

УДК 533.9.082.74+622.692

А.Ф. Секачев¹, e-mail: Seka4ev_andrei@mail.ru; В.В. Шалай¹; Р.Н. Иванов¹; А.В. Сеченова¹; А.А. Слентарев¹

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет» (Омск, Россия).

Анализ эффективности передачи в нефтяные среды энергии СВЧ электромагнитного поля, создаваемого погружным излучателем

В статье рассмотрен процесс передачи энергии сверхвысокочастотного электромагнитного поля от погружного излучателя в нефтяные среды различного фракционного состава (товарную нефть, а также выделенные из нее перегонкой тяжелую и легкую фракции). Отмечено, что эффективность данного технического решения обусловлена высокой способностью электромагнитной волны проникать в нагреваемую нефтяную среду на большую глубину, причем процесс передачи энергии, характеризующийся объемным тепловыделением, может в значительной степени повысить эффективность теплопередачи в нефтяные среды, имеющие низкий коэффициент теплопроводности. Представлены результаты экспериментального определения параметров работы установки с биконическим рупорным излучателем для передачи энергии сверхвысокочастотного электромагнитного поля в нефтяные среды. В ходе экспериментов установлено, что значительное влияние на характер согласованности режима работы излучателя (и, как следствие, на коэффициент полезного действия) в нефтяных средах оказывает наличие или отсутствие непосредственного контакта излучателя с нагреваемой средой. В целях исключения непосредственного контакта биконического рупорного излучателя и нагреваемой среды использовался разделитель сред из фторопласта. Экспериментально определены частоты, на которых коэффициент полезного действия передачи энергии сверхвысокочастотного электромагнитного поля достигал максимальных значений. Установлено, что спектр поглощения нефтяной среды главным образом определяется содержанием легких фракций. Для тяжелой фракции нефти наиболее эффективен нагрев на частотах 2,25 и 2,73 ГГц, тогда как для товарной нефти и легкой фракции значение данного показателя составляет 2,3 ГГц. Для излучателя, передающего энергию сверхвысокочастотного электромагнитного поля и имеющего непосредственный контакт с нефтяной средой, целесообразно производить нагрев тяжелой фракции нефти на частоте 2,08 ГГц, а легкой фракции и товарной нефти – на частоте 2,1 ГГц. В целом по результатам исследования сделан вывод о перспективности направления нагрева нефтяных сред в технологических емкостях для хранения жидких высоковязких углеводородов с помощью передачи энергии сверхвысокочастотного электромагнитного поля.

Ключевые слова: нефтяная среда, тяжелая фракция, легкая фракция, энергия, нагрев диэлектрика, электромагнитное поле, СВЧ.

.....

A.F. Sekachev¹, e-mail: Seka4ev_andrei@mail.ru; V.V. Shalay¹; R.N. Ivanov¹; A.V. Sechenova¹; A.A. Sleptarev¹

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Omsk State Technical University" (Omsk, Russia).

Analysis of the Efficiency of Transmission of Microwave Electromagnetic Field Energy Generated by a Submerged Emitter into Oil Environments

The paper considers the process of transmission of ultrahigh-frequency electromagnetic field energy from a submersible radiator into oil media of different fractional composition (commercial oil, as well as heavy and light fractions separated from it by distillation). It is noted that the effectiveness of this technical solution is due to the high capability of electromagnetic waves to penetrate into the heated oil medium to a greater depth, and the process of energy transfer characterized by volumetric heat transfer can significantly improve the efficiency of heat transfer into oil mediums having a low coefficient of thermal conductivity. We present the results of experimental determination of operating parameters of the installation with a biconical horn radiator for transmission of ultrahigh-frequency electromagnetic field energy into petroleum media. In the course of the experiments it was found that the presence or absence of direct contact

of the radiator with the heated medium has a significant impact on the nature of the mode consistency of the radiator (and, consequently, on the coefficient of performance) in the oil environments. In order to eliminate the direct contact of the biconical horn radiator with the heated medium we used a separation medium made of fluoroplastic. Experimentally determined the frequencies at which the coefficient of efficiency of the ultrahigh-frequency electromagnetic field energy transfer reached its maximum values. It was found that the absorption spectrum of the oil medium is mainly determined by the content of light fractions. For the heavy oil fraction, the heating at frequencies 2.25 and 2.73 GHz is the most effective, whereas for the commercial oil and light fractions the value of this parameter is 2.3 GHz. For the radiator transmitting energy of ultrahigh frequency electromagnetic field and having direct contact with oil medium, it is expedient to heat up heavy oil fraction at frequency 2.08 GHz, and light fraction and commercial oil – at frequency 2.1 GHz. In general, according to the results of the study, it is concluded that the direction of oil medium heating in technological tanks for storing liquid high-viscosity hydrocarbons by means of energy transfer of ultrahigh-frequency electromagnetic field is promising.

Keywords: oil medium, heavy fraction, light fraction, energy, dielectric heating, electromagnetic field, microwave.

ВВЕДЕНИЕ

Развивающиеся технологии добычи тяжелых нефтей являются драйвером создания и развития технологий их хранения и трубопроводного транспорта, основанных в первую очередь на так называемой горячей перекачке. Однако современные исследования [1, 2] показывают, что подведение энергии электромагнитного СВЧ-поля приводит не только к увеличению температуры нефтяной среды, но и к нетепловому необратимому изменению вязкости. Кроме того, электромагнитное СВЧ-поле характеризуется объемным тепловыделением [3], что обуславливает большую равномерность температурного поля нефтяных сред с низким коэффициентом теплопроводности.

В целом большинство исследователей, к примеру [4–8], свидетельствует о перспективности СВЧ-технологий обработки нефтей, в особенности с учетом сравнительно низких энергетических затрат на нагрев.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СВЧ-НАГРЕВА НЕФТЕЙ

Процессы СВЧ-нагрева нефтяных сред (рис. 1) описываются системой дифференциальных уравнений [9] в частных производных, состоящей из уравнений Максвелла, нестационарной теплопроводности, дифференциального уравнения неразрывности потока для неустановившегося движения сжимаемой жидкости и уравнения движения жидкости:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = 0; \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0; \quad (4)$$

$$\vec{D} = \varepsilon(T) \vec{E}; \quad (5)$$

$$\vec{B} = \mu(T) \vec{E}; \quad (6)$$

$$\vec{j} = \sigma(T) \vec{E}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (c(T) \cdot \rho(T) \cdot T) + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla} T) = \operatorname{div} (\lambda(T) \cdot \vec{\nabla} T + q(T, \vec{E})); \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho V) = 0; \quad (9)$$

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V}; \quad (10)$$



где \vec{E} и \vec{H} – векторы напряженности электрического, В/м, и магнитного, А/м, полей соответственно; \vec{D} и \vec{B} – векторы электрической, Кл/м², и магнитной, Тл, индукции соответственно; t – время, ч; \vec{j} – плотность тока проводимости, А/м²; ε – диэлектрическая проницаемость; σ – проводимость диэлектрика, См; q – удельная поглощенная мощность, Вт/кг; T – температура, °С; \vec{V} – вектор скорости перемещения среды; $\vec{\nabla}$ – оператор Гамильтона; g – ускорение свободного падения, м/с²; p – давление, Па; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

Ссылка для цитирования (for citation):

Секачев А.Ф., Шалай В.В., Иванов Р.Н., Сеченова А.В., Слептарев А.А. Анализ эффективности передачи в нефтяные среды энергии СВЧ электромагнитного поля, создаваемого погружным излучателем // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2021. № 9–10. С. 74–79.

Sekachev A.F., Shalay V.V., Ivanov R.N., Sechenova A.V., Sleptarev A.A. Analysis of the Efficiency of Transmission of Microwave Electromagnetic Field Energy Generated by a Submerged Emitter into Oil Environments. Territorija "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]. 2021;(9–10):74–79. (In Russ.)

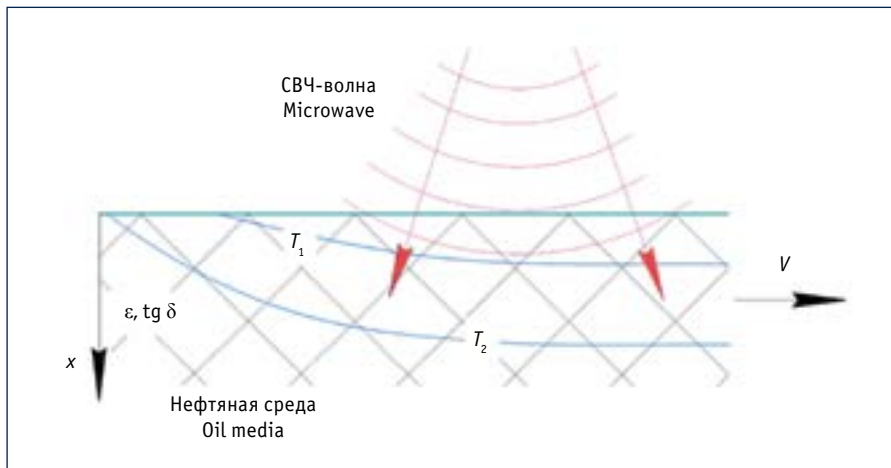


Рис. 1. СВЧ-нагрев нефтяных сред:

T_1, T_2 – температура изотерм, °С; V – скорость перемещения среды, м/с; x – координата; ε – диэлектрическая проницаемость; $\text{tg } \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь

Fig. 1. Microwave heating of oil media:

T_1, T_2 – isotherm temperature, °С; V – velocity of medium, m/s; x – coordinate; ε – dielectric permittivity; $\text{tg } \delta$ – tangent of dielectric loss angle

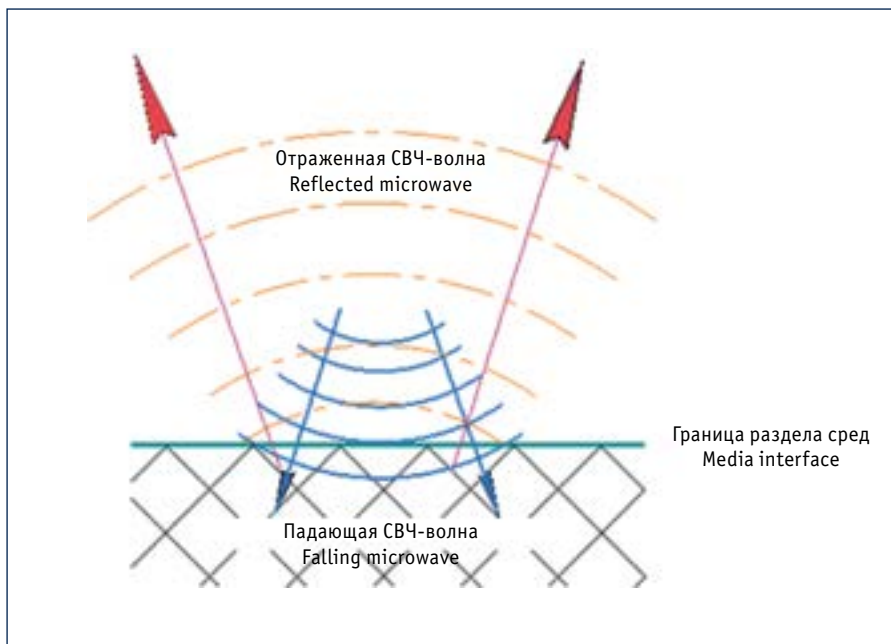


Рис. 2. Отражение СВЧ-волны от границы раздела сред

Fig. 2. Microwave wave reflection from a media interface

Динамика нагрева и движения нефтяной среды исходя из уравнений (8–10) определяется теплофизическими характеристиками среды, начальными и граничными условиями, а самое главное – удельной поглощенной мощностью q в уравнении (8), которая может быть определена как теоретически, с помощью уравнений (1–7), так и экспериментально. Именно экспериментально изуче-

нию процесса поглощения СВЧ-энергии нефтяной средой и определению удельной поглощаемой мощности было посвящено исследование, результаты которого представлены в данной статье.

Стоит также отметить, что глубина проникновения электромагнитного СВЧ-поля зависит от коэффициента затухания волны α , который рассчитывается по формуле:

$$\alpha = \frac{\pi f \sqrt{\varepsilon} \text{tg } \delta}{c}, \quad (11)$$

где $\text{tg } \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь нагреваемого продукта; f – частота электромагнитного поля, Гц; c – скорость света, м/с.

Для битума с параметрами $\varepsilon = 2,5$; $\text{tg } \delta = 0,015$ коэффициент затухания волны α равен $0,608 \text{ м}^{-1}$. Расстояние до поверхности, проходя через которую поток мощности падает в 2,71 раза, составляет 0,4 м.

В активе нефтегазовой отрасли имеется обширная инфраструктура емкостей для хранения нефтяных сред, поэтому наиболее перспективными являются устройства СВЧ-обработки нефтей, способные работать в существующих резервуарах. Такими устройствами являются погружные СВЧ-излучатели [10–12]. Соотношение величин мощности, создаваемой генератором СВЧ, и энергии, поглощенной нефтяной средой в единицу времени, демонстрирует эффективность процесса передачи СВЧ-энергии погружных излучателей. Особенность данного процесса заключается в том, что нефтяная среда и излучатель образуют совместную систему передачи электромагнитных волн. Часть энергии такой системы непременно отражается от границы раздела сред «излучатель – нефтяная среда» (рис. 2). Эффективность работы такой системы на практике определяется по измеряемому в эксперименте значению коэффициента стоячей волны (КСВ). По известным зависимостям эффективности передачи энергии электромагнитного поля от КСВ [13] получены значения, представленные в таблице, из которых следует, что при увеличении КСВ эффективность передачи энергии от излучателя резко снижается. При этом под коэффициентом полезного действия (КПД), представленным в таблице, понимается отношение поглощенной мощности к излучаемой. Главным фактором, влияющим на передачу СВЧ-энергии электромагнитного поля, являются электрофизические характеристики среды, окружающей излучатель. Стоит также отметить, что в целях исключения непосредственного контакта излучателя с окружающей средой

Соответствие коэффициентов стоячей волны и полезного действия

Correlation of standing wave and efficiency coefficients

Коэффициент Coefficient	Значение Value													
Коэффициент стоячей волны Standing wave coefficient	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	7,0	10,0	
Коэффициент полезного действия, % Efficiency coefficient, %	100,0	99,8	99,2	98,3	96,0	88,9	81,6	75,0	69,1	64,0	55,6	43,8	33,1	

целесообразно использовать разделители сред, которые также могут влиять на КПД процесса передачи энергии.

ОБЪЕКТ И ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования, результаты которого представлены в данной статье, были реологические характеристики нефтяной среды, подвергнутой электромагнитному СВЧ-облучению.

Предметом исследования был термодинамический процесс передачи СВЧ-энергии электромагнитного поля в нефтяную среду непосредственно внутри резервуаров и емкостей для хранения углеводородов, исполь-

зуемых в системах трубопроводного транспорта.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В исследовании использовалась нефть, а также полученные из нее перегонкой две фракции – легкая (температура испарения меньше 300 °С) и тяжелая (температура испарения больше 300 °С). В качестве излучателя электромагнитных волн использовался биконический рупорный излучатель.

В ходе эксперимента в образец нефти, помещенный в мерный стакан, опускался рупорный СВЧ-излучатель, соединенный с векторным анализа-

тором СВЧ-цепей SABAN R54, который в режиме реального времени передавал значения КСВ на персональный компьютер. Измерения проводились на трех перечисленных образцах, для каждого из которых исследования проводились в двух вариантах: в первом эксперименте был обеспечен непосредственный контакт излучателя с нефтяной средой, во втором использовался разделитель сред из фторопласта.

Для снятия показаний использовался диапазон частот 2,0–3,0 ГГц, для наблюдения более детальных изменений диапазон был уменьшен до 2,4–2,5 ГГц.

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ РЕЗИСТОРЫ ЗАЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ СЕТЕЙ 6–35КВ

- Номинальное напряжение сети: 6, 10, 15, 20, 24, 35 кВ
- Номинальный ток: от 1 до 2000 А
- Номинальное сопротивление: от 1 до 10000 Ом
- Время протекания номинального тока: от 5 с до длительного
- Материал рабочего элемента резистора: металл (сплав никель-хром-вольфрам-молибден)
- Трансформатор вывода нейтрали с сухой или масляной изоляцией, класс исполнения: УХЛ 1
- Встроенные трансформаторы тока (количество ТТ и число вторичных обмоток — по заказу)
- Интеллектуальный блок контроля нагрева резистора (по заказу)
- Степень защиты резистора: от IP23 до IP55
- Материал шкафа: возможна нержавеющая или оцинкованная сталь, порошковая окраска
- Охлаждение: естественное, воздушное
- Исполнение: для наружной/внутренней установки
- Сейсмостойкость: до 9 баллов по шкале MSK-64
- Диапазон рабочих температур: от -60 до 45 °С
- Опыт эксплуатации на объектах ПАО «Россети», ПАО «Газпром нефть», ПАО «НК «Роснефть», ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «Сургутнефтегаз»



НАДЕЖНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

СДЕЛАНО
В РОССИИ

ООО «ЭНЕРГАН»
Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, ЛИПОВАЯ АЛЛЕЯ, Д. 9А
ТЕЛ. +7 812 373-9030
INFO@ENERGAN.RU

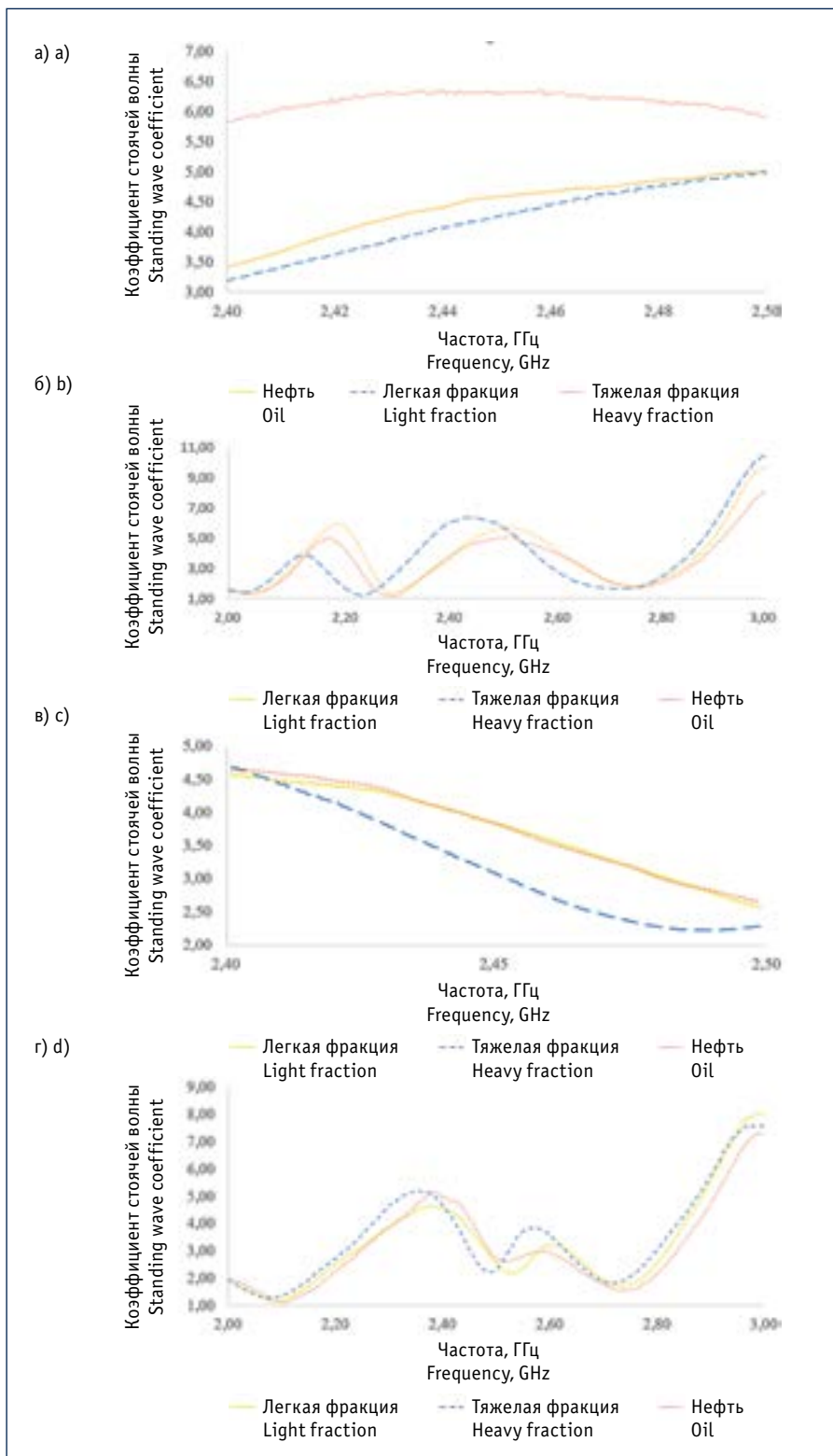


Рис. 3. Зависимость от частоты коэффициента стоячей волны излучателя: а) ограниченного от непосредственного контакта с нефтяной средой; б) ограниченного от непосредственного контакта с нефтяной средой в расширенном диапазоне; в) непосредственно контактирующего с нефтяной средой; г) окруженного нефтяной средой

Fig. 3. Frequency dependence of the standing wave coefficient of the transmitter: а) limited to direct contact with the oil medium; б) limited to direct contact with the oil medium in an extended range; в) in direct contact with the oil medium; д) surrounded by the oil medium

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 3а показана зависимость КСВ излучателя, ограниченного от непосредственного контакта с нефтяной средой разделителем сред. По графику видно, что КСВ нефти и легкой фракции резко возрастает в указанном диапазоне частот, тогда как КСВ тяжелой фракции нефти значительно выше и практически не меняется в ходе эксперимента.

Кроме того, из графика следует, что зависимости КСВ от частоты должны иметь экстремумы на частотах, лежащих за пределами выбранного диапазона. Для определения величины этих экстремумов были определены значения КСВ в расширенном диапазоне частот 2,0÷3,0 ГГц (рис. 3б). Из графика очевидно, что зависимости КСВ излучателя в легкой фракции и в нефтяной среде, содержащей легкую фракцию, имеют значительную корреляцию.

На рис. 3в представлена зависимость КСВ излучателя, непосредственно контактирующего с нефтяной средой, причем согласно графику КСВ излучателя резко уменьшается для всех исследуемых образцов нефтяных сред. Кроме того, для тяжелой фракции на частоте 2,49 ГГц наблюдается область локального минимума. По аналогии с предыдущим исследованием были получены зависимости КСВ излучателя, контактирующего с нефтяной средой в расширенном диапазоне частот (рис. 3г): эксперимент показал, что все исследуемые нефтяные среды имеют три локальных минимума, причем на частоте 2,1 ГГц КСВ близок к единице.

ВЫВОДЫ

По полученным данным можно сделать вывод, что на частотах (2,4÷2,5 ГГц) работы серийных генераторов СВЧ-энергии (магнетронов) отсутствие разделителя сред положительно сказывается на эффективности передачи СВЧ-энергии электромагнитного поля от погружного излучателя в нефтяные среды. Кроме того, установлено, что спектр поглощения нефтяной среды главным образом определяется содержанием легких фракций. Для тяжелой фракции нефти с использованием разделителя сред наиболее эффективен нагрев на частотах 2,25 и 2,73 ГГц, которые характеризуются КПД 85 и 78 %

соответственно. Для нефти и легкой фракции это значение составляет 2,3 ГГц (84 %). Для излучателя, передающего СВЧ-энергию электромагнитного поля и имеющего непосредственный контакт с нефтяной средой, целесо-

образно производить нагрев тяжелой фракции нефти на частоте 2,08 ГГц (87 %), а легкой фракции и товарной нефти – на частоте 2,1 ГГц (87 %). Стоит отметить, что на эффективность передачи энергии влияет компонентный

состав фракций, однако ввиду большого количества химических соединений, из которых они состоят, для уточнения экстремумов в дальнейшем необходимо проводить многофакторные исследования.

Литература:

1. Цао Бо. Исследование воздействия микроволнового излучения на свойства высоковязких нефтей с целью повышения эффективности их транспортировки: автореф. дис... канд. техн. наук. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2017. 24 с.
2. Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р., Шайхисламов Р.Р. К исследованию влияния температуры обработки на конечную вязкость нефтяных сред // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48. № 5. С. 796–798.
3. Kappe C.O., Pieber B., Dallinger D. Microwave Effects in Organic Synthesis: Myth or Reality? // *Angewandte Chemie (International Edition)*. 2013. Vol. 52. No. 4. P. 1088–1094.
4. Lv X., Zhanlong S., Yu J. et al. Study on the Demulsification of Refinery Oily Sludge Enhanced by Microwave Irradiation // *Fuel*. 2020. Vol. 279. No. 7. P. 118417.
5. Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р., Муллаянов А.И. и др. Эволюция микроструктуры водонефтяных эмульсий в высокочастотных и сверхвысокочастотных электромагнитных полях // *Теплофизика высоких температур*. 2013. Т. 51. № 6. С. 952–955.
6. Балакирев В.А., Сотников Г.В., Ткач Ю.В., Яценко Т.Ю. ВЧ метод устранения парафиновых пробок в оборудовании нефтяных скважин и нефтепроводах // *Электромагнитные явления*. 1998. Т. 1. № 4. С. 552–570.
7. Юдина В.О., Архангельский Ю.С. Применение СВЧ-энергии для нагрева жидкости в потоке // *Вопросы электротехнологии*. 2019. № 1 (22). С. 22–34.
8. Ковалева Л.А., Миннигалимов Р.Р., Зиннатуллин Р.Р. Разрушение водонефтяных и нефтешламовых эмульсий электромагнитными полями. Уфа: БашГУ, 2013. 164 с.
9. Анфиногенов В.И. Математическое моделирование СВЧ-нагрева диэлектриков: дис. ... докт. техн. наук. Казань, 2006. 340 с.
10. Способ и устройство разжижения нефтяных шламов внутри резервуаров и закрытых емкостей СВЧ-полем: пат. 2681619 РФ; МПК В08В 9/08, В08В 3/10 / В.П. Кисмерешкин, А.Ф. Секачев, А.Е. Яковлев, А.Ф. Фицнер; патентообладатель – ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»; № 2017147175, заявл. 29.12.2017, опубл. 11.03.2019.
11. Секачев А.Ф., Шалай В.В., Земенков Ю.Д. и др. Экспериментальное исследование передачи энергии сверхвысокочастотного электромагнитного поля в нефтяную среду посредством погружного излучателя // *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2021. № 3. С. 120–129.
12. Иванов В.А., Прямоносков О.В., Кисмерешкин В.П., Секачев А.Ф. Анализ возможности применения электромагнитного излучения в трубопроводном транспорте высоковязкой нефти // *Материалы II Всероссийской научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт углеводородов»*. Омск, 2018. С. 7–12.
13. Лавров А.С., Резников Г.Б. Антенно-фидерные устройства: учеб. пособие для вузов. М.: Советское радио, 1974. 368 с.

References:

1. Cao Bo. Study of Microwave Radiation Impact on the Properties of High-Viscosity Oils in Order to Improve their Transportation Efficiency. The abstract of the thesis of the Candidate of Engineering Science. Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NRU) Publishing Center; 2017. (In Russ.)
2. Kovaleva L.A., Zinnatullin R.R., Shaikhislamov R.R. On Studying the Influence of Treatment Temperature on Finite Viscosity of Oil Media. *High Temperature*. 2010;48(5):759–760.
3. Kappe C.O., Pieber B., Dallinger D. Microwave Effects in Organic Synthesis: Myth or Reality? *Angewandte Chemie (International Edition)*. 2013;52(4):1088–1094.
4. Lv X., Zhanlong S., Yu J. et al. Study on the Demulsification of Refinery Oily Sludge Enhanced by Microwave Irradiation. *Fuel*. 2020;279(7):118417.
5. Kovaleva L.A., Zinnatullin R.R., Mullayanov A.I. et al. Microstructure Evolution of Water-Oil Emulsions in High-Frequency and Microwave Electromagnetic Fields. *High Temperature*. 2013;51(6):870–872.
6. Balakirev V.A., Sotnikov G.V., Tkach Y.V., Yatsenko T.Y. High-Frequency Method of Elimination of Paraffin Plugs in Oil Well Equipment and Oil Pipelines. *Elektromagnitnye yavleniya [Electromagnetic Phenomena]*. 1998;1(4):552–570. (In Russ.)
7. Yudina V.O., Arkhangelskiy Yu.S. Using the Microwave Energy for Heating the Fluid Flow. *Voprosy elektrotekhnologii [Journal of Electrotechnics]*. 2019;1(22):22–34. (In Russ.)
8. Kovaleva L.A., Minnigalimov R.R., Zinnatullin R.R. Destruction of Water-Oil and Oil-Slime Emulsions by Electromagnetic Fields. Ufa: Bashkir State University; 2013. (In Russ.)
9. Anfinogenov V.I. Mathematical Modelling of the Microwave Heating of Dielectrics. Thesis of the Candidate of Engineering Science. Kazan; 2006. (In Russ.)
10. Kismereshkin V.P., Sekachev A.F., Yakovlev A.E., Fitsner A.F. Method and Device for Diluting Oil Sludge Inside Tanks and Closed Capacities with Microwave-Field: patent 2681619 RU; IPC B08B 9/08, B08B 3/10. Patent holder – Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Omsk State Technical University”; No. 2017147175, appl. 29.12.2017, publ. 11.03.2019. (In Russ.)
11. Sekachev A.F., Shalai V.V., Zemenkov Yu.D. et al. Experimental Study of the Transmission of Energy of a Microwave Electromagnetic Field into the Oil Environment Employing a Submersible Emitter. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz [Oil and Gas Studies]*. 2021;(3):120–129. (In Russ.)
12. Ivanov V.A., Prytanosov O.V., Kismereshkin V.P., Sekachev A.F. Analysis of Electromagnetic Radiation Application Possibility in Pipeline Transport of High-Viscosity Oil. In: *Materials of II All-Russian Scientific-Practical Conference “Pipeline Transport of Hydrocarbons”*. Омск; 2018. P. 7–12. (In Russ.)
13. Lavrov A.S., Reznikov G.B. Antenna-Feeder Devices: textbook for higher education institutions. Moscow: Sovetskoye radio [Soviet Radio]; 1974. 368 p. (In Russ.)