozhenii v neftiannykh truboprovodakh dvizhushchimsia istochnikom vysokochastotnogo elektromagnitnogo izlucheniia [Destruction of asphalto-paraffinic deposits in oil pipelines by a moving source of high-frequency electromagnetic radiation]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2001, vol.41, iss.9, pp.1-8.

20. Didenko A.N., Zverev B.V. SvCH-energetika [Microwave energy]. Moscow, Nauka, 2000, 264 p.

21. Kovaleva L.A., Zinnatullin R.R., Mullayanov A.I., Shrubkovskii I.I. Experimental studies of Heating rheologically complex fluids with electromagnetic field. *High Temperature*, 2016, vol.54, no.4, pp.612-614. DOI: 10.1134/S0018151X1604012X

22. Davletbaev A., Kovaleva L., Babadagli T. Combining solvent injection electromagnetic heating and hydraulic fracturing for multistage heavy oil recovery. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2016, vol.30, no.2, pp.207-224. DOI: 10.1080/09205071.2015.1102093

23. Kovaleva L., Musin A. Numerical modeling of heavy hydrocarbon liquid heating. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2016, vol.33, no.1, pp.169-175. DOI: 10.1590/0104-6632.20160331s20140101

24. Davletbaev A.Y., Kovaleva L.A., Nasyrov N.M., Babadagli T. Multi-stage hydraulic fracturing and radio-frequency electromagnetic radiation for heavy-oil production. *Journal of Unconventional Oil and Gas Resources*, 2015, vol.12, pp.15-22. DOI: 10.1016/j.juogr.2015.08.002

25. Bera A., Babadagli T. Effect of native and injected nano-particles on the efficiency of heavy oil recovery by radio frequency electromagnetic heating. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol.153, pp.244-256. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.03.051

26. Bera A., Babadagli T. Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen recovery and future prospects: a review. *Applied Energy*, 2015, vol.151, pp.206-226. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.04.031

27. Kovaleva L.A., Zinnatullin R.R. The determination of temperature – frequency and dielectric characteristics of oils. *High Temperature*, 2006, vol.44, no.6, pp.954-956. DOI: 10.1007/s10740-006-0115-y

28. Kashif M., Yahya N., Zaid H.M., Shafie A., Jasamai M., Nasir N., Akhter M.N. Oil recovery by using electromagnetic waves. *Journal of Applied Sciences*, 2011, 11, pp.1366-1370. DOI: 10.3923/jas.2011.1366.1370
29. Chakma A., Jha K.N. Heavy oil recovery from thin pay zones by electromagnetic heating. *Proceedings of the 67th Annual Technical Conference and Exhibition*. Washington, DC, 1992, pp.10-11. DOI: 10.2118/24817-MS
30. Chhetri A.B., Islam M.R. A critical review of electromagnetic heating for enhanced oil recovery. *Petroleum Sci. Technol.*, 2008, 26, pp.1619-1631. DOI: 10.1080/10916460701287607
31. Gunal O.G., Islam M.R. Alteration of asphaltic crude rheology with electromagnetic and ultrasonic irradiation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2000, 26, pp.263-272. DOI: 10.1016/S0920-4105(00)00040-1
32. Hamouda A.A., Karoussi O. Effect of temperature, wettability and relative permeability on oil recovery from oil-wet chalk. *Energies*, 2008, 1, pp.19-34. DOI: 10.3390/en1010019
33. Jarvis J.B., Inguva R. Mathematical model for in situ oil shale retorting by electromagnetic radiation. *Fuel*, 1988, vol.67, iss.7, pp.916-926. DOI: 10.1016/0016-2361(88)90090-7
34. Rangel-German E.R., Schembre J., Sandberg C., Kavscek A.R. Electrical-heating-assisted recovery for heavy oil. *J. Petroleum Sci. Eng.*, 2004, 45, pp.213-231. DOI: 10.1016/j.petrol.2004.06.005
35. Sahni A., Kumar M., Knapp R.B. Electromagnetic heating methods for heavy oil reservoirs. *Proceedings of the SPE/AAPG Western Regional Meeting*. Long Beach, 2000, pp.10-11. DOI: 10.2118/62550-MS
36. Soliman M.Y. Approximate solutions for flow of oil heated using microwaves. *J. Petroleum Sci. Eng.*, 1997, vol.18, iss.1-2, pp.93-100. DOI: 10.1016/S0920-4105(97)00007-7
37. Sresty G.C., Dev H., Snow R.H., Bridges J.E. Recovery of bitumen from tar sand deposits with the radio frequency process. *SPE Reservoir Eng.*, 1986, 1, pp.85-94. DOI: 10.2118/10229-PA
38. Vermeulen F., McGee B. In situ electromagnetic heating for hydrocarbon recovery and environmental remediation. *J. Can. Petroleum Technol.*, 2000, 39, pp.24-28. DOI: 10.2118/00-08-DAS
39. Sharifullin A.V., Baibekova L.R., Suleimanov A.T. Osobennosti sostava i stroeniia neftianykh otlozhenii [Features of composition and structure of oil deposits]. *Tekhnologiya nefti i gaza*, 2006, no.6, pp.19-24.
40. Sharifullin A.V., Baibekova L.R. Sostav i struktura asfaltosmoloparafinykh otlozhenii tatarstana [Composition and structure of asphaltosmolo-paraffin deposits of Tatarstan]. *Tekhnologiya nefti i gaza*, 2006, no.6, pp.34-41.
41. Chistiakov S.I., Denisova N.F., Saiakhov F.L. Eksperimentalnoe issledovanie zavisimosti dielektricheskikh svoystv nefti i ee fraktsii ot chastoty [Experimental study of dependence of dielectric properties of oil and its fractions on frequency]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft i gaz*, 1972, no.5, pp.53-56.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Фатыхов Л.М. Технология очистки скважин от асфальтеносмолопарафиновых отложений путем воздействия высокочастотного и сверхвысокочастотного электромагнитного излучения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т.17, №2. – С.152–165. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.5

Please cite this article in English as:

Fatykhov L.M. Cleaning the well from wax deposition by high-frequency and ultra high-frequency electromagnetic exposure. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2018, vol.17, no.2, pp.152-165. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.5