Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19, № 6. С. 134–143. ISSN 2073-0128 (print)

Petroleum Engineering. 2021. Vol. 19, No. 6, P. 134–143. ISSN 2073-0128 (print)

Научная статья

УДК 662.276; 621.365

doi: 10.17122/ngdelo-2021-6-134-143

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЧ ВОЗДЕЙСТВИЯ КАК МЕТОДА ИНТЕНСИФИКАЦИИ НЕФТЕДОБЫЧИ

Рузил Ахнафович Сафиуллин¹

¹Нефтекамский филиал Башкирского государственного университета, Нефтекамск, Россия, safiullin.66@bk.ru

Аннотация. Исследован процесс добычи из залежи высоковязкой нефти и битума с помощью СВЧ-нагревателей при нагнетании в нее воды или сухого пара. Разработанная конструкция с её теоретическими выкладками и положениями может быть использована в теплоэнергетике и нефтегазовом деле. От известных методов и конструкций предлагаемая модель отличается равномерностью нагрева залежи по всему ее объему, низкой материал- и капиталоемкостью. Проведено численное моделирование разогрева пласта СВЧ-излучением для оценки эффективности электротермического воздействия как метода интенсификации нефтедобычи при вертикальном и горизонтальном способах бурения скважин. Точность расчётов по предлагаемой модели зависит от точности исходных данных по электропроводности и магнитной проницаемости залежи. Для нагрева большого объёма пласта может быть использована поинтервальная дифференциация расположения СВЧ установок как при вертикальном, так и наклонном способах бурения скважин. Сам процесс длительности разогрева пласта должен быть интервальным по времени, с последующей его релаксацией для предотвращения процесса спекания смеси и её коксования.

Ключевые слова

высоковязкая нефть,
СВЧ-нагреватель,
энергоэффективность,
токи высокой частоты

Для цитирования

Сафиуллин Р.А. Оценка эффективности СВЧ воздействия как метода интенсификации нефтедобычи // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19, № 6. С. 134–143. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-6-134-143>.

Original article

EFFICIENCY ESTIMATION OF MICROWAVE IMPACT AS A METHOD FOR OIL PRODUCTION INTENSIFICATION

Ruzil A. Safiullin¹

¹Neftekamsk Branch of Bashkir State University, Neftekamsk, Russia, safiullin.66@bk.ru

Abstract. The article studies the process of extraction of high-viscosity oil and bitumen from deposits using microwave heaters when water or dry steam is injected into it. The developed design with its theoretical calculations and provisions can be used in heat power engineering and oil and gas business. The proposed model differs from the known methods and designs by the uniformity of heating of the deposit throughout its volume, low material and capital intensity. Numerical simulation of reservoir heating by microwave radiation was performed to evaluate the effectiveness of electrothermal treatment as a method of oil production intensification in vertical and horizontal well drilling. The accuracy of calculations based on the proposed model depends on the accuracy of the initial data on the electrical conductivity and magnetic permeability of the deposit. To heat a large deposit volume, the point-to-point differenti-

Keywords

high-viscosity oil, microwave heater,
energy efficiency,
high frequency currents

ation of the location of microwave installations can be used, both for vertical and inclined methods of drilling wells. The process of the formation heating duration should be interval in time, followed by its relaxation to prevent the sintering of the mixture and its coking.

For citation

Safiullin R.A. Otsenka effektivnosti SVCh vozddeistviya kak metoda intensivifikatsii neftedobychi [Efficiency Estimation of Microwave Impact as a Method for Oil Production Intensification]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2021, Vol. 19, No. 6, pp. 134–143. [in Russian]. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-6-134-143>.

Введение

Более 50 лет технология СВЧ-нагрева активно применяется в промышленности, сельском хозяйстве, медицине и биологии, а особенно в технологических процессах нагрева и сушки в рабочих камерах СВЧ технологических установок. Перспективные преимущества данной технологии связаны с улучшением качества изделия при обработке различных материалов, сокращением временного интервала управления технологическим процессом, экономией энергии и затрат на энергию благодаря более высокому КПД, снижению уровня загрязнения окружающей среды, незначительными расходами по содержанию оборудования и более высокой гибкостью таких установок по сравнению с традиционными технологиями нагрева.

Активное внедрение данных технологий в отраслях промышленности и сельского хозяйства впервые началось с начала 60-х гг. XX века после создания СВЧ-установок немецкой и советской школами электротехнологов [1, 2]. Они заложили фундамент теоретической и экспериментальной базы научных исследований в данном направлении и впервые показали инновационные возможности данной технологии при обработке различных материалов, которые сейчас успешно применяются во всем мире [2–4].

В данной работе исследуется процесс СВЧ-нагрева диэлектрического материала в виде залежи тяжелых высоковязких нефтей и природных битумов (ВНПБ). Показаны эффективность и потенциал экономии в установках СВЧ-нагрева и осуществляется математическое моделирование по методу конечных элементов температурного поля, распространяющегося в окружающее пространство от СВЧ-камеры лучевого типа с неограниченным объемом.

Ежегодное сокращение разработки и добычи минерально-сырьевой базы естественного углеводородного сырья привело к тому, что активно разрабатываемые технологии не-

фтегазовых компаний месторождений нефти и газа переместились на территории Западной Сибири, Заполярья и Арктического шельфа. В связи с этим стала актуальной задача дальнейшего развития методов добычи и переработки трудноизвлекаемых запасов, таких как тяжелых высоковязких нефтей, природных битумов и нефтей нефтеносных песков на основе геолого-геофизических разведанных данных на широких территориях Российской Федерации. Как известно, при добыче ВНПБ, мировые разведанные залежи которых оцениваются в 700 млрд т, используются различные термические комплексы, технологии и устройства, обзор которых представлен в работе [5]. Только в Российской Федерации они оцениваются в 9 млрд т и составляют более 50 % от доли всех разведанных запасов нефти, которые намного превышают запасы обычной (легкой) нефти.

Залежи тяжелой нефти и природных битумов разрабатывают различными способами исходя из геолого-геофизического строения пластов, физико-химических свойств пластового флюида, имеющихся запасов и состояния углеводородного сырья, климатических и географических условий, а также технологических и экономических характеристик [5, 6]:

- термическим (шахтовый метод, CHOPS, ГС, VAPEX, водонагнетание);

- холодным (закачка горячей воды, вытеснение нефти паром, CSS, внутрипластовое горение, SAGD, SAP, THAI, N-Solv, забойные электронагреватели);

- физико-химическим (полимерное заводнение, вытеснение нефти ПАВ, комбинированные методы);

- газовым (закачка диоксида углерода);

- гидродинамическими методами (волновое воздействие).

В наши дни активно используются методы паротепловой обработки призабойных зон скважины (ПТОС) и закачки в пласт теплоносителей. Они осуществляются периодической закачкой пара в добывающие скважины

для разогрева призабойной зоны пласта и снижения в ней вязкости нефти. ПТОС приводит к воздействию высокотемпературного пара на залежи ВНПБ и показывает высокую эффективность данной технологии в существующих физико-геологических условиях, т.к. пар имеет более высокую теплоёмкость по сравнению с газом и водой [5]. Распространёнными «холодными» каталитическими способами являются методы CHOPS и VAPEX на основе реагентов-растворителей. Технологии позволяют добывать высоковязкую нефть путем закачки специального растворителя в продуктивный пласт и извлечение продукции с существенно пониженной вязкостью. При газовом способе для снижения вязкости (апгрейдинга нефти) и ее состава, улучшения выхода светлых, уменьшения содержания асфальтосмолистых компонентов, используют растворители на основе диоксида углерода или этана и пропана, нагретых до 50 °С [6]. Гидродинамический метод основан на волновом воздействии (долговременном звуковом воздействии, электромагнитном облучении) залежи ВНПБ [7]. Электротермический способ осуществляют путем подведения электрического тока непосредственно к призабойной зоне добывающей скважины. При этом электротермический кабель или электроизолированная труба используется в качестве проводника, подводящего ток к нефтеносному пласту, и происходит разогрев коллектора высоковязкой нефти [8, 9]. Авторы работ [9–11] предложили комбинированный метод увеличения нефтеотдачи пласта, сочетающий в себе несколько видов воздействия и базирующийся на тепловых методах, использующих пар, горячую воду или электрофизическое тепло. Проанализировав данные литературные источники, можно сделать вывод о том, что для повышения нефтеотдачи таких залежей отечественные и зарубежные специалисты в нефтегазовой промышленности безальтернативно признали преимущества тепловых технологий, как рентабельных, по сравнению со стандартными.

Термические методы добычи ВНПБ имеют ряд недостатков, таких как:

- высокую материало- и капиталоемкость теплоэнергетического оборудования;
- значительные потери тепловой энергии в распределенном продуктивном трубопроводе и скважине;

— сжигание части добываемой нефти и газа для парогенерации;

— использование индуктивных электротермических установок, которые значительно теряют тепловую энергию и могут привести к коротким замыканиям в электроэнергетической системе;

— в районах нефтедобычи значительно ухудшается экологическая обстановка.

Несмотря на это, вопросы истощающихся энергоресурсов являются актуальными наряду с проблемами разработки, добычи и переработки обеднённых пластов высоковязкой нефти и битума.

Постановка задачи

Целью работы является оценка эффективности СВЧ-воздействия как метода интенсификации нефтедобычи при вертикальном и горизонтальном способах бурения скважин.

В нефтегазовой промышленности транспортировка и обработка добываемой тяжелой нефти осложнена из-за ее высокой вязкости и ухудшенного состава. При обслуживании нефтегазопроводной системы одной из важных задач остаётся безопасная эксплуатация и бесперебойная перекачка естественного сырья по продуктовым трубопроводам, обеспечивающим их требуемые реологические свойства [11–13].

В данных работах было указано, что наиболее совершенными и перспективными методами, применяемыми для этого, являются электрофизические методы теплового воздействия на газо- и нефтепроводные системы. Наряду с другими системами, в работах был предложен электротермический метод разрешения данной проблемы, была разработана и описана математическая модель переносного спирального индуктора, которая была успешно апробирована в полевых условиях эксплуатации.

Данные проблемы также обсуждались в работах [14–17]. В них предложен безопасный СВЧ-нагрев забоя нефтяной скважины для интенсификации добычи углеводородного сырья из пласта с помощью устройства спирального СВЧ-нагревателя (ССН). В ходе работы была спроектирована спиральная антенна, работающая на частоте 0,8 ГГц. Сектор углов одновременного обзора антенны составляет не менее $\pm 65^\circ$, коэффициент стоячей волны не превышает 3,5 во всем диапазоне частот.

Разнообразие физических свойств материалов, составляющих компоненты смеси ВНПБ, требуют развития нелинейных задач теплообмена, которые связаны с фазовыми превращениями в объеме пласта и транспортировке [10–14].

В данной работе решается задача исследования воздействия СВЧ-нагрева на ВНПБ и возможности интенсификации её добычи путем равномерного нагрева по объему залежи. ВНПБ состоят из множества химических компонентов углеводородных химических элементов, пустой породы, смолопарафина, воды и нефти. Предположим, что в ней присутствуют только пустая порода (глина), вода, нефть, и процесс ее равномерного нагрева идёт с образованием пара, нагрева глины и уменьшением вязкости ВНПБ.

Основные уравнения

Смесь компонентов ВНПБ обладает электромагнитными характеристиками, описываемыми коэффициентами комплексной диэлектрической и магнитной проницаемостями, имеющими вид [2–4]:

$$\epsilon_{CM} = \epsilon_0(\epsilon_R - j\epsilon_{Im}) = \epsilon_0\epsilon_a, \quad (1)$$

$$\mu_{CM} = \mu_0(\mu_R - j\mu_{Im}) = \mu_0\mu_a. \quad (2)$$

Электротермический процесс преобразования энергии электромагнитной волны в тепловую описывается реактивной составляющей диэлектрической константы $\epsilon_{Im} = tg\delta^E \cdot \epsilon_R$ и коэффициентом диэлектрических потерь диэлектрика $tg\delta^E = \epsilon_{Im} / \epsilon_R$, где $\epsilon_{Im} = \sum_{i=1}^3 c_i \epsilon_{ia} tg\delta^E_i f_i |E_i|^2 / f_{CM} E_{CM}^2$ — комплексная диэлектрическая константа смеси [2]; остальные коэффициенты представлены в работах [12, 17].

Для исследования данного процесса используем дифференциальные уравнения электродинамики Максвелла для описания электромагнитных волн и теплопроводности Фурье:

$$\begin{cases} rot \vec{H} = \partial \vec{D} / \partial t + \vec{\sigma} \vec{E} + \vec{j}_{npo}, \\ rot \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t, \\ c\rho \partial T / \partial t = \lambda \Delta T + q(\vec{r}; t), \end{cases} \quad (3)$$

где c , ρ , λ — коэффициенты теплоёмкости, плотности и теплопроводности;

σ , t , j_{npo} — поверхностная плотность заряда, время и токи проводимости;

$$q(r; t) = \pi \sum_{i=1}^3 c_i \epsilon_{ia} tg\delta^E_i f_i |E_i|^2 / f_{CM} E_{CM}^2 = -div \vec{P}(r; t)$$

— удельная поглощённая мощность смеси при СВЧ-нагреве;

$\vec{P}(r; t)$ — вектор Пойнтинга-Умова;

$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$ — компоненты вектора электрической индукции;

$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$ — компоненты вектора магнитной индукции [1, 2].

Выражение (3) характеризует взаимосвязь вихревых полей $\vec{E}$ и $\vec{B}$ электромагнитного поля и порождаемых ими плотностей энергий магнитного и электрического полей, описанных Максвеллом:

$$W_E = \int_V \frac{(\vec{E}, \vec{D})}{2} dV, \quad W_M = \int_V \frac{(\vec{H}, \vec{B})}{2} dV, \quad (4)$$

где V — где объём пространства, в котором распространяется электромагнитная волна, а подынтегральные выражения характеризуют плотности энергии электрического и магнитного полей, пропорциональных E^2 и B^2 .

Система дифференциальных уравнений (3), описывающая распространение электромагнитных волн, с учётом выражений (1), (2) и (4) упрощается и приводится к дифференциальным уравнениям Гельмгольца, которые являются основой СВЧ-излучателей [1–4]:

$$\nabla^2 E(\vec{r}) = \omega^2 \cdot \mu_{CM} \cdot \epsilon_{CM} \cdot \vec{E}(\vec{r}), \quad (5)$$

$$\nabla^2 H(\vec{r}) = \omega^2 \cdot \mu_{CM} \cdot \epsilon_{CM} \cdot \vec{H}(\vec{r}).$$

Отсюда следует, что излучаемая СВЧ-нагревателем энергия электромагнитных волн определяется системой (3), из которой выводится формула средней по времени мощности излучения или переноса энергии электромагнитной волной по теореме Умова-Пойнтинга в частотном диапазоне:

$$P_{ИЗЛ} = \frac{1}{2} \int_S [\vec{E}, \vec{H}] dS = \frac{1}{2} \int_S P(r, t) dS. \quad (6)$$

Выражение (6) гласит, что, по теореме Умова-Пойнтинга, проникаемая в огибающую поверхность S средняя энергия $P_{ИЗЛ}$, следуя от модуля и фазы, зависит от амплитуды, распределения и соответствующей фазы электрического и магнитного полей. Преобразование поверхностного интеграла в (6), согласно теореме Гаусса, в интеграл по объёму приводит к определению потери активной энергии вследствие конечной проводимости среды, потерь на переполаризацию и перематнивание окружающей среды, т.е. потери мощности электромагнитного излучения:

$$P_{II} = \frac{\sigma}{2} \int_V |\vec{E}|^2 dV + \frac{\omega}{2} \int_V (\epsilon_{im} |\vec{E}|^2 + \mu_{im} |\vec{H}|^2) dV,$$

$$\text{или } P_{II} = 2\omega\epsilon_0 \iiint_V \epsilon_{im} E^2 dV. \quad (7)$$

Полученное выражение определяет закон Джоуля-Ленца, из которого можно получить 3D источник нагрева плотности распределения электромагнитного поля в различных материалах, описываемых физическими свойствами (1) и (2) [17].

Результаты построенной модели

Схема СВЧ-воздействия на забой нефтяной скважины, а также схема установки (излучателя) представлены в работе [17].

Рассмотрим метод конечных элементов для экспериментального моделирования электро-термического процесса с помощью цилиндрической СВЧ-камеры. Удельная мощность электромагнитного излучения затрачивается на диэлектрический нагрев пласта ВНПБ, которая определяется формулой теплового потока

$$q(r;t) = \pi \sum_{i=1}^3 c_i \epsilon_{ia} \operatorname{tg} \delta E_i f_i |E_i|^2 / f_{CM} E_{CM}^2 = \\ = -\operatorname{div} \vec{I}(r;t).$$

На рисунке 1 представлен исследуемый модельный пласт ВНПБ прямоугольной формы шириной w , длиной l , высотой h , находящийся под воздействием СВЧ-нагревателя.

l — многокомпонентная смесь высоковязких нефтей и природных битумов

l — multicomponent mixture of high-viscosity oils and natural bitumen

Рисунок 1. Представительный элемент пласта

Figure 1. Representative formation element

За счет воздействия электромагнитного поля на пласт ВНПБ возникает электромагнитная индукция, описываемая электродвижущей силой (ЭДС), наводимой в контуре и определяемой формулой:

$$E_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{dB}{dt} S = -S \frac{dB}{dt} = -wl \frac{dB}{dt}. \quad (8)$$

Процесс поляризации молекул смеси пласта создает активное сопротивление участка, в котором происходит поглощение энергии электромагнитного поля.

$$R = \rho_{CM}^E \frac{l}{S} = \rho_{CM}^E \frac{l}{wl} = \rho_{CM}^E / w, \quad (9)$$

где ρ_{CM}^E — удельное электрическое сопротивление пласта смеси; $V = whl$ — объём обрабатываемого участка (рисунок 1).

На начальном этапе процесс приводит к появлению поверхностного тока (вихревой короткозамкнутой), проникающего в объём пласта и приводящего к его нагреву:

$$I_T = E_i / R = E_i \frac{w}{\rho_{CM}^E} = -wl \frac{dB}{dt} \cdot \frac{w}{\rho_{CM}^E} = \\ = -\frac{w^2}{\rho_{CM}^E} l \cdot \frac{dB}{dt}. \quad (10)$$

В дальнейшем образуются вихревой ток, проникающий на всю глубину материала диэлектрика, и тепловая энергия, выделяемая нагревательным элементом, которые определяются из уравнения Джоуля-Ленца (7) [12, 13]:

$$Q = I_T^2 R \cdot t = \left(-\frac{w^2 l}{\rho_{CM}^E} \cdot \frac{dB}{dt} \right)^2 \cdot \frac{\rho_{CM}^E}{w} \cdot t = \\ = \frac{w^3 l^2}{\rho_{CM}^E} \cdot \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \cdot t. \quad (11)$$

Эта энергия превращается во внутреннюю энергию пласта — она нагревается, и количество теплоты будет определяться выражением:

$$Q_c = c_{CM} m_{CM} \Delta T = c_{CM} \rho_{CM} V_{CM} \Delta T, \quad (12)$$

где c — удельная теплоёмкость смеси;

m — масса обрабатываемой поверхности;

ΔT — изменение температуры обработки.

Отсюда, приравнявая формулу количества теплоты к величине переменного магнитного поля, получим формулу:

$$c_{CM} \rho_{CM} w l h \Delta T = \frac{w^3 l^2}{\rho_{CM}^E} \cdot \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \cdot \Delta t,$$

$$\Delta T = \frac{w^3 l^2}{\rho_{CM}^E} \cdot \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \cdot \Delta t / c_{CM} \rho_{CM} w l h, \quad (13)$$

где ρ_{CM} — плотность смеси пласта;
 t — время обработки.

Выражение (13) позволяет определить мгновенное значение температуры, следующей из дифференциального уравнения Лапласа:

$$\Delta T = \frac{w^2 l}{c_{CM} \rho_{CM}^E \rho_{CM} h} \cdot \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \cdot \Delta t. \quad (14)$$

Согласно Максвеллу, переменное магнитное поле порождается изменяющимся со временем электрическим:

$$\begin{aligned} \frac{dB}{dt} = \omega B \delta_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau_1} v \right) + \frac{1}{2} \omega B v_m \cos \omega t + \\ + \frac{1}{2} \omega B v_m \cos \left(\omega t - \frac{2\pi x}{\tau_1} v \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Поэтому для нахождения действующего значения квадрата индукции используем формулу:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \approx \omega^2 B^2 \delta_m^2 \cos^2 \left(\omega t - \frac{2\pi x}{\tau_1} v \right); \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{dB}{dt} \right) = \frac{\sqrt{2}}{2} 4\pi^2 f^2 B^2 \delta_m^2 = 2\sqrt{2} \pi^2 f^2 B^2 \delta_m^2. \end{aligned} \quad (16)$$

В итоге можно получить выражение для действующего значения поверхностной температуры пласта ВНПБ [14, 15]:

$$\Delta T_{\partial} = \frac{2\sqrt{2} \pi^2}{c_{CM} \rho_{CM}^E \rho_{CM}} \cdot \frac{w^2 l}{h} \cdot B^2 \delta_m^2 \cdot \Delta t, \quad (17)$$

а КПД установки СВЧ-нагревателя будет определяться выражением:

$$\mu = Q / UI \cdot 100 \%. \quad (18)$$

С помощью метода конечных элементов ПО Solidworks на рисунке 2 представлены электромагнитное распределение источника нагрева, т.е. плотности напряженности поля в 3D модели, а также плотность распределения температурного поля вблизи СВЧ-излучателя, согласно формулам (5). Для этого случая электромагнитное поле создано в цилиндрической СВЧ-камере лучевого типа с неограниченным объемом, которая имеет продольное расположение волновода в направлении излучения.

Согласно представленному рисунку 2, первоначальный нагрев происходит внутри керамической камеры, а затем распространяется во внешнюю среду. Корпус СВЧ-излучателя сделан из жаропрочной керамической зеркальной поверхности и с фокусирующей пластинкой, которая служит для того, чтобы направлять СВЧ-излучение в нужном направлении.

Рисунок 2. Плотность распределения температурного поля вблизи СВЧ-излучателя

Figure 2. Density of distribution of the temperature field near the microwave emitter

нии. Для нагрева большого объема пласта ВНПБ, согласно работам [12, 17], может быть использована поинтервальная дифференциация расположения СВЧ-установок, как при вертикальном, так и наклонном способах бурения скважин. Сам процесс длительности разогрева пласта должен быть интервальным по времени, с последующей релаксацией для предотвращения процесса спекания смеси и её коксования.

Определим распределение теплового потока из системы (3), которая имеет вид: $q(z;t) = 2 \cdot \alpha \cdot F \cdot \Pi_0 \cdot \exp(-2\alpha \cdot z)$ — есть функция плотности мощности источника тепловых потерь; α — коэффициент затухания; F — коэффициент прохождения; Π_0 — вектор Пойнтинга-Умова в вакууме. Начальные и граничные условия для дифференциального уравнения Фурье из системы (3) имеют вид $T(z > 0, 0) = T_0$, где T_0 — температура пласта в начальный момент времени [16].

Решение дифференциального уравнения теплопроводности из системы уравнений (3) с учетом граничных и начальных условий известно и имеет вид:

$$T(z;t) = T_0 + \frac{F_e \Pi_0}{2\alpha \lambda} \exp(-2\alpha z) \cdot [\exp(4\alpha^2 a^2 t) - 1], \quad (19)$$

где a — коэффициент температуропроводности; F_e — коэффициент энергетического прохождения.

Для многокомпонентной ВНПБ, с учётом выражения для функции плотности мощности источника тепловых потерь

$$q(r;t) = \pi \sum_{i=1}^3 c_i \varepsilon_{ia} \operatorname{tg} \delta E_{if_i} |E_i|^2 / f_{CM} E^2_{CM},$$

получим решение (19) в виде [15–17]:

$$T(r;t) = T_0 + \frac{\Pi_0}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{c_i F_{ei}}{2\alpha_i \lambda_i} \exp(-2\alpha r) \times \\ \times [\exp(4\alpha^2 a^2 t) - 1]. \quad (20)$$

На рисунке 3 представлены кривые распределения температуры по формуле (19) при полном расплавлении (при переходе из твердой в жидкую фазу) ВНПБ для данных значений разрешенных стандартных частот и мощности СВЧ-нагрева в 1,5 и 3 кВт.

Рисунок 3. Кривые распределения температуры в тяжелых высоковязких нефтях и природных битумах ВНПБ для частот 433 МГц (1, 2) и 915 МГц (3, 4)

Figure 3. Curves of temperature distribution in high-viscosity oils and natural bitumen for frequencies 433 MHz (1, 2) and 915 MHz (3, 4)

Как видно из графиков рисунка 3, с увеличением толщины пласта температура СВЧ-нагрева уменьшается. Энергия сверхвысокочастотной электромагнитной волны с частотой 915 МГц частично затрачивается на нагрев пласта в жидкой фазе, образующейся при ее плавлении. Причина диссипации электромагнитной энергии в пласте связана с тем, что глубина ее проникновения на этой частоте существенно меньше, чем на частоте 433 МГц. Таким образом, затраты энергии на нагрев и плавление на частоте 433 МГц будут меньше, чем на частоте 915 МГц [14–17].

Из формулы (19) находим период времени до начала плавления на верхней границе пласта высоковязкой нефти $z = 0$ в зависимости от влажности и пористости:

$$t_{пл}(n,k) = \frac{c\rho(n,k)}{4\lambda\alpha^2(n,k)} \ln \left[1 - \frac{2\alpha(n,k)\alpha T_0}{FP_0} \right]. \quad (21)$$

Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы: с увеличением влажности нефтяного пласта период времени до начала плавления уменьшается, а с уменьшением пористости он увеличивается. Данные результаты позволяют заключить, что при определении требований к электрофизическим свойствам диэлектрического материала при СВЧ-плавлении следует особое внимание уделить влажности и пористости материала. Для максимально быстрого достижения жидкой фазы при проектировании СВЧ-устройств нужно предусмотреть подсистему предварительного увлажнения с помощью нагнетаемой жидкости или пара объекта СВЧ-нагрева.

На рисунке 4 представлена кривая распределения температуры пласта в зависимости от расстояния согласно формуле (20).

Рисунок 4. Распределение температуры пласта в зависимости от расстояния

Figure 4. Distribution of reservoir temperature depending on distance

Как видно из графика рисунка 4, происходит постепенный разогрев пласта ВНПБ до определённой температуры, она выходит на плато насыщения — критическую температуру в 290 °C, а затем происходит его плавление. График на рисунке 4 имеет выраженный экстремум температуры на некотором расстоянии от поверхности, т.е. от плоскости раскрытия рупора. С учетом затухания волны в материале залежи пласта данный экстремум обусловлен фазовыми искажениями, возникающими с расстоянием от СВЧ-установки электромагнитной системы, и максимум коэффициента направленного действия соответ-

ствуется оптимальному условию работы данного ССН. При этом значительная доля энергии СВЧ-нагрева затрачивается на нагрев слоя многокомпонентной смеси в жидкой фазе, образующейся при плавлении исходного затвердевшего пласта. Это связано с тем, что глубина проникновения СВЧ-нагрева различается для различных частот излучения, и происходят значительные потери энергии при её поглощении пластом. Поэтому для оптимальной работы данной установки необходимо изначально протестировать её в полевых условиях [17]. Как известно, с повышением температуры вязкость нефти уменьшается, и происходит выпаривание легких фракций нефти и пластовой воды. Углеводородные и углекислые газы, которые образуются в ходе выпаривания, вытесняют нефть из пласта. Процесс теплопереноса и извлечения ВНПБ можно ускорить за счет накачивания воды вместе с окислителем или сухого пара для возможности интенсификации её добычи путем равномерного нагрева по объему залежи.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот. М.: Энергия, 1968. 311 с.
2. Архангельский Ю.С. Установки диэлектрического нагрева. СВЧ установки. Саратов: РИЦ СГТУ, 2008. 343 с.
3. Meredith R. Engineers Handbook of Industrial Microwave Heating. Stevenage: IET, 1998. 380 p. DOI: 10.1049/PBPO025E.
4. Radatz J. The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms. Piscataway: IEEE, 1997. 1278 p.
5. Андреев В.Е., Котенов Ю.А., Хузин Р.Р. Освоение трудноизвлекаемых запасов нефтяных месторождений с применением энерго- и ресурсосберегающих технологий. Уфа: Гилем, 2011. 352 с.
6. Ишкинеев Д.А. Проблемы разработки мелких месторождений высоковязкой нефти Татарстана // Энергоэффективность. Проблемы и решения: матер. XIV Всеросс. научн.-практ. конф. Уфа: Институт проблем транспорта энергоресурсов РБ, 2014. С. 51-53.
7. Хамидуллина А.И., Ибрагимова Д.А., Петров С.М., Закирова З.Р. Влияние термических и каталитических методов добычи на состав и свойства извлекаемой нефти // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 9. С. 124-128.
8. Гуляев П.Н., Соснина Е.В. Технология добычи высоковязкой нефти с использованием долговременного акустического воздействия // Экспозиция Нефть Газ. 2013. № 2 (27). С. 74-68.
9. Марфин Е.А., Кравцов Я.И., Абдрашитов А.А., Галимзянова А.Р. Сравнительная оценка энергетической эффективности «горячих» и «холодных» методов добычи высоковязкой нефти // Нефтепромышленное дело. 2017. № 3. С. 22-26.
10. Загирный Э.А., Маларев В.И., Лакота О.Б., Зырин В.О. Экологические и экономические перспективы применения электротермических комплексов для добычи высоковязкой нефти // Нефтяное хозяйство. 2012. № 11. С. 118-121.
11. Конесев С.Г., Хлюпин П.А., Кондратьев Э.Ю., Безряднова Е.Я. Эффективная электротермическая система парового воздействия на пласт с вязкой, высоковязкой и битуминозной нефтью // Нефтегазовое дело. 2017. Т. 15. № 1. С. 80-84.
12. Сафиуллин Р.А. Разработка установки СВЧ-нагревателя забоя нефтяной скважины и ее тепловой расчет // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: сб. тр. IX междунауд. науч.-тех. конф. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019. С. 386-394.
13. Сафиуллин Р.А., Янгиров И.Ф., Харисова Р.Р., Гарайшина А.У. Методика инженерного расчета электромеханических параметров газопроводного спирального индукционного нагревателя // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: сб. тр. IX междунауд. науч.-техн. конф. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019. С. 548-554.
14. Янгиров И.Ф., Исмагилов Ф.Р., Максудов Д.В., Сафиуллин Р.А. Математическая модель линейного асинхронного индукционного нагревателя нефтепроводов // Технология машиностроения. 2019. № 3. С. 61-66.
15. Safiullin R.A., Yangirov I.F., Khalikov A.R., Safina G.F. Engineering Calculation of Inductor Parameters for Gas Pipelines // Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS): Materials of IEEE International Conference. Ufa, Russia. 2019. P. 620-624. Accession No. 19247187. DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949982.

Выводы

Таким образом, на основе анализа различных существующих и перспективных методов обеспечения добычи высоковязких нефтей и битумов показаны преимущества термического метода, при этом на основе расчетов по математическим и компьютерным моделям показана перспективность применения СВЧ электромагнитного поля, обеспечивающего равномерный прогрев залежи на достаточную глубину. Созданная математическая модель СВЧ диэлектрического нагрева залежи пласта и ее тепловой расчёт позволяют исследовать технологический процесс нагрева, расширяют возможности снижения вязкости ВНПБ и интенсификации их добычи и транспортировки. Результаты работы создают и обосновывают базу для разработки новой технологии термического повышения эффективности нефтедобычи прежде всего в обеднённых пластах с ВНПБ. Она также актуальна и для северных районов, для которых характерна высокая вязкость нефти, где резко повышаются затраты на ее добычу и увеличиваются не извлеченные объемы углеводородного продукта.

16. Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф., Максудов Д.В., Сафиуллин Р.А. Газопроводный спиральный индукционный нагреватель (ГСИН) // Технология машиностроения. 2019. № 12. С. 30-37.

17. Янгиров И.Ф., Сафиуллин Р.А. Инженерный расчёт спирального СВЧ-нагревателя забоя нефтяной скважины // Нефтегазовое дело. 2019. Т. 17. № 5. С. 99-105. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-5-99-105.

REFERENCES

1. Pyushner G. *Nagrev energiei sverkhvysokikh chastot* [Microwave Energy Heating]. Moscow, Energiya Publ., 1968. 311 p. [in Russian].

2. Arkhangelskii Yu.S. *Ustanovki dielektricheskogo nagreva. SVCh ustanovki* [Dielectric Heating Installations. Microwave Installations]. Saratov, RITs CGTU Publ., 2008. 343 p. [in Russian].

3. Meredith R. *Engineers Handbook of Industrial Microwave Heating*. Stevenage, IEEE, 1998. 380 p. DOI: 10.1049/PBPO025E.

4. Radatz J. *The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms*. Piscataway, IEEE, 1997. 1278 p.

5. Andreev V.E., Kotenov Yu.A., Khuzin R.R. *Osvoenie trudnoizvlekaemykh zapasov neftyanykh mestorozhdenii s primeneniem energo- i resursosberegayushchikh tekhnologii* [Development of Hard-To-Recover Oil Reserves Using Energy and Resource Saving Technologies]. Ufa, Gilem Publ., 2011. 352 p. [in Russian].

6. Ishkineev D.A. Problemy razrabotki melkikh mestorozhdenii vysokovязkoi nefiti Tatarstana [Development Problems of Small Fields of High-Viscosity Oil in Tatarstan]. *Materialy XIV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Energoeffektivnost'. Problemy i resheniya»* [Materials of the XIV All-Russian Scientific and Practical Conference «Energy Efficiency. Problems and Solutions»]. Ufa, Institut problem transporta energoresursov RB Publ., 2014, pp. 51-53. [in Russian].

7. Khamidullina A.I., Ibragimova D.A., Petrov S.M., Zakirova Z.R. Vliyanie termicheskikh i kataliticheskikh metodov dobychi na sostav i svoistva izvlekaemoi nefiti [Influence of Thermal and Catalytic Production Methods on the Composition and Properties of Recovered Oil]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta — Herald of Technological University*, 2015, Vol. 18, No. 9, pp. 124-128. [in Russian].

8. Gulyaev P.N., Sosnina E.V. Tekhnologiya dobychi vysokovязkoi nefiti s ispol'zovaniem dolgovremennogo akusticheskogo vozdeistviya [High Viscosity Oil Production Technology with Long-Term Effects of Sound]. *Ekspozitsiya Neft' Gaz — Exposition Oil Gas*, 2013, No. 2 (27), pp. 74-68. [in Russian].

9. Marfin E.A., Kravtsov Ya.I., Abdrashitov A.A., Galimzyanova A.R. Sravnitel'naya otsenka energeticheskoi effektivnosti «goryachikh» i «kholodnykh» metodov dobychi vysokovязkoi nefiti [Comparative Evaluation of Energy Efficiency «Thermal» and «Cold» Methods of Heavy Oil Production]. *Neftpromyslovoe delo — Oilfield Engineering*, 2017, No. 3, pp. 22-26. [in Russian].

10. Zagrivnyi E.A., Malarev V.I., Lakota O.B., Zyrin V.O. Ekologicheskie i ekonomicheskie perspektivy

primeneniya elektrotermicheskikh kompleksov dlya dobychi vysokovязkoi nefiti [Environmental and Economic Prospects for the Use of Electrothermal Complex for the Extraction of Heavy Oil]. *Neftyanoe khozyaistvo — Oil Industry*, 2012, No. 11, pp. 118-121. [in Russian].

11. Konesev S.G., Khlyupin P.A., Kondratiev E.Yu., Bezryadnova E.Ya. Effektivnaya elektrotermicheskaya sistema parovogo vozdeistviya na plast s vязkoi, vysokovязkoi i bituminoznoi nef'tyu [The Effective System of Electrothermal Steam Bed Stimulation with a Viscous, Highly Viscous and Bituminous Oil]. *Neftgazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2017, Vol. 15, No. 1, pp. 80-84. [in Russian].

12. Safiullin R.A. Razrabotka ustanovki SVCh-nagrevatelya zaboya neftyanoi skvazhiny i ee teplovoi raschet [Development of the Installation of the Microwave Heater to the Bottom of the Oil Well and its Thermal Calculation]. *Sbornik trudov IX Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Energetika: upravlenie, kachestvo i effektivnost' ispol'zovaniya energoresursov»* [Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference «Energy: Management, Quality and Efficiency of Energy Resource Use»]. Blagoveshchensk, Amurskii gos. un-t Publ., 2019. pp. 386-394. [in Russian].

13. Safiullin R.A., Yangirov I.F., Kharisova R.R., Garaishina A.U. Metodika inzhenernogo rascheta elektromekhanicheskikh parametrov gazoprovodnogo spiral'nogo induktsionnogo nagrevatelya [Methodology of Engineering Calculation of the Electromechanical Parameters of the Gas Pipeline Coiled Induction Heater]. *Sbornik trudov IX Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Energetika: upravlenie, kachestvo i effektivnost' ispol'zovaniya energoresursov»* [Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference «Energy: Management, Quality and Efficiency of Energy Resource Use»]. Blagoveshchensk, Amurskii gos. un-t Publ., 2019. pp. 548-554. [in Russian].

14. Yangirov I.F., Ismagilov F.R., Maksudov D.V., Safiullin R.A. Matematicheskaya model' lineinogo asinkhronnogo induktsionnogo nagrevatelya nefteprovodov [Mathematical Model of a Linear Asynchronous Induction Heater for Oil Pipelines]. *Tekhnologiya mashinostroeniya — Tekhnologiya Mashinostroeniya*, 2019, No. 3, pp. 61-66. [in Russian].

15. Safiullin R.A., Yangirov I.F., Khalikov A.R., Safina G.F. Engineering Calculation of Inductor Parameters for Gas Pipelines. *Materials of IEEE International Conference «Electrotechnical Complexes and Systems»* (ICOECS). Ufa, Russia. 2019. pp. 620-624. Accession No. 19247187. DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949982.

16. Ismagilov F.R., Yangirov I.F., Maksudov D.V., Safiullin R.A. Gazoprovodnyi spiral'nyi induktsionnyi nagrevatel' (GSIN) [Gas Pipeline Spiral Induction Heater (GPSIH)]. *Tekhnologiya mashinostroeniya — Tekhnologiya Mashinostroeniya*, 2019, No. 12, pp. 30-37. [in Russian].

17. Yangirov I.F., Safiullin R.A. Inzhenernyi raschet spiral'nogo SVCh-nagrevatelya zaboya neftyanoi skvazhiny [Engineering Calculation of Helical Microwave Heater of the Downhole Oil Wells]. *Neftgazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2019, Vol. 17, No. 5, pp. 99-105. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-5-99-105. [in Russian].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ
INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Сафиуллин Рузил Ахнафович, доцент кафедры технических дисциплин, Нефтекамский филиал Башкирского государственного университета, Нефтекамск, Россия

Ruzil A. Safiullin, Assistant Professor of Technical Disciplines Department, Neftekamsk Branch of Bashkir State University, Neftekamsk, Russia

safiullin.66@bk.ru

Статья поступила в редакцию 25.05.2021; одобрена после рецензирования 25.06.2021; принята к публикации 01.11.2021.

The article was submitted 25.05.2021; approved after reviewing 25.06.2021; accepted for publication 01.11.2021.