

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
MATHEMATICAL MODELLING



Научная статья

DOI: 10.18287/2541-7525-2024-30-2-67-80

УДК 532.5-1/-9

Дата: поступления статьи: 22.03.2024
после рецензирования: 25.04.2024
принятия статьи: 15.05.2024

А.Р. Агаев

Тюменский государственный университет,
г. Тюмень, Российская Федерация

E-mail: stud0000249324@study.utmn.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7128-9921>

А.Я. Гильманов

Тюменский государственный университет,
г. Тюмень, Российская Федерация

E-mail: a.y.gilmanov@utmn.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7115-1629>

А.П. Шевелёв

Тюменский государственный университет,
г. Тюмень, Российская Федерация

E-mail: a.p.shevelev@utmn.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0017-4871>

РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ ЭКРАНИРОВАНИЯ
ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕФТЯНОЙ ПЛАСТ

АННОТАЦИЯ

В настоящее время существует проблема истощения запасов легкодобываемой нефти. Для поддержания темпов добычи углеводородов в разработку вовлекаются трудноизвлекаемые запасы, значительную часть которых составляют сверхвысоковязкие нефти, добыча которых занимает относительно малую долю в мировом нефтепромысле в связи со сложностью процесса. Методы, существующие на данный момент, не позволяют с достаточной степенью эффективности производить извлечение тяжелой и сверхтяжелой нефти из пластов. Использование такого метода, как сверхвысокочастотное воздействие, не получило широкого распространения на нефтепромысле, так как для определения оптимальных параметров воздействия необходимо использовать моделирование, что вызывает затруднения с учетом ряда проблем, связанных с особенностью метода. В данной работе рассматривается моделирование процесса сверхвысокочастотного воздействия для повышения эффективности процесса добычи нефти. Статья посвящена моделированию процесса сверхвысокочастотного волнового воздействия на нефтяной пласт с учетом физико-химических параметров залежей в пласте, таких как теплопроводность, диэлектрическая проницаемость нефти и воды (с учетом ее солености) в пласте, в рамках метода с использованием сверхвысокочастотного воздействия впервые определяется величина экранирования материалом труб данного воздействия и оптимальные параметры источника излучения, параметры конструкций труб скважин для эффективного воздействия на залежи нефти с минимальными потерями. Цель работы состоит в определении оптимальных параметров источника сверхвысокочастотного воздействия для достижения рентабельных значений коэффициента извлечения нефти. Применяется физико-математическая модель сверхвысокочастотного воздействия на пласт, основанная на законах электродинамики и плотности объемного тепловыделения в уравнении теплопроводности. Получены зависимости величины экранирования сверхвысокочастотного излучения эксплуатационной трубой скважины от ее толщины, зависимость величины экранирования сверхвысокочастотного излучения эксплуатационной трубой скважины от толщины щели перфорации в данной трубе и зависимость радиуса проникновения электромагнитных волн в пласт от показателя поглощения электромагнитного излучения в пласте. Установлено существование минимального радиуса проникновения СВЧ-излучения в пласт для достижения рентабельных значений коэффициента извлечения нефти свыше 30 %, составляющего 57 м, а также определен показатель поглощения СВЧ-излучения пластом, позволяющий достичь указанного значения радиуса проникновения СВЧ-излучения в пласт.

Ключевые слова: трудноизвлекаемые запасы; коэффициент извлечения нефти; сверхвысокочастотное воздействие; диэлектрическая проницаемость; экранирование сверхвысокочастотного воздействия; поглощение излучения; нефтяной пласт; нефтяные залежи; электромагнитное излучение.

Цитирование. Агаев А.Р., Гильманов А.Я., Шевелёв А.П. Расчет величины экранирования при высокочастотном воздействии на нефтяной пласт // Вестник Самарского университета. Естественная серия / Vestnik of Samara University. Natural Science Series. 2024. Т. 30, № 2. С. 67–80. DOI: <http://doi.org/10.18287/2541-7525-2024-30-2-67-80>.

Информация о конфликте интересов: авторы и рецензенты заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Агаев А.Р., Гильманов А.Я., Шевелёв А.П., 2024

Али Рустамзоа Агаев — студент Школы естественных наук, Тюменский государственный университет, группа 23Ф202-1, 625003, Российская Федерация, г. Тюмень, ул. Володарского, 6.

Александр Янович Гильманов — кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры моделирования физических процессов и систем, Тюменский государственный университет, 625003, Российская Федерация, г. Тюмень, ул. Володарского, 6.

Александр Павлович Шевелёв — кандидат физико-математических наук, доцент, профессор кафедры моделирования физических процессов и систем, Тюменский государственный университет, 625003, Российская Федерация, г. Тюмень, ул. Володарского, 6.

Введение

В настоящее время перспективным направлением для развития нефтедобывающей промышленности является разработка месторождений с тяжелыми нефтями и природными битумами. По причине истощения запасов традиционной легкой нефти, а также вследствие усовершенствования технологий разработки из ранее неиспользовавшихся источников углеводородов существует интерес к залежам высоковязких нефтей и природных битумов [1]. Разработка большего объема нефти по сравнению с «первичной добычей» — в данном режиме за счет внутренней энергии в пласте извлекается из этих самых пластов ископаемое топливо — это цель всех методов повышения нефтеотдачи [2].

В последнее время, исходя из геофизического строения пластов, физико-химических свойств флюидов в нем, имеющихся запасов углеводородного сырья и их состояния, климатических и географических условий, а также технологических и экономических характеристик, используют различные способы для извлечения из залежей высоковязких нефтей и природных битумов [3]. Выделяют следующие способы разработки: термические методы, подразумевающие тепловое воздействие на пласт; холодные, заключающиеся в использовании растворителей, ненагретой воды, а также особенностей способов бурения скважин для разработки пластов; физико-химические, подразумевающие использование различных полимеров и поверхностно-активных веществ (ПАВ); газовые методы (закачка диоксида углерода для снижения вязкости нефти); гидродинамические (циклическое заводнение), волновое или плазменно-импульсное воздействие; комбинированные (сочетание вышеописанных методов).

Однако у этих способов нефтедобычи при использовании для извлечения тяжелых высоковязких нефтей из пластов имеется ряд недостатков: данные способы разработки приводят к увеличенным затратам на производство, малым коэффициентам извлечения нефти, низкому проценту светлых нефтепродуктов в общей массе переработанных углеводородов [4]. Сверхвысокочастотное воздействие (СВЧ-воздействие) как метод интенсификации нефтедобычи может являться эффективным. Его основные преимущества по сравнению с традиционными методами: объемный и избирательный нагрев пласта, большая скорость прогрева, низкая стоимость содержания оборудования, снижение загрязнения окружающей среды при использовании такой технологии. Технология СВЧ-воздействия заключается в следующем: СВЧ-излучатель спускают вглубь горизонтальной или вертикальной скважины. Далее посредством интервального излучения производится нагрев близлежащей части пласта, в частности высоковязкой нефти и природных битумов, с последующей остановкой нагрева для установления термодинамического равновесия в пласте и для предотвращения избыточного нагрева нефти, вследствие чего может произойти ее коксование. Для нагрева широкой области пласта необходимо будет использовать интервальное расположение СВЧ-установок по скважине с учетом распределения тепла в породе данного месторождения. Исходя из вышесказанного, необходимо будет произвести эксперименты по распределению тепла в пласте. От дру-

гих видов электромагнитного излучения, таких как рентгеновское, видимый свет, ИК- и УФ-излучение, СВЧ-излучение отличается большей длиной волны (от 1 мм до 1 м для СВЧ-излучения по сравнению с диапазоном от 1 нм до 1 мм для оптической области электромагнитного спектра) и более низкой энергией квантов.

Следовательно, одним из перспективных способов увеличения интенсификации добычи высоковязких нефтей и природных битумов (ВНПБ) является СВЧ-воздействие на пласт. Вода, нефть, смолотарафин и углеводороды представляют собой высоковязкие нефти и природные битумы. Лабораторные эксперименты с образцами горной породы подтверждают эффективность СВЧ-воздействия [5–9].

Для рассмотрения влияния СВЧ-воздействия на пласт в месторождениях ВНПБ необходимо использовать моделирование, так как значительно большие затраты, по сравнению с моделированием, необходимы для проведения экспериментов в лабораторных установках, а тем более при испытаниях непосредственно на нефтепромысле. Численное моделирование позволяет без существенных затрат рассмотреть разные варианты воздействия на залежи нефти с различными начальными параметрами (например, температуропроводность и теплопроводность, исходная вязкость, плотность, диэлектрическая проницаемость), что позволяет установить целесообразность для увеличения притока в скважину углеводородов применения СВЧ-метода и найти оптимальные параметры воздействия на пласт: размер генератора, частоту излучения, его мощность, а также возможность применения для увеличения эффективности воздействия на углеводороды нелинейных свойств веществ в среде.

1. Современное состояние моделирования СВЧ-воздействия на пласт

В работе [10] было проведено моделирование нагрева тяжелой нефти (плотность в градусах API около 10) с помощью воздействия электромагнитных волн (ЭМВ), генерируемых источником энергии мощностью 1 кВт, на продуктивный пласт, расположенный на глубине примерно 300 м. В данной работе используется предположение о линейной зависимости температуры нагрева пласта от мощности генератора микроволн. Результаты моделирования показали очень небольшой уровень нагрева (от 10 до 30 °C). Однако в данной работе считается, что СВЧ-излучение имеет удовлетворительные характеристики при нагреве пласта.

В статье [11] было представлено численное моделирование СВЧ-излучения для добычи тяжелых нефтей. Гидродинамическая модель позволяет моделировать многофазные тепловые потоки в залежах углеводородов. Исследуется различное расположение скважины с микроволновым излучателем, который моделируется точечным источником энергии. Хотя диэлектрическая проницаемость зависит от температуры и частоты микроволнового излучения, при моделировании не учитывается влияние температуры на диэлектрическую проницаемость. Моделируется слоисто-неоднородный пласт тяжелой нефти толщиной 6 м, состоящий из шести пропластков равной мощности. Как и в случае с парогравитационным дренажем, в пласте тяжелой нефти параллельно бурились две горизонтальные скважины. Нижняя скважина использовалась в качестве добывающей, но вместо закачки пара через верхнюю скважину в ней был установлен излучатель микроволновой энергии, представленный линейным источником. В данной работе было продемонстрировано, что от мощности СВЧ-антенны зависит скорость выделения тепла в пласте, однако лишь до некоторого предела. А также для преодоления проблем, связанных с использованием СВЧ-излучения, исследованы несколько методов, позволяющих повысить эффективность всего процесса. В этом исследовании подробно обсуждается каждое из предложенных решений (создание сети добывающих и нагнетательных скважин, использование циклического СВЧ-воздействия — подразумеваются циклический нагрев и добыча, цикл может быть повторен несколько раз, сочетание СВЧ-воздействия с закачкой воды, а также использование активированного угля для усиления СВЧ-воздействия на пласт, так как активированный уголь обладает более высокой диэлектрической проницаемостью по сравнению с водой) и показано, что в сочетании с источником микроволнового излучения они значительно бы увеличили извлечение тяжелой нефти [11].

В исследовании [12] используется модель излучателя с бесконечно длинным проводом, который служит цилиндрическим генератором радиоволн. Допускается, что источник генерирует цилиндрическое электромагнитное поле (ЭМП), зависящее только от радиального расстояния, и, следовательно, осесимметричную цилиндрическую диаграмму направленности нагрева. Данная модель является подходящей, если протяженный источник применяется для нагрева большого по мощности участка пласта, а в центре воздействия находится область, удаленная от краев излучателя. В этой работе для оценки генерируемых электромагнитных полей (ЭМП) используются уравнения Максвелла. Для оценки плотности рассеиваемой мощности вдали от источника электромагнитного излучения применяется асимптотическая аппроксимация. Авторы в работе рассмотрели возможность использования в будущем таких микровол-

новых поглотителей, как активированный уголь, оксиды нанометаллов и полярные растворители. Это считается необходимым, так как сама по себе нефть плохо поглощает микроволны. Однако авторы [12] не дают ответа на вопрос, как закачивать наночастицы в пласт через ствол скважины во время электромагнитного нагрева.

В [13] рассматривается действие микроволнового нагрева на пласт (рис. 1.1). Реализация микроволнового метода возможна в различных вариантах: применение высокочастотного (ВЧ) и СВЧ-излучения, воздействие непосредственно на призабойную зону при помощи помещенного на забое источника, прогрев может осуществляться через элементы проточной транспортировки оборудования. Для исследований в рамках данной работы было выбрано одно из месторождений, расположенное в Западной Сибири. Исходя из исследований, на данном месторождении возможно достичь сокращения вязкости нефти в призабойной зоне в 10 раз. Однако данные исследования проводились на дегазированном образце, что приводит к завышенным результатам, поэтому аналитически было получено сокращение вязкости в 4 раза. Технология подразумевает помещение источника ВЧ-излучения на поверхности и передачу энергии к забою скважины через систему коаксиальных труб — обсадная колонная — насосно-компрессорные трубы, изолированную диэлектрическими шайбами, вследствие чего за счет диэлектрических свойств породы происходит нагрев призабойной зоны пласта.

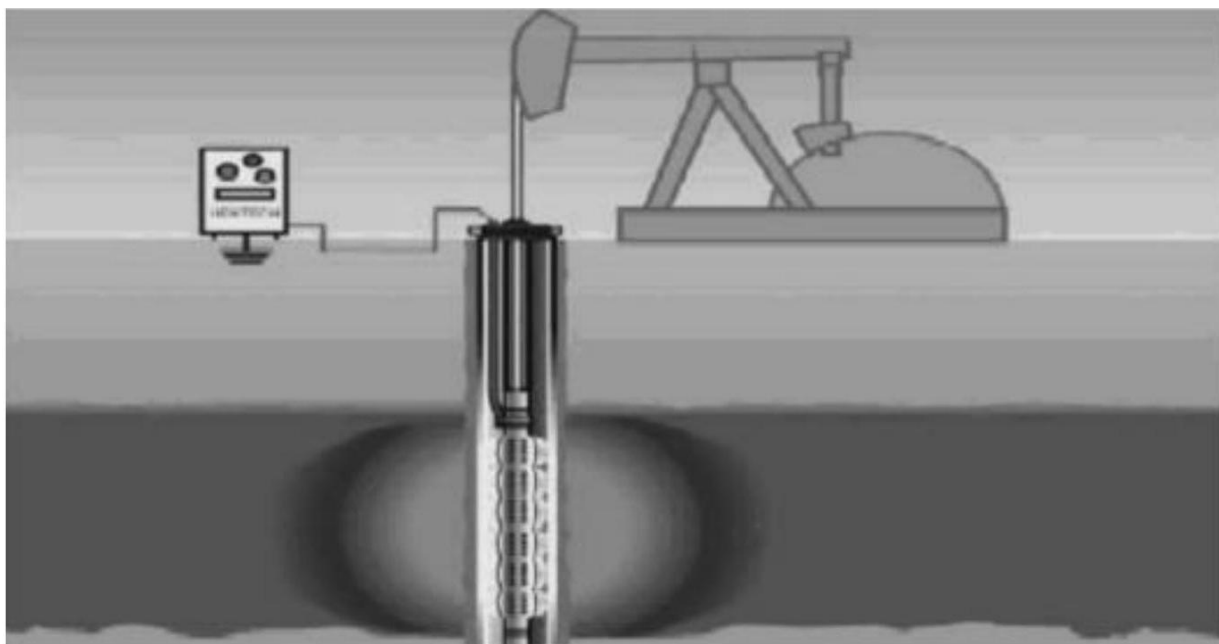


Рис. 1.1. Технология микроволнового нагрева [13]
 Fig. 1.1. Technology of microwave heating [13]

В работе [14] рассматривается модель СВЧ-воздействия с закачкой растворителя в пласт. Основным уравнением, описывающим эти процессы, является уравнение конвективной диффузии. Скорость фильтрации в пласте задается законом Дарси, а распределения давления и температуры рассчитываются по уравнениям пьезопроводности и теплопроводности. В работе показано, что распределение давления и концентрации вдоль вертикальной оси не оказывает заметного влияния на результаты моделирования. На распределение температуры в пласте и по стволу скважины существенно влияет теплопередача в окружающую породу. Это обуславливает необходимость двумерного решения уравнения теплопроводности.

В статье [15] рассматриваются преимущества и недостатки приведенных выше методов, а именно нагрева микроволновым излучением пласта как в отдельности, так и с закачкой растворителя в пласт. В частности, утверждается, что в первом способе значительные потери энергии при передаче ее от устья к забою скважины являются недостатком. Указанный способ неприменим при разработке обводненных залежей, а так как во втором способе СВЧ-волны, излучаемые в залежи, от границы вода — нефть и вода — пустая порода будут отражаться, то эффективность при применении в залежах с высокой обводненностью на поздних стадиях разработки в скважинах с вязкой нефтью и битумом будет низкой — это является недостатком, который влечет за собой возможность выхода из строя оборудования для осуществления данного способа.

В следующей модели [16] введено предположение, что в залежи находятся только глина, нефть и вода, при равномерном нагреве залежи происходят образование пара, уменьшение вязкости высоковязких

нефтей и природных битумов, а также нагрев глины. Помимо этого, необходимо пренебречь движением нефти внутри пласта. Для описания процесса преобразования электромагнитной энергии СВЧ-излучения в тепловую, необходимо использовать дифференциальные уравнения Максвелла и закон Фурье. Распространение электромагнитных волн в пласте с помощью уравнений для плотности энергий электрического и магнитного полей сводится к уравнениям Гельмгольца. Количество энергии, переносимой электромагнитной волной, найдем по теореме Умова — Пойтинга. Преобразование последней формулы по теореме Гаусса в интеграл по объему позволит найти потери мощности излучения, которые будут определять собой закон Джоуля — Ленца. По формуле теплового потока определяется удельная мощность электромагнитного излучения, затрачиваемого на нагрев пласта за счет диэлектрических свойств воды и ВНПБ. Электромагнитная индукция возникает при воздействии на залежи ВНПБ ЭМП. Она описывается электродвижущей силой, наводимой в контуре, причем поглощение энергии ЭМП происходит на участке с активным сопротивлением, которое этот участок имеет благодаря процессу поляризации молекул пластовой смеси. На начальном этапе процесс приводит к появлению поверхностного тока, проникающего в объем пласта и приводящего к его нагреву. Далее в диэлектрик проникает образовавшийся вихревой ток, и выделяемая нагревательным элементом тепловая энергия превращается во внутрипластовую энергию — она определяется из уравнения закона Джоуля — Ленца. С использованием уравнения Лапласа можно определить мгновенное значение температуры в пласте.

На основе расчетов по математическим моделям и компьютерному моделированию в работах [16; 17] можно сделать вывод о перспективности применения СВЧ-обработки залежи для снижения вязкости ВНПБ и для интенсификации их добычи и транспортировки. Однако СВЧ-обработка имеет неоднозначное влияние на вязкость нефти различного состава.

Далее необходимо рассмотреть модель СВЧ-воздействия на пластовые залежи из работы [18]. В ней уже учитывается большее количество параметров — исходная вязкость, температуропроводность и теплопроводность, плотность, диэлектрическая проницаемость, а также фазовые переходы, движение границы раздела фаз, фильтрационное движение в насыщенной пористой среде, возникающее или усиливающееся из-за уменьшения вязкости и теплового расширения жидкой фазы, а также обратное влияние разогрева на поглощение электромагнитного излучения, связанное с изменением диэлектрических параметров среды. Процессы прогрева и фильтрации описываются системой двумерных взаимосвязанных уравнений теплопроводности и пьезопроводности, в которых учитывается конвективный перенос тепла движущейся жидкостью, объемное тепловыделение (вследствие поглощения электромагнитного излучения), зависимость вязкости жидкости от температуры, объемное расширение жидкости вследствие ее разогрева, а также неоднородность среды и скрытая теплота фазового перехода. Исследуемые задачи могут быть отнесены к классу нелинейных задач типа задачи Стефана, осложненных конвективным теплопереносом, объемным тепловыделением, неоднородностью среды и зависимостью физических параметров от температуры.

Модель рассматриваемого процесса, близкую к реальности, возможно построить с учетом всех вышеперечисленных особенностей. Для моделирования тепло- и электрофизические параметры среды являются исходными данными. Изучены достаточно хорошо теплоемкость, теплопроводность, теплота фазового перехода и другие теплофизические параметры многофазных сред и материалов в нефтяной технологии. Однако об электрофизических параметрах (диэлектрической проницаемости и тангенсе угла диэлектрических потерь) нельзя сказать то же самое, особенно в области высоких частот. Поэтому в работе [18] было исследовано поглощение ЭМП в зависимости от частоты излучения и температуры пласта. Выяснилось, что можно добиться того, чтобы в интервале температур вблизи температуры фазового перехода происходило интенсивное поглощение электромагнитной энергии, для этого необходимо подобрать частоту излучения определенным образом, так как для высоковязких и парафинистых нефтей в определенном диапазоне частот наблюдается синергетический эффект для показателя поглощения, приводящий к резкому изменению вязкости этих нефтей. Однако в данной работе вопрос об экранировании достаточно не исследован.

Вышеперечисленные модели имеют ряд недостатков: во-первых, в некоторых из них не учитывается такое физическое явление, как движение нефти внутри пласта (движение границы раздела фаз), и, как следствие, в таких моделях пренебрегается конвективным переносом тепла движущейся жидкостью; во-вторых, в большинстве приведенных выше моделей СВЧ-воздействия на нефтяной пласт не учтено влияние разогрева пласта на поглощение электромагнитного излучения, связанное с изменением диэлектрических параметров среды (в частности, с изменением коэффициента поглощения электромагнитных волн в зависимости от температуры). И в-третьих, ключевым недостатком всех вышеприведенных моделей является отсутствие учета экранирования электромагнитных волн (ЭМВ) трубами в скважинах.

2. Модель экранирования СВЧ-излучения эксплуатационной колонной

Исходя из вышенаписанного, необходимо применить новую модель, которая должна учитывать те факторы, которые не были рассмотрены в предыдущих моделях. Поэтому в рамках данной статьи ставится цель исследовать процесс воздействия ЭМП на пласт с учетом потерь в трубах скважины и зависимость глубины проникновения ЭМВ в пласт от показателя поглощения ЭМВ. Необходимо рассмотреть технологию воздействия на пласт с помощью помещенного на поверхности источника. Более подробно нужно осветить процесс прохождения ЭМВ по системе коаксиальных труб направления, кондуктора и промежуточных колонн. Сделать это необходимо для того, чтобы оценить потери ЭМВ при прохождении по системе труб и в дальнейшем в эксплуатационной колонне. При прохождении излучения по коаксиальным трубам можно рассматривать их в качестве конденсатора. То есть труба выступает в качестве экрана, препятствующего попаданию ЭМП в пласт сквозь трубу. В работе [19] эффективность электромагнитного экрана вводится как отношение напряженностей поля в защищаемой области пространства при отсутствии экрана E_0 и при его присутствии E :

$$E_k = \frac{E_0}{E} = \frac{H_0}{H}, \quad (2.1)$$

где H_0 и H — напряженности магнитного поля при отсутствии экрана и в его присутствии.

Эффективность экранирования сплошной металлической трубой толщиной даже 1 мм очень высока, не говоря уже о толщинах порядка сантиметра. Она определяется по формулам:

$$E_k = E_{k0} + 6,3 \frac{R}{\lambda} E_{kp}, \quad (2.2)$$

$$E_{k0} = 1 + \frac{0,5\mu d}{R}, \quad (2.3)$$

$$E_{kp} = 60\pi\sigma d \left| \frac{\operatorname{sh} \left[(1+i) \frac{d}{\delta} \right]}{(1+i) \frac{d}{\delta}} \right|, \quad (2.4)$$

где E_{k0} — эффективность экранирования при нулевой частоте; R — радиус обсадной колонны; λ — длина волны электромагнитного излучения; E_{kp} — эффективность плоского экрана; μ — относительная магнитная проницаемость материала трубы; d — толщина трубы. Эффективность плоского экрана определяется формулой (2.4), где σ — удельная проводимость материала трубы; δ — толщина поверхностного слоя, то есть расстояние, при распространении на которое амплитуда электромагнитной волны ослабевает в e раз и получает поворот по фазе (отстает) на $\frac{\pi}{2}$, а i — это мнимая единица.

При длине волны электромагнитного излучения λ , равной 100 мм (при частоте излучения f , равной 3 ГГц), для стальной трубы с относительной магнитной проницаемостью μ , равной 200, при радиусе обсадной колонны R , равном 223 мм, и при толщине стальной трубы d 10 мм E_k будет порядка сотен тысяч и более.

Можно рассмотреть модель прохождения СВЧ-излучения сквозь эксплуатационную колонну в призабойную зону скважины, если рассматривать эксплуатационную колонну как металлический экран — металлическую сетку с перфорацией для добычи нефти, при прохождении которой ЭМП происходит потеря его энергии. Для оценки эффективности прохождения излучения сквозь перфорации в колонне необходимо рассчитать поглощение ЭМП эксплуатационной трубой. Из [19] известно, что если стенки экрана относительно толстые, а щели по своим размерам относительно велики, то поле за экраном (в защищаемой области, а в данном случае, наоборот, — в области, в которую должно попасть как можно больше ЭМВ) создается в основном за счет проникновения через эти отверстия. Для металлической сетки-экрана можно найти оптимальную эффективность (в данном случае минимальную эффективность), при которой через перфорации эксплуатационной колонны в призабойную зону будет проходить максимальное количество электромагнитных волн (потери на экранирование будут минимальными). В данной статье рассмотрен экран с одним отверстием с параметрами, заданными ниже (в случае перфорации многочисленными отверстиями при расчете экранирования необходимо учитывать интерференцию волн, которые проходят сквозь отверстия и накладываются друг на друга, однако этот случай в данной работе не рассматривается).

Анализ этих законов [19] приводит к следующей формуле для плоского экрана из сетки:

$$E_{kp} = 60\pi \frac{\lambda}{2a \left| \ln \left(\frac{2a}{D} \right) - 1,2 + \left(\frac{\lambda R_c}{120\pi} \right) [\beta_f(u) + i\alpha_f(u)] \right|}, \quad (2.5)$$

где a — шаг сетки перфорации; D — диаметр излучателя (диаметр проволоки для экрана из металлической сетки — подразумевается слой проволоки между перфорациями); R_c — сопротивление 1

м проволоки по постоянному току, где $\alpha_f(u), \beta_f(u)$ зависят от функций Кельвина 1-го рода (функции Бесселя — Кельвина), они необходимы при рассмотрении распространения электромагнитных волн сквозь щель в экране для определения величины экранирования, а коэффициент u определяется из формулы

$$u = \frac{D}{\sqrt{2\delta}}. \quad (2.6)$$

На практике для δ удобно применять формулу

$$\delta = \frac{A}{\sqrt{f}}, \quad (2.7)$$

где коэффициент A для стали равен $1,6 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{Гц}^{1/2}$.

Шаг сетки перфорации

$$a = X + D, \quad (2.8)$$

так как толщина слоя металла X между перфорациями входит в шаг сетки, помимо ширины отверстия.

Из (2.7) $\delta = 0,29 \text{ мкм}$.

В работе [19] установлено, что при $u > 50$ с большой точностью можно считать, что коэффициенты вычисляются по формулам:

$$\alpha_f(u) = \beta_f(u) = \frac{u}{2\sqrt{2}}. \quad (2.9)$$

Возможно считать $u > 50$ в ниже написанных расчетах, так как уже при D , равном 1 мм, величина u примерно равна 2400, а при больших значениях D коэффициент u увеличивается.

3. Интегральный подход к расчету экранирования

Первый модельный случай расчета: $R = 10 \text{ см}$, $f = 3 \text{ ГГц}$, ширина перфорационных отверстий $y = 0,5 \text{ мм}$, а длина перфорации $x = 100 \text{ мм}$, $D = 25 \text{ мм}$. Тогда $E_k \approx 68,3$.

Исходя из выше написанного, получается, что экранирование эксплуатационной колонной ослабляет дошедшее до забоя излучение в десятки раз, что существенно снижает эффективность воздействия ЭМВ на пласт. При этом двухстенный экран при $d \ll \delta$ из сетки в $E_1 \frac{4\pi d}{\lambda}$ раз эффективнее одностенного из той же сетки (при $E_1 \frac{4\pi d}{\lambda} > 1$, где $E_1 = E_p$ — эффективность одностенного экрана).

Стоит отметить, что в общем случае величина заряда и плотность тока в различных точках отверстия отличаются и эти величины взаимосвязаны. Лишь в случае, когда размеры щели много меньше четверти длины волны, можно рассматривать задачи проникновения электрической и магнитной составляющих поля через отверстие самостоятельно как квазистатические. Далее считая, что электромагнитная волна падает на экран под прямым углом, а ее электрическая составляющая перпендикулярна по направлению ширине трубы, и зная, что в нефтепромысле при прямоугольной перфорации используют щели с шириной порядка 1 мм и менее, можно утверждать, что ширина перфорации в трубе много меньше четверти длины волны, следовательно, ширина перфорации практически не влияет на величину экранирования электромагнитной волны эксплуатационной колонной. Теперь необходимо рассмотреть зависимости глубины проникновения ЭМП в пласт в зависимости от толщины трубы; глубину проникновения ЭМП в пласт в зависимости от длины щели перфорации. Эти зависимости рассматриваются при фиксированных прочих параметрах на тех же значениях, что и в первом модельном случае, они приведены на рис. 3.1 и 3.2.

Исходя из вида рис. 3.1, можно сделать вывод о практически линейной зависимости величины E_{kp} от толщины эксплуатационной трубы (в диапазоне от 0,005 до 0,25 м) при фиксированных частоте излучения, радиусе стальной трубы, длине и ширине перфорации в трубе. Исходя из рис. 3.2, можно сделать вывод об экспоненциальной зависимости величины E_{kp} от длины щели перфорации.

Теперь необходимо определить, с какой скоростью электромагнитные волны будут затухать при прохождении продуктивного пласта. В работе [18] приведено описание процесса разогрева с помощью уравнения теплопроводности:

$$c_r \rho \frac{\partial T}{\partial t} + m c_l \rho_l \left(v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\alpha W \psi(z)}{2\pi r h} \exp[\alpha(b-r)], \quad (3.1)$$

где c_r , c_l — удельные теплоемкости насыщенной пористой среды и жидкости в пласте; ρ , ρ_l — плотности породы и жидкости в пласте; T — температура; t — время; r — радиальная координата; z — вертикальная координата; v_r и v_z — проекции скорости фильтрации на радиальную и вертикальную оси; λ — коэффициент теплопроводности пласта; α — показатель поглощения; W — мощность источника электромагнитного излучения; $\psi(z)$ — функция, описывающая распределение плотности электромагнитного излучения по вертикали; b — радиус скважины; h — мощность (толщина) пласта.

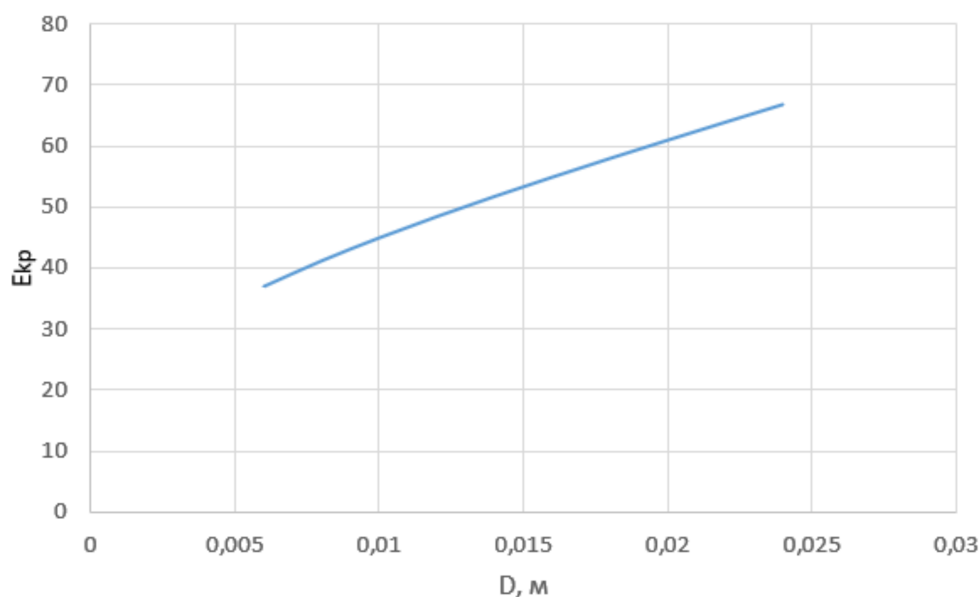


Рис. 3.1. Зависимость величины экранирования от толщины эксплуатационной трубы
 Fig. 3.1. Dependence of the shielding value on the thickness of the service pipe

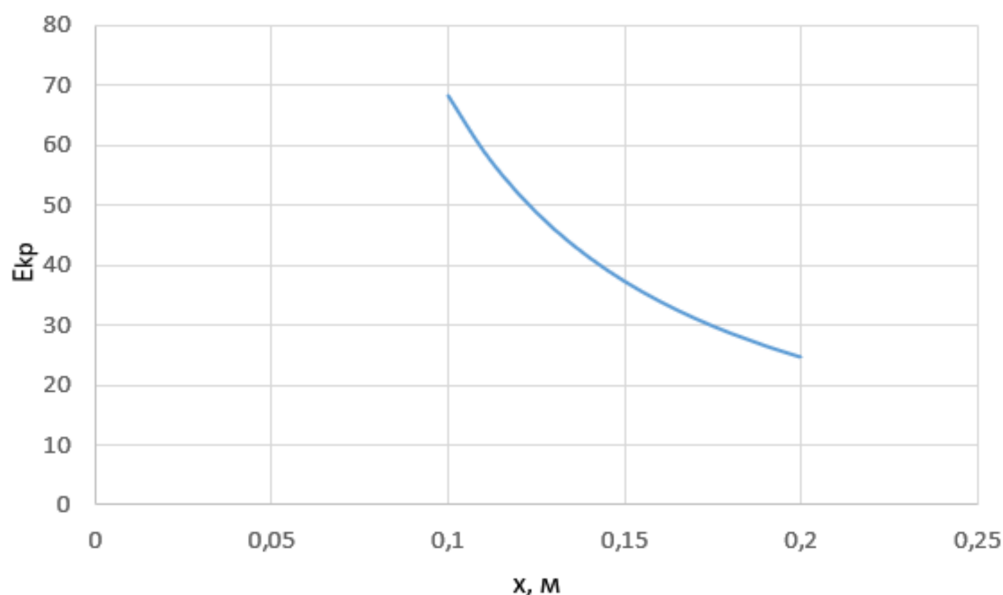


Рис. 3.2. Зависимость величины $E_{кр}$ от длины щели перфорации
 Fig. 3.2. Dependence of $E_{кр}$ value from length of perforation hole

В уравнении (3.1) последнее слагаемое выражает плотность объемного тепловыделения, возникающего вследствие поглощения электромагнитного излучения (закон Бугера — Ламберта с учетом геометрической расходимости излучения) в зависимости от высоты источника излучения. Необходимо ввести в описание процесса прохождения ЭМВ сквозь пласт такое понятие, как «радиус прогрева» — можно обозначить его r_T . Этот показатель является определением того, на каком расстоянии от трубы скважины (уже после проникновения ЭМВ сквозь щели) плотность объемного тепловыделения уменьшится в e раз, где e — число Эйлера. При этом в данном уравнении показатель поглощения электромагнитного излучения зависит от радиуса прогрева, что непосредственно наблюдается при поиске первой производной от плотности объемного тепловыделения по α :

$$\frac{\partial \left(\frac{\alpha W \psi(z)}{2\pi r h} \exp[\alpha(b-r)] \right)}{\partial \alpha} = 0. \quad (3.2)$$

После раскрытия производной сложной функции и проведения математических преобразований получается, что

$$\alpha = \frac{1}{r - b}. \quad (3.3)$$

Однако при подстановке значения радиуса прогрева в формулу (3.3) искомое значение радиуса, зависящее от α , отличается от радиуса прогрева, что затрудняет количественную оценку поглощения ЭМВ при прохождении пласта. Поэтому необходимо ввести обозначение для искомого значения радиуса, отличающегося от радиуса прогрева, подставляемого в формулу (3.3). Эта величина будет называться радиусом проникновения ЭМВ в пласт — r_{in} , т. е. это расстояние от трубы скважины, при котором величина воздействия ЭМВ на пласт уменьшается в e раз. Необходимо вначале найти зависимость показателя поглощения от радиуса проникновения и найти такое значение r_{in} , при котором $r_{in} = r_T$. Зависимость радиуса проникновения от показателя поглощения приведена на рис. 3.3.

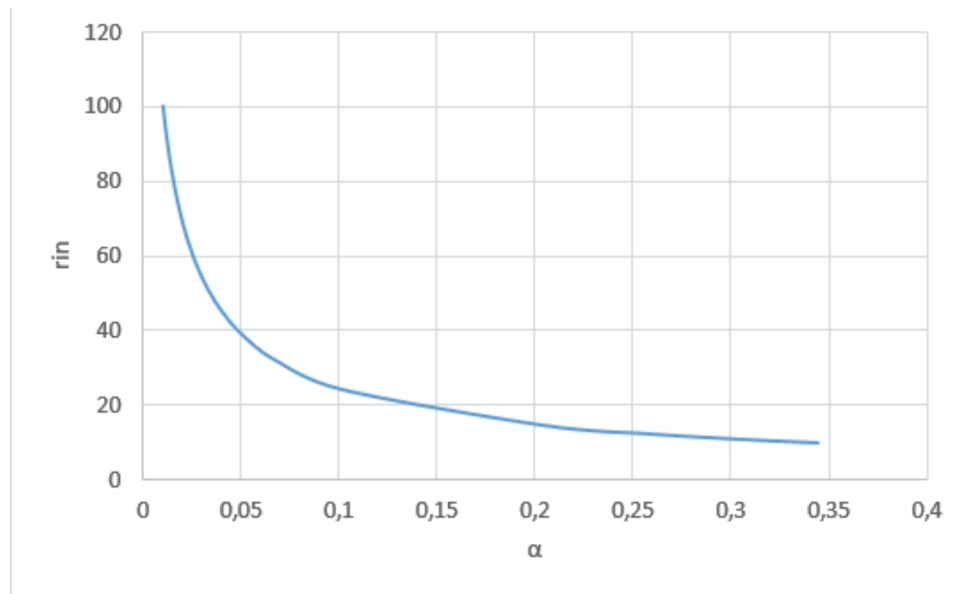


Рис. 3.3. Зависимость радиуса проникновения ЭМВ от показателя поглощения
 Fig. 3.3. Dependence of the electromagnetic wave penetration radius on the absorption factor

На рис. 3.3 представлена зависимость r_{in} от α . При определении необходимого радиуса проникновения для минимальной рентабельности разработки необходимо считать, что коэффициент извлечения нефти (КИН) больше или равен 30 %. Если считать поверхность продуктивного пласта имеющей форму цилиндра радиуса 100 м, то, исходя из минимально необходимого КИН, можно утверждать, что при $r_{in} = 57$ м коэффициент извлечения будет примерно равен 30 %. При таком r_{in} показатель поглощения $\alpha = 0,026$. Теперь важно понять, для каких нефтей показатель поглощения будет равен 0,026 или меньше. Так как коэффициент диэлектрической проницаемости воды больше почти в 40 раз, чем у чистой нефти, можно утверждать, что чем больше процентное содержание воды в нефтяном пласте, тем больше показатель поглощения нефти.

Статическая диэлектрическая проницаемость смесей воды и нефти (у воды $\epsilon = 81$, у нефти $\epsilon = 2 - 4$) зависит от их объемного соотношения, то есть от водонасыщенности нефти. Диэлектрическая проницаемость же воды зависит от концентрации и состава растворенных в ней солей. Для бинарных электролитов (это электролиты, у которых молекулы распадаются в электролите на два иона) можно использовать формулу Фалькенгагена [20]:

$$\epsilon = \epsilon_0 + 3,79\sqrt{C}, \quad (3.4)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость раствора; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость чистой воды; C — концентрация раствора в моль/дм³.

Также известно [18], что высокочастотный предел диэлектрической проницаемости стремится к единице, тогда можно рассмотреть этот случай и утверждать, что показатель поглощения будет даже меньше того, что рассчитан ниже. В таком случае формула изменяет вид. Ширина электромагнитного спектра β является параметром источника излучения, который заранее известен. Исходя из записанных утверждений, можно найти показатель поглощения:

$$\alpha = \frac{\omega(\epsilon_s - \epsilon_\infty)}{c\sqrt{2(\epsilon_s + \epsilon_\infty)}} \operatorname{tg} \left[(1 - \beta) \frac{\pi}{4} \right], \quad (3.5)$$

где ε_s и ε_∞ — диэлектрическая проницаемость раствора при статическом пределе и при бесконечной частоте соответственно; c — скорость света в вакууме; ω — циклическая частота излучения.

Также можно найти действительную часть диэлектрической проницаемости из [18]. С увеличением частоты поля количество поляризующихся частиц уменьшается (отпадают наиболее медленные виды поляризации), поэтому действительная часть диэлектрической проницаемости с повышением частоты постепенно уменьшается и стремится к единице:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau_0)^2}. \quad (3.6)$$

Высокочастотные электромагнитные поля взаимодействуют с задержкой во времени процессов поляризации вещества по сравнению с изменением параметров самого внешнего поля. В конечном счете процесс поляризации сопровождается интенсивным поглощением энергии поля в виде тепловой.

В силу всего вышесказанного, можно утверждать, что частоту $f = 3$ ГГц, можно считать относительно высокой и, соответственно, диэлектрическую проницаемость можно считать стремящейся к единице (в реальности, разумеется, эта величина больше, а это значит, что результаты будут еще более благоприятными, чем рассчитано ниже).

В таком случае при β источника излучения, равной 40, $\omega \approx 18,85 \cdot 10^9$ рад/с (из условия $\omega = 2\pi f$).

При вычислении количества солей в пластовых водах можно заменить все соли, растворенные в пластовой воде, эквивалентным количеством той, которая находится в наибольшем количестве в пластовой воде. Довольно часто такой солью является хлористый натрий. Если рассматривать соленую воду с соленостью 10 г/л, то будет получена соленость раствора воды и соли: $\varepsilon \approx 81,5$, где учтена диэлектрическая проницаемость NaCl 6,3. Если считать для смеси нефти и воды с водонасыщенностью 30 % и диэлектрическую проницаемость нефти без воды в месторождении равной 2, то $\varepsilon_\infty \approx 1$, $\varepsilon_s = 25,85$, тогда $\varepsilon' \approx 1$, $\alpha = 221,48$.

Заключение

Проведенное исследование эффективности проникновения СВЧ-излучения в пласт позволяет сделать следующие выводы.

Показано, что величина экранирования СВЧ-излучения линейно зависит от толщины эксплуатационной колонны скважины, причем при толщине 0,01 м напряженность электромагнитного поля уменьшается в 50 раз.

Выявлено, что зависимость экранирования СВЧ-излучения от длины щели перфорации является практически экспоненциальной.

Установлен минимальный радиус проникновения СВЧ-излучения в пласт для достижения рентабельных значений коэффициента извлечения нефти свыше 30 %, составляющий 57 м.

Определен показатель поглощения СВЧ-излучения пластом, позволяющий достичь указанного значения радиуса проникновения СВЧ-излучения в пласт.

Литература

- [1] Шагапов В.Ш., Юмагулова Ю.А., Гиззатуллина А.А. Моделирование динамики давления и температуры в пласте с высоковязкой нефтью при нагревании // Вестник Самарского университета. Естественная серия. 2016. № 1–2. С. 62–68. URL: <https://journals.ssau.ru/est/article/download/4266/4165?ysclid=lw4tkgdn8g660351312>.
- [2] Астафьев В.И., Касаткин А.Е. Задача о продвижении водонефтяного контакта при поршневом вытеснении нефти водой в двоякопериодической области // Вестник Самарского университета. Естественная серия 2014. № 10 (121). С. 116–129. URL: <https://www.mathnet.ru/rus/vsgu456>.
- [3] Ишкинеев Д.А. Проблемы разработки мелких месторождений высоковязкой нефти Татарстана // Энергоэффективность. Проблемы и решения: материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции. Уфа: Институт проблем транспорта энергоресурсов РБ, 2014. С. 51–53.
- [4] Хасанов И.И., Шакиров Р.А., Леонтьев А.Ю., Полетаева О.Ю., Бабаев Э.Р., Мамедова П.Ш. Обзор современных методов воздействия на реологические свойства тяжелых высоковязких нефтей // НефтеГазХимия. 2018. № 3. С. 49–54. DOI: <https://doi.org/10.24411/2310-8266-2018-10305>. EDN: <https://www.elibrary.ru/ytonvb>.
- [5] Абдуллина В.А., Фатыхов М.А. Расплавление твердых отложений в трубопроводах движущимся источником электромагнитного поля // Нефтегазовое дело. 2012. № 6. С. 60–68. URL: https://ogbus.ru/files/ogbus/authors/AbdullinaVA/AbdullinaVA_1.pdf.

- [6] Кислицын А.А. Численное моделирование высокочастотного электрического прогрева диэлектрической пробки, заполняющей трубу // Прикладная механика и техническая физика. 1996. Т. 37, № 3. С. 75–82. URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/fc4/fc4acdffd504d4093780dc085d72c859.pdf?ysclid=lw4us007i7164093121>.
- [7] Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р., Муллаянов А.И., Мавлетов М.В., Благодичнов В.Н. Эволюция микроструктуры водонефтяных эмульсий в высокочастотных и сверхвысокочастотных электромагнитных полях // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51, № 6. С. 952–955. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0040364413060173>. EDN: <https://www.elibrary.ru/rekczl>.
- [8] Hasakir B., Acar C., Demiral B., Akin S. Microwave assisted gravity drainage of heavy oils // International Petroleum Technology Conference Paper IPTC 12536 presented at the International Petroleum Technology Conference held in Kuala Lumpur, Malaysia, 3–5 December 2008. Kuala Lumpur, 2008. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.2523/12536-MS>.
- [9] Alomair O., Alarouj M., Althenayyan A., Alsaleh A., Mohammad H., Altahoo Y., Alhaidar Y., Alansari S., Alshammari Y. Improving heavy oil recovery by unconventional thermal methods // Society of Petroleum Engineers Conference Paper SPE 163311 presented at the SPE Kuwait International Petroleum Conference held in Kuwait City, Kuwait, 10–12 December 2012. Kuwait City, 2012. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.2118/163311-MS>.
- [10] Callarotti R.C., Paez E. Microwave dielectric properties of heavy oil and heating of reservoirs // Society of Petroleum Engineers Conference Paper SPE-169937-MS presented at the SPE Biennial Energy Resources Conference held in Port of Spain, Trinidad, 9–11 June 2014. 2014. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.2118/169937-MS>.
- [11] Othman H.A., Soliman M.Y., Settari A.T. Techniques to improve the use of microwave to produce heavy oil reservoirs: numerical study // Society of Petroleum Engineers Conference Paper SPE-188118-MS presented at the SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition held in Dammam, Saudi Arabia, 24–27 April 2017. Dammam, 2017. P. 1–24. DOI: <https://doi.org/10.2118/188118-MS>.
- [12] Bapat S., Akhter N. Optimization of heavy oil recovery by radio frequency heating: a theoretical approach with experimental modeling // Society of Petroleum Engineers Conference Paper SPE-197232-MS presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference held in Abu Dhabi, UAE, 11–14 November 2019. Abu Dhabi, 2019. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.2118/197232-MS>.
- [13] Березовский Ю.С., Тетерин В.С., Деева В.С., Слободян С.М. Перспективы применения технологии высокочастотного воздействия на добычу тяжелых углеводородов // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2015. Т. 2, № 2. С. 356–360. DOI: <https://doi.org/10.12737/15083>.
- [14] Kovaleva L., Davletbaev A., Minnigalimov R. Recoveries of heavy oil and bitumen techniques with the radio frequency electromagnetic irradiation // Society of Petroleum Engineers Conference Paper SPE 138086 presented at the SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition held in Moscow, Russia, 26–28 October 2010. Moscow, 2010. P. 1–11. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/138086-RU>.
- [15] Мусин А.А., Муллаянов А.И., Ковалева Л.А., Валиев Ш.М., Благодичнов В.Н., Зиннатуллин Р.Р. Способ разработки обводненных залежей нефти СВЧ электромагнитным воздействием (варианты). Башкирский государственный университет: заявка на изобретение 2013154455/03. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37434065>. EDN: <https://www.elibrary.ru/ohhevj>.
- [16] Рузил А.С. Оценка эффективности СВЧ-воздействия как метода интенсификации нефтедобычи // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19, № 6. С. 134–143. DOI: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-6-134-143>.
- [17] Леонтьев А.Ю., Полетаева О.Ю., Бабаев Э.Р., Мамедова П.Ш. Применение СВЧ-воздействия на высоковязкую тяжелую нефть // Нефтегазохимия. 2019. № 2. С. 13–17. DOI: <http://doi.org/10.24411/2310-8266-2019-10202>.
- [18] Кислицын А.А. Численное моделирование прогрева и фильтрации нефти в пласте под действием высокочастотного электромагнитного излучения // Прикладная механика и техническая физика. 1993. № 3. С. 97–103. URL: https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=119948&ARTICLE_ID=133690&ysclid=lw4wfi3f8201266607.
- [19] Шапиро Д.Н. Электромагнитное экранирование: научное издание. Долгопрудный: Издательский дом “Интеллект”, 2010. 120 с. URL: [http://publ.lib.ru/ARCHIVES/SH/SHAPIRO_David_Naumovich/Shapiro_D.N._Elektromagnitnoe_ekranirovanie.\(2010\).\[djv-fax\].zip](http://publ.lib.ru/ARCHIVES/SH/SHAPIRO_David_Naumovich/Shapiro_D.N._Elektromagnitnoe_ekranirovanie.(2010).[djv-fax].zip).
- [20] Кочина Т.Б., Спиридонова В.Н., Родионцев Н.Н., Круглов И.А. Физика пласта. Нижневартовск: Издательство Нижневартовского государственного университета, 2017. 214 с. URL: https://nvsu.ru/ru/Intellekt/2097/Kochina_i_dr._Fizika_plasta_2017_okonch.pdf?ysclid=lw4wom1waz772934478; <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37005300>. EDN: <https://www.elibrary.ru/poxfvv>.



Scientific article

DOI: 10.18287/2541-7525-2024-30-2-67-80

Submitted: 22.03.2024

Revised: 25.04.2024

Accepted: 15.05.2024

A.R. Agaev

University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

E-mail: stud0000249324@study.utmn.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7128-9921>

A.Ya. Gilmanov

University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

E-mail: a.y.gilmanov@utmn.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7115-1629>

A.P. Shevelyov

University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

E-mail: a.p.shevelev@utmn.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0017-4871>

CALCULATION OF THE SHIELDING AT MICROWAVE IMPACT ON OIL RESERVOIRS

ABSTRACT

Currently, there is a problem of depletion of easily produce oil. In order to maintain hydrocarbon production rates, hard-to-recover reserves are being brought into development, a significant part of which are extra-heavy oil, the production of which takes a relatively small share in the global oilfield due to the complexity of the process. The methods existing at the moment do not allow extracting heavy and extra-heavy oil from reservoirs with a sufficient degree of efficiency. The use of such a method as microwave impact has not been widely used in the oilfield, because modeling is necessary to determine the optimal parameters of the impact. It is difficult with the number of problems associated with the complexity of the method. This article deals with the modeling of the process of microwave impact to improve the efficiency of the oil production process. The article is devoted to modeling the process of ultra-high-frequency wave impact on the oil reservoir, considering the physical and chemical parameters of fluids in the reservoir, such as thermal conductivity, dielectric permeability of oil and water (considering its salinity) in the reservoir. In the framework of the method using microwave impact for the first time determined the amount of shielding by the pipe material of this impact and determined the optimal parameters of the radiation source and the parameters of well pipe structures for effective impact on oil reservoirs. The aim of the work is to determine the optimal parameters of the source of microwaves to achieve cost-effective values of oil recovery factor. In this work the physical and mathematical model of microwave impact on the reservoir, based on the laws of electrodynamics and the density of volumetric heat generation in this equation is applied. The dependence of the magnitude of screening of microwave radiation by the production well pipe on its thickness and the dependence of the magnitude of screening of radiation by the production well pipe on the thickness of the perforation slot in this pipe and the dependence of the radius of penetration of electromagnetic waves into the formation on the absorption factor of electromagnetic radiation in the formation are obtained. The paper establishes the existence of a minimum radius of penetration of microwave radiation into the formation to achieve cost-effective values of oil recovery factor over 30%, which is 57 m, and also determined the absorption factor of microwave radiation in the formation, which allows to achieve the specified value of the radius of penetration of microwave radiation into the formation.

Key words: hard-to-recover reserves; oil recovery factor; microwave impact; dielectric permittivity; microwave shielding; radiation absorption; oil reservoir; oil deposits; electromagnetic radiation.

Citation. Agaev A.R., Gilmanov A.Ya., Shevelyov A.P. Calculation of the shielding at microwave impact on oil reservoirs. *Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya / Vestnik of Samara University. Natural Science Series*, 2024, vol. 30, no. 2, pp. 67–80. DOI: <http://doi.org/10.18287/2541-7525-2024-30-2-67-80>. (In Russ.)

Information about the conflict of interests: authors and reviewers declare no conflict of interests.

© Agaev A.R., Gilmanov A.Ya., Shevelyov A.P., 2024

Ali R. Agaev — student of the School of Natural Sciences, group 23F202-1, University of Tyumen, 6, Volodarskogo Street, Tyumen, 625003, Russian Federation.

Alexander Ya. Gilmanov — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior lecturer of the Department of Modeling of Physical Processes and Systems, University of Tyumen, 6, Volodarskogo Street, Tyumen, 625003, Russian Federation.

Alexander P. Shevel'ov — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor, professor of the Department of Modeling of Physical Processes and Systems, University of Tyumen, 6, Volodarskogo Street, Tyumen, 625003, Russian Federation.

References

- [1] Shagapov V.Sh., Yumagulova Y.A., Gizzatullina A.A. Modeling the dynamics of pressure and temperature in the reservoir with heavy oil when heated. *Vestnik of Samara University. Natural Science Series*, 2016, no. 1–2, pp. 62–68. Available at: <https://journals.ssau.ru/est/article/download/4266/4165?ysclid=lw4tkgdn8g660351312>. (In Russ.)
- [2] Astafiev V.I., Kasatkin A.E. Waterflooding front moving task in dual periodical area: piston-like displacement case. *Vestnik of Samara University. Natural Science Series*, 2014, no. 10(121), pp. 116–129. Available at: <https://journals.ssau.ru/index.php/est/article/download/4517/4415.pdf?ysclid=lw4tvmf98h181012641>. (In Russ.)
- [3] Ishkineev D.A. Problems of development of small fields of high-viscosity oil in Tatarstan. In: *Energy efficiency. Problems and solutions: materials of the XIV All-Russian research and practical conference*. Ufa: Institut problem transporta energoresursov RB, 2014, pp. 51–53. (In Russ.)
- [4] Khasanov I.I., Shakirov R.A., Leontyev A.Yu., Poletaeva O.Yu., Babayev E.R., Mamedova P.Sh. Review of modern methods of influence on the rheological properties of heavy highly viscous oils. *Oil and Gas Chemistry*, 2018, no. 3, pp. 49–54. DOI: <https://doi.org/10.24411/2310-8266-2018-10305>. EDN: <https://www.elibrary.ru/ytonvb>. (In Russ.)
- [5] Abdullina V.A., Fatykhov M.A. Fusion of firm depositions in pipelines by the electromagnetic field moving source. *Petroleum Engineering*, 2012, no. 6, pp. 60–68. Available at: https://ogbus.ru/files/ogbus/authors/AbdullinaVA/AbdullinaVA_1.pdf. (In Russ.)
- [6] Kislitsyn A.A. Numerical modeling of high-frequency electric heating of dielectric plug filling a pipe. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1996, vol. 37, no. 3, pp. 75–82. Available at: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/fc4/fc4acdffd504d4093780dc085d72c859.pdf?ysclid=lw4us007i7164093121>. (In Russ.)
- [7] Kovaleva L.A., Zinnatullin R.R., Mullayanov A.I., Mavletov M.V., Blagochinnov V.N. Microstructure evolution of water-oil emulsions in high-frequency and microwave electromagnetic fields. *High temperature*, 2013, vol. 51, no. 6, pp. 870–872. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X13060175>. EDN: <https://www.elibrary.ru/slhbuh>. (In English; original in Russian)
- [8] Hasakir B., Acar C., Demiral B., Akin S. Microwave assisted gravity drainage of heavy oils. In: *International Petroleum Technology Conference Paper IPTC 12536 presented at the International Petroleum Technology Conference*, Kuala Lumpur, Malaysia, December 3–5, 2008. Kuala Lumpur, 2008, pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.2523/12536-MS>.
- [9] Alomair O., Alarouj M., Althenayyan A., Alsaleh A., Mohammad H., Altahoo Y., Alhaidar Y., Alansari S., Alshammari Y. Improving heavy oil recovery by unconventional thermal methods. In: *Society of Petroleum Engineers Conference Paper SPE 163311 presented at the SPE Kuwait International Petroleum Conference*, Kuwait City, Kuwait, December 10–12. Kuwait City, 2012, pp. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.2118/163311-MS>.
- [10] Callarotti R.C., Paez E. Microwave dielectric properties of heavy oil and heating of reservoirs. In: *Society of Petroleum Engineers Conference Paper SPE-169937-MS presented at the SPE Biennial Energy Resources Conference*, Port of Spain, Trinidad, June 9–11, 2014. Port of Spain, 2014, pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.2118/169937-MS>.
- [11] Othman H.A., Soliman M.Y., Settari A.T. Techniques to improve the use of microwave to produce heavy oil reservoirs: numerical study. In: *Society of Petroleum Engineers Conference Paper SPE-188118-MS presented at the SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition*, Dammam, Saudi Arabia, April 24–27, 2017. Dammam, 2017, pp. 1–24. DOI: <https://doi.org/10.2118/188118-MS>.
- [12] Bapat S., Akhter N. Optimization of heavy oil recovery by radio frequency heating: a theoretical approach with experimental modeling. In: *Society of Petroleum Engineers Conference Paper SPE-197232-MS presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, Abu Dhabi, UAE, November 11–14, 2019. Abu Dhabi, 2019, pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.2118/197232-MS>.
- [13] Berezovskiy Yu.S., Teterin V.S., Deeva V.S., Slobodyan S.M. Prospects of application of high frequency microwave heating on high viscosity hydrocarbons production. *Alternative energy sources in the transport-technological complex: problems and prospects of rational use*, 2015, vol. 2, no. 2, pp. 356–360. DOI: <https://doi.org/10.12737/15083>. (In Russ.)

- [14] Kovaleva L., Davletbaev A., Minnigalimov R. Recoveries of heavy oil and bitumen techniques with the radio frequency electromagnetic irradiation. In: *Society of Petroleum Engineers Conference Paper SPE 138086 presented at the SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition*, Moscow, Russia, October 26–28, 2010. Moscow, 2010, pp. 1–11. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/138086-RU>.
- [15] Musin A.A., Mullayanov A.I., Kovaleva L.A., Valiev Sh.M., Blagochinnov V.N., Zinnatullin R.R. Method of development of water-flooded oil reservoir with microwave electromagnetic effect (versions). Bashkir State University: application for invention 2013154455/03. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37434065>. EDN: <https://www.elibrary.ru/ohhevj>. (In Russ.)
- [16] Safiullin R.A. Efficiency estimation of microwave impact as a method for oil production intensification. *Petroleum Engineering*, 2021, vol. 19, no. 6, pp. 134–143. DOI: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-6-134-143>. (In Russ.)
- [17] Leontiev A.Yu., Poletaeva O.Yu., Babaev E.R., Mamedova P.Sh. Application of microwave irradiation on extra-heavy crude oil. *Oil and Gas Chemistry*, 2019, no. 2, pp. 13–17. DOI: <http://doi.org/10.24411/2310-8266-2019-10202>. (In Russ.)
- [18] Kislitsyn A.A. Numerical modeling of petroleum heating and filtration in a plate under the action of high-frequency electromagnetic radiation. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1993, vol. 34, pp. 382–387. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00864790>. (In English; original in Russian).
- [19] Shapiro D.N. Electromagnetic shielding: scientific edition. Dolgoprudny: Izdatel'skii dom "Intellect", 2010, 120 p. Available at: [http://publ.lib.ru/ARCHIVES/SH/SHAPIRO_David_Naumovich/Shapiro_D.N._Elektromagnitnoe_ekranirovanie.\(2010\).\[djv-fax\].zip](http://publ.lib.ru/ARCHIVES/SH/SHAPIRO_David_Naumovich/Shapiro_D.N._Elektromagnitnoe_ekranirovanie.(2010).[djv-fax].zip). (In Russ.)
- [20] Kochina T.B., Spiridonova V.N., Rodiontsev N.N., Kruglov I.A. Reservoir physics. Nizhnevartovsk: Izdatel'stvo Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta, 2017, 214 p. Available at: https://nvsu.ru/ru/Intellect/2097/Kochina_i_dr._Fizika_plasta_2017_okonch.pdf?ysclid=lw4wom1waz772934478; <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37005300>. EDN: <https://www.elibrary.ru/poxfvv>. (In Russ.)