

Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

Designing, construction and operation of pipeline transport system

25.00.19 Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ
(технические науки)

DOI: 10.31660/0445-0108-2021-3-120-129

УДК 622.692

Экспериментальное исследование передачи энергии сверхвысокочастотного электромагнитного поля посредством погружного излучателя в нефтяную среду

А. Ф. Секачев^{1*}, В. В. Шалай¹, Ю. Д. Земенков², А. Ф. Фицнер³,
А. Е. Яковлев⁴

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

²Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

³АО «РН-Няганьнефтегаз», г. Нягань, Россия

⁴Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть», г. Тюмень, Россия

*e-mail Seka4ev_andrei@mail.ru

Аннотация. Подведение теплоты в нефтяные среды, перекачиваемые системами трубопроводного транспорта, является одной из ключевых проблем нефтяной отрасли. В статье описан способ подведения теплоты в нефтесодержащие среды посредством энергии электромагнитного поля. Экспериментально показана возможность освобождения контактирующих с нефтешламом поверхностей под действием электромагнитных полей. Описаны конструкция и параметры биконического рупорного излучателя СВЧ электромагнитного поля, работающего на частоте 2 450 МГц. Описаны способ генерации энергии и передача ее в излучатель посредством коаксиального кабеля. Представлены результаты испытания излучателя в нефти, помещенной в оптически прозрачный и радионепроницаемый двухстеночный бак. Конструкция стенда позволяет безопасно для наблюдателя исследовать тепловой процесс при помощи тепловизора. Установка позволила нагреть 7 литров нефти на 15 °С за 12 минут.

Ключевые слова: нефтяные среды; электромагнитное поле; биконический рупорный излучатель; разжижение

Experimental study of the transmission of energy of a microwave electromagnetic field into the oil environment employing a submersible emitter

Andrei F. Sekachev^{1*}, Viktor V. Shalai¹, Yuri D. Zemenkov²,
Artyom F. Fitzner³, Alexey E. Yakovlev⁴

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russia

²Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

³RN-Nyaganneftegaz JSC, Nyagan, Russia

⁴KogalymNIPIneft Branch of LUKOIL-Engineering LLC, Tyumen, Russia

*e-mail Seka4ev_andrei@mail.ru

Abstract. The supply of heat to oil media pumped by pipeline transport systems is one of the main problems in the oil industry. The article describes a method for supplying heat to oil-containing media using the energy of an electromagnetic field. The possibility of releasing surfaces in contact with oil sludge under the influence of electromagnetic fields has been shown by experiment. We describe the design and parameters of a biconical horn radiator of a microwave electromagnetic field operating at a frequency of 2 450 MHz. A method for generating energy and transmitting it to the emitter by means of a coaxial cable is shown. Testing the emitter in oil placed in an optically transparent and radio-tight double-walled tank is presented. The design of the stand allows us to safely examine the thermal process using a thermal imager. The installation made it possible to heat 7 liters of oil at 15 °C in 12 minutes.

Key words: oil environments; electromagnetic field; biconical horn radiator; liquefaction

Введение

Термодинамические процессы нефтяных сред, перекачиваемых системами трубопроводного транспорта, представляют собой обширную область научных знаний. В частности, разогрев и разжижение нефтяных шламов являются ключевой задачей процессов переработки и утилизации большинства существующих и разрабатываемых методов.

Наглядный результат сверхвысокочастотного (СВЧ) воздействия на нефтешлам демонстрирует простой опыт (рис. 1). Образец сформированной массы нефтешлама, собранного в процессе очистки резервуара, был размещен на куске краски, взятой с внутренней поверхности резервуара. Уклон плоскости к горизонту составлял 1°. Шероховатость поверхности идентична и полностью моделирует шероховатость поверхности стенок резервуара. Под действием СВЧ излучения спустя несколько минут образец расплавился, и масса стекла вниз по уклону.

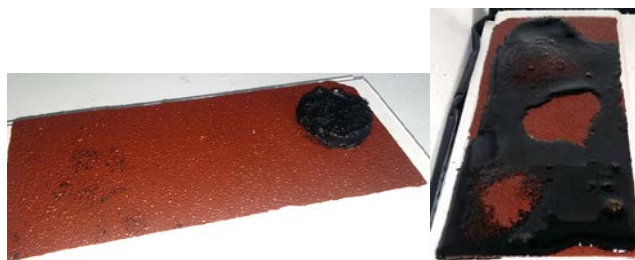


Рис. 1. Стеkanie нефтяного шлама

Возможность освобождения контактирующих с нефтешламом поверхностей под действием электромагнитных (ЭМ) полей совместно с ультра-

звуковым воздействием [1, 2], химическим [3] или биохимическим воздействием [4] представляет собой перспективное направление.

Процесс подогрева нефтяного шлама электромагнитным полем обеспечивает объемное выделение в нем тепла, что способствует равномерному распределению температуры в среде. Такая особенность процесса представляется перспективным вектором развития технологий с использованием биологически активных компонентов [5], где необходимы положительные температуры.

В работе [6] сравниваются тепловые и электромагнитные способы нагрева нефтяных сред. В статье [7] была обоснована возможность применения электромагнитного поля высокой частоты для переработки нефтешламов, представляющих собой сверхустойчивые водонефтяные эмульсии. По отношению к электромагнитному полю данная среда является слабопроводящим диэлектриком, который будет нагреваться в ЭМ поле за счет слабой проводимости [8].

Процесс удаления шлама нефтепродуктов в хранилищах представляется трудоемким и небезопасным. Для снижения трудоемкости предлагается разжижать шлам путем его нагрева электромагнитным полем сверхвысоких частот. В этом случае нагрев идет не с поверхности путем конвекционного прогрева, а в объеме на глубину проникновения поля СВЧ. С этой целью предлагается рассмотреть возможность нагрева с помощью ряда распределенных по площади резервуара излучателей СВЧ энергии, опускаемых сверху на поверхность шлама, либо установленных вручную через люк-лазы проектируемого резервуара [9].

Важнейшей областью применения СВЧ является трубопроводный транспорт. В данной области ЭМ поля исследуются для изменения вязкости и расплавления асфальтосмолопарафиновых отложений на стенках трубопроводов.

В работе [10] проведено моделирование расплавления твердой пробки в трубопроводе. Показано, что благодаря неравномерности температуры в поперечном сечении разрушение пробки ЭМ полем может произойти до ее полного растворения. Обоснован концепт «СВЧ скребка», способного иметь большую скорость прохождения по трубопроводу.

В ряде случаев невозможно или нецелесообразно использовать непрерывный режим работы генератора ЭМ поля. В [11] определено максимально допустимое время простоя генератора, позволяющее достигнуть полного проплавления пробки.

В [12] показано, что проплавление твердой пробки длиной 12 м в нефтепроводе диаметром 0,72 м может быть целесообразно при использовании источника с мощностью более 10 кВт.

В [13] исследовано изменение вязкости парафинистой нефти в СВЧ поле. Авторы полагают, что снижение вязкости вызвано разрушением возбужденных структурных образований в неньютоновской нефти.

Для районов Крайнего Севера в [14] предложена СВЧ технология защиты трубопровода от закупорок при транспортировке вязких жидкостей. В основу положено введение в трубопровод компактного волновода в виде полосковой линии передач. Кроме того, такой подход может позволить контролировать температуру перекачиваемой жидкости.

Эффективность электротермического, так же как и чисто термического способа снижения вязкости, в значительной степени зависит от температуры обработки [15]. При повышении температуры до определенного значения асфальтены уже не в полной мере сольватируются смолами и адсорбируются на других коллоидных частицах, в том числе на микрокристаллах парафинов, образуя прочные пространственные структуры. Однако при более высокой температуре достигается расплавление парафинов, что делает невозможным вышеописанный процесс. Для образца нефти с содержанием асфальтенов 7,7 и парафинов 4,32 % снижение критической температуры обработки при термонагреве и СВЧ нагреве снижается с 60 до 50 °С.

В [16] описан эксперимент по СВЧ воздействию на нефть Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна. После 1 минуты СВЧ обработки динамическая вязкость уменьшилась в 2,5 раза с 7 258 до 2 936 мПа·с. При продолжительности воздействия 2 минуты вязкость уменьшилась на порядок с 3 623 до 316 мПа·с.

Изменения микроструктуры нефти почти необратимы, и новые параметры остаются стабильными по меньшей мере около двух месяцев [17]. СВЧ воздействие приводит к разрыву молекулярных связей длинных алкановых цепей или ароматических фрагментов в надмолекулярных структурах, обусловленных пи-взаимодействиями [17]. Это ведет к увеличению содержания ароматических и алкановых молекул меньшей молекулярной массы в дисперсионной среде.

В железнодорожном транспорте углеводородов СВЧ энергетика нашла применение при разжижении для слива тяжелых нефтей. В [18] показано, что в зимнее время потери тепловой энергии, обусловленные теплообменом оболочки цистерны с окружающей средой, сокращаются с 30 до 10 %.

Для решения задачи непрерывного контроля параметров объекта обработки может быть предложено применение СВЧ резонансных датчиков на основе направляющих структур с введенными периодическими неоднородностями, позволяющих контролировать диэлектрическую проницаемость твердых и жидких сред [19].

В [20] описано применение СВЧ энергии для нагрева жидкости в потоке, а в [21] предложена согласованная краевая задача электродинамики, теплопроводности и гидравлики, позволяющая провести расчет рабочей камеры лучевого типа методической СВЧ электротермической установки, работающей в ламинарном режиме. Показан порядок расчета транспортного канала КЛТ с учетом изменения вязкости и скорости потока, определен порядок проектирования установки.

Проведены результаты, показывающие большую эффективность высокочастотного электромагнитного метода нагрева нефти в трубопроводе по сравнению с резистивным методом в динамическом режиме [22]. На основе проведенных исследований разработан промышленный высокочастотный электромагнитный способ нагрева высоковязкой нефти в трубопроводах. Даны результаты расчетов мощности промышленного генератора на основе материалов лабораторных исследований.

Объект и методы исследования

Несмотря на большой интерес к данному направлению широкое его использование для нагрева нефтяных сред сдерживается отсутствием фунда-

ментальных исследований проникновения СВЧ излучения в этих средах, возможностей существующей СВЧ техники для реализации данного процесса. Поэтому объектом исследования являются реологические характеристики нефтяной среды, хранимой и транспортируемой системами трубопроводного транспорта, подвергнутой электромагнитному сверхвысокочастотному облучению.

Предметом исследования является термодинамический процесс передачи СВЧ энергии ЭМ поля в нефтяную среду, непосредственно внутри резервуаров и емкостей для хранения углеводородов, используемых в системах трубопроводного транспорта.

Постановка эксперимента

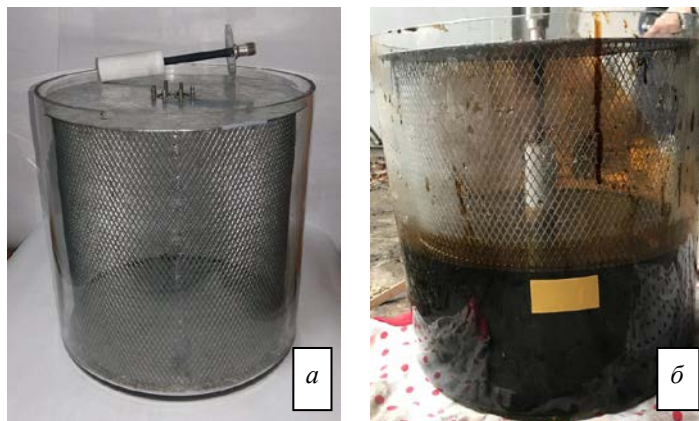
Изучение применимости технологии СВЧ электромагнитного воздействия на нефть и нефтешламы проводилось на сконструированном экспериментальном макете, функциональном в масштабе по мощности и объему нефтешлама, состоящем из излучателя, источника СВЧ энергии, коаксиального кабеля и емкости.

Биконическая антенна, являющаяся излучателем, представленная на рисунке 2, имела высоту 5 см и помещалась во фторопластовый диэлектрик из Ф-4, для исключения непосредственного контакта с нефтяной средой.



Рис. 2. Биконическая антенна

Емкость состояла из стеклянного бака диаметром 30 см, высотой 30 см и помещенного в него сетчатого экрана с характерным размером ячейки 6 мм. Описанная система заполнялась далее исследуемой средой (рис. 3) в количестве $V = 7$ л.



*Рис. 3. Радионепроницаемый цилиндр в емкости:
а) пустой; б) наполненный нефтью и нефтешламом*

СВЧ установка, питающая излучатель, представленная на рисунке 4, состоит из генератора СВЧ излучения — магнетрона на 2 450 МГц с максимальной мощностью 700 Вт, короткозамыкателя, преобразующего поток электромагнитного поля волновода в коаксиальный кабель, систем питания и охлаждения.

Установка не имела дополнительных устройств поглощения энергии (развязка Фарадея и т. п.). Нагрев короткозамыкателя не наблюдался. Были зафиксированы незначительные потери тепловой энергии в разъемах, измерение которых не проводилось. В установке использовался кабель марки РК-50-13-17 длиной 3 метра с коэффициентом затухания $\alpha_{\text{каб}} = 0,5 \text{ дБ} / \text{м}$. КСВ биконического рупорного излучателя, измеренный векторным анализатором СВЧ цепей, составил 1,5, что соответствует потере мощности 4 %. Мощность, подводимая в среду, составляла $N = 400 \text{ Вт}$.

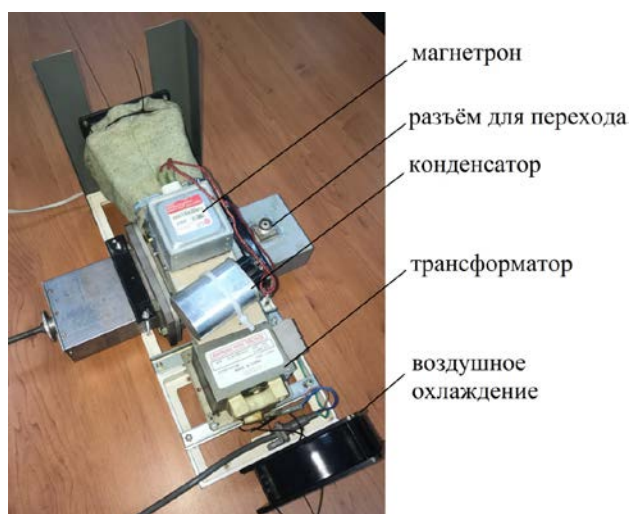


Рис. 4. Установка генерации СВЧ энергии

Результаты

С помощью данного макета был проведен эксперимент по нагреву нефтяной среды. Результаты были зафиксированы тепловизором FLIR E60 (рис. 5).

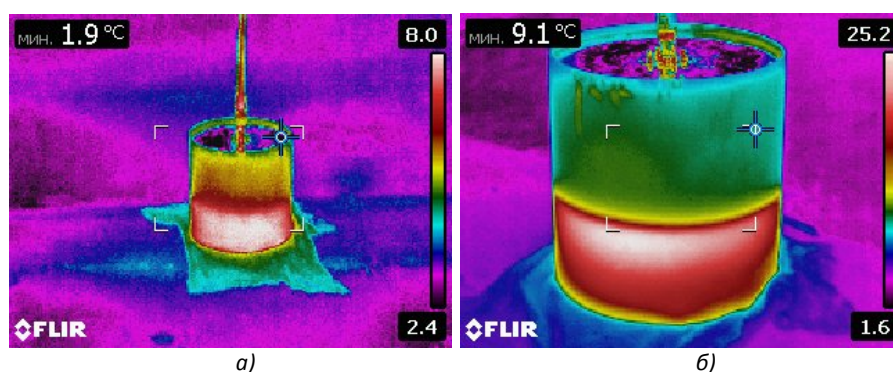


Рис. 5. Распределение температуры в среде:

а) до включения установки; б) спустя 12 минут работы установки

Начальная температура среды составляла 8 °С. Спустя $t = 12$ минут работы установки температура верхнего слоя среды повысилась на 17 °С и составила ≈ 25 °С. Температура нижнего слоя составила 19 °С. Среда подвергалась механическому перемешиванию.

На рисунке 6 представлены средние значения температур по результатам эксперимента в зависимости от времени.

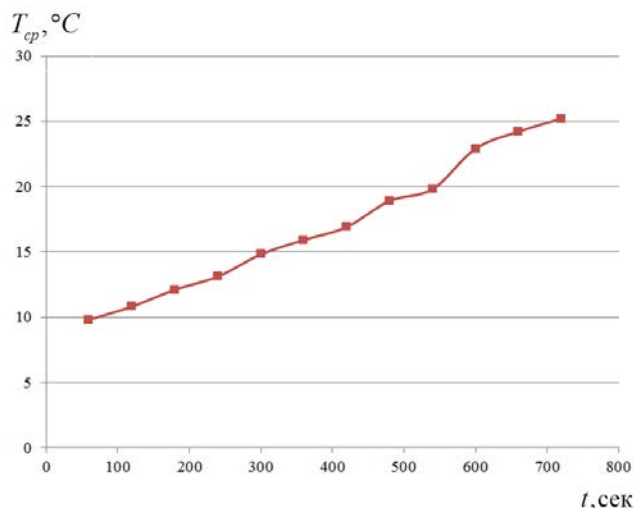


Рис. 6. Средние значения температур нефтяной среды

Выводы

Из полученных результатов можно заключить, что передача энергии СВЧ ЭМ поля в нефтяные среды, транспортируемые системами трубопроводного транспорта, возможна посредством погружного излучателя ЭМ поля СВЧ. Данный подход может быть реализован на основе биконического рупорного излучателя. Причем генератор СВЧ энергии может быть расположен на значительном расстоянии от излучателя, работающего в нефтяной среде.

Библиографический список

1. Effect of frequency on ultrasound-assisted centrifugal dewatering of petroleum sludge / F. Mao, X. Han, Q. Huang [et al.]. – DOI 10.1080/07373937.2016.1144611. – Direct text // Drying Technology. – 2016. – Vol. 34, Issue 16. – P. 1948–1956.
2. Effects of ultrasound on oily sludge deoiling / N. Xu, W. Wang, P. Han, X. Lu. – DOI 10.1016/j.jhazmat.2009.06.091. – Direct text // Journal of Hazardous Materials. – 2009. – Vol. 171, Issue 1–3. – P. 914–917.
3. Treatment of Daqing oily sludge by thermochemical cleaning method / M. Duan, X. Wang, S. Fang [et al.]. – DOI 10.1016/j.colsurfa.2018.06.046. – Direct text // Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects. – 2018. – Vol. 554. – P. 272–278.
4. Integrated interrogation of causes of membrane fouling in a pilot-scale anoxic-oxic membrane bioreactor treating oil refinery wastewater / O. K. Abass, F. Fang, M. Zhuo, K. Zhang. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2018.06.049. – Direct text // Science of The Total Environment. – 2018. – Vol. 642. – P. 77–89.

5. Oil recovery from tank bottom sludge using rhamnolipids / C. Liu, Y. Zhang, S. Sun [et al.]. – DOI 10.1016/j.petrol.2018.06.031. – Direct text // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – Vol. 170. – P. 14–20.
6. Taheri-Shakib, J. Experimental investigation of comparing electromagnetic and conventional heating effects on the unconventional oil (heavy oil) properties : Based on heating time and upgrading / J. Taheri-Shakib, A. Shekarifard, H. Naderi. – DOI 10.1016/j.fuel.2018.04.141. – Direct text // Fuel. – 2018. – Vol. 228. – P. 243–253.
7. Ковалева, Л. А. Об эффективности утилизации нефтяных шламов высокочастотным электромагнитным полем / Л. А. Ковалева, Р. З. Миннигалимов, Р. Р. Зиннатуллин. – Текст : электронный // Нефтегазовое дело : электронный научный журнал. – 2008. – № 1. – URL: <http://ogbus.ru/article/view/ob-effektivnosti-utilizacii-neftyanyx-shlamov-vysokochastotnym-elektromagnitnym-polem>.
8. Электрофизика нефтегазовых систем / Ф. Л. Саяхов, Л. А. Ковалева, А. Д. Галимбеков, А. М. Хайдар. – Текст : непосредственный. – Уфа : Башкирский государственный университет, 2003. – 190 с.
9. Разработка СВЧ модуля для разжижения нефтешлама / А. Ф. Секачев, В. П. Кисмерешкин, А. Е. Яковлев [и др.]. – Текст : непосредственный // Трубопроводный транспорт углеводородов : материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Омск, 28–29 сентября 2017 года. – Омск : Омский государственный технический университет, 2017. – С. 125–128.
10. Абдуллина, В. А. Расплавление твердых отложений в трубопроводах движущимся источником электромагнитного поля / В. А. Абдуллина, М. А. Фатыхов. – Текст : электронный // Нефтегазовое дело : электронный научный журнал. – 2012. – № 6. – С. 60–68. – URL: <http://ogbus.ru/article/view/raspplavlenie-tverdyx-otlozhenij-v-truboprovodax-dvizhushhimsya-istochnikom-elektromagnitnogo-polya>.
11. Нагрев и плавление асфальтопарафиновых пробок в оборудовании нефтяных скважин при периодическом режиме работы высокочастотного источника электромагнитного излучения / В. А. Балакирев, Г. В. Сотников, Ю. В. Ткач, Т. Ю. Яценко. – Текст : непосредственный // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – Т. 42. – № 4 (248). – С. 136–144.
12. ВЧ метод устранения парафиновых пробок в оборудовании нефтяных скважин и нефтепроводах / В. А. Балакирев, Г. В. Сотников, Ю. В. Ткач, Т. Ю. Яценко. – Текст : непосредственный // Электромагнитные явления. – 1998. – Т. 4. – С. 552–560.
13. Regulation of the rheological properties of paraffin-base crudes with a high-frequency electromagnetic field / R. N. Shiryayeva, F. L. Sayakhov, F. K. Kudasheva [et al.]. – DOI 10.1023/A:1014262610098. – Direct text // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2001. – Vol. 37, Issue 6. – P. 407–409.
14. Морозов, Н. Н. Разработка СВЧ-технологии защиты трубопровода от закупорок при транспортировке вязких жидкостей / Н. Н. Морозов. – Текст : непосредственный // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2013. – Т. 16. – № 1. – С. 135–136.
15. Ковалева, Л. А. К исследованию влияния температуры обработки на конечную вязкость нефтяных сред / Л. А. Ковалева, Р. Р. Зиннатуллин, Р. Р. Шайхисламов. – Текст : непосредственный // Теплофизика высоких температур. – 2010. – Т. 48, № 5. – С. 796–798.
16. Влияние СВЧ-воздействия на изменение вязкости высоковязких тяжелых нефтей / А. Ю. Леонтьев, О. Ю. Полетаева, Э. Р. Бабаев, П. Ш. Мамедова. – Текст : непосредственный // Нефтегазохимия. – 2018. – № 2. – С. 25–27.
17. Рачевский, Б. С. Высоковязкая тяжелая нефть — альтернатива традиционной нефти / Б. С. Рачевский, Цао Бо. – Текст : непосредственный // Транспорт на альтернативном топливе. – 2015. – № 6 (48). – С. 40–45.
18. Применение СВЧ- и ИК-излучения для повышения эффективности слива тяжелых нефтей / Е. К. Галанов, Е. К. Яковенко, М. К. Филатов, Ю. А. Кытин. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2006. – № 2 (7). – С. 118–123.
19. Методы и средства управления и контроля процессами СВЧ нагрева в нефтяной отрасли / Г. А. Морозов, В. И. Анфиногентов, О. Г. Морозов [и др.]. – Текст : непосредственный // 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016) : материалы конференции в 13 томах, Севастополь, 04–10 сентября 2016 года. – Севастополь : Севастопольский государственный университет, 2016. – С. 59–69.

20. Юдина, В. О. Применение СВЧ энергии для нагрева жидкости в потоке / В. О. Юдина, Ю. С. Архангельский. – Текст : непосредственный // Вопросы электротехнологии. – 2019. – № 1 (22). – С. 22–34.
21. Архангельский, Ю. С. Проектирование методической СВЧ электротермической установки для нагрева жидкости в потоке при ламинарном течении / Ю. С. Архангельский, В. О. Юдина. – Текст : непосредственный // Вопросы электротехнологии. – 2019. – № 2 (23). – С. 5–12.
22. Лабораторные исследования нагрева высоковязких нефтей в трубопроводах высокочастотным электромагнитным полем / Л. А. Ковалева, Р. Р. Зиннатуллин, М. Д. Валеев [и др.]. – Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 2. – С. 82–85. – DOI: 10.24887/0028-2448-2019-2-82-85.

References

1. Mao, F., Han, X., Huang, Q., Yan, J., & Chi, Y. (2016). Effect of frequency on ultrasound-assisted centrifugal dewatering of petroleum sludge. *Drying Technology*, 34(16), pp. 1948-1956. (In English). DOI: 10.1080/07373937.2016.1144611
2. Xu, N., Wang, W., Han, P., & Lu, X. (2009). Effects of ultrasound on oily sludge deoiling. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1-3), pp. 914-917. (In English). DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.06.091
3. Duan, M., Wang, X., Fang, S., Zhao, B., Li, C., & Xiong, Y. (2018). Treatment of Daqing oily sludge by thermochemical cleaning method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 554, pp. 272-278. (In English). DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.06.046
4. Abass, O. K., Fang, F., Zhuo, M., & Zhang, K. (2018). Integrated interrogation of causes of membrane fouling in a pilot-scale anoxic-oxic membrane bioreactor treating oil refinery wastewater. *Science of The Total Environment*, 642, pp. 77-89. (In English). DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.049
5. Liu, C., Zhang, Y., Sun, S., Huang, L., Yu, L., Liu, X.,... Zhang, Z. (2018). Oil recovery from tank bottom sludge using rhamnolipids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 170, pp. 14-20. (In English). DOI: 10.1016/j.petrol.2018.06.031
6. Taheri-Shakib, J., Shekarifard, A., & Naderi, H. (2018). Experimental investigation of comparing electromagnetic and conventional heating effects on the unconventional oil (heavy oil) properties: Based on heating time and upgrading. *Fuel*, 228, pp. 243-253. (In English). DOI: 10.1016/j.fuel.2018.04.141
7. Kovaleva, L. A., Minnigalimov, R. R., & Zinnatullin, R. R. (2008). Ob effektivnosti utilizatsii neftyanykh shlamov vysokochastotnym elektromagnitnym polem. *Oilfield Engineering*, (1). (In Russian). Available at: <http://ogbus.ru/article/view/ob-effektivnosti-utilizatsii-neftyanykh-shlamov-vysokochastotnym-elektromagnitnym-polem>
8. Sayakhov, F. L., Kovaleva, L. A., Galimbekov, A. D., & Khaydar, A. M. (2003). *Elektrofizika neftegazovykh sistem*. Ufa, Bashkir State University Publ., 190 p. (In Russian).
9. Sekachev, A. F., Kismereshkin, V. P., Yakovlev, A. E., Ficner, A. F., & Matveev, A. V. (2017). *Razrabotka SVCH modulya dlya razzhizheniya nefteshlama. Truboprovodnyy transport uglevodorodov : materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*, Omsk, September, 28-29, 2017. Omsk, Omsk State Technical University Publ., pp. 125-128. (In Russian).
10. Abdullina, V. A., & Fatykhov, M. A. (2012). Fusion of firm depositions in pipelines by the electromagnetic field moving source. *Oilfield Engineering*, (6), pp. 60-68. (In Russian). Available at: <http://ogbus.ru/article/view/rasplavlenie-tverdyx-otlozhenij-v-truboprovodax-dvizhushhim-sya-istochnikom-elektromagnitnogo-polya>
11. Balakirev, V. A., Sotnikov, G. V., Tkach, Yu. V., & Yatsenko, T. Yu. (2001). Nagrev i plavlenie asfal'toparafinovyykh probok v oborudovanii neftyanykh skvazhin pri periodicheskom rezhime raboty vysokochastotnogo istochnika elektromagnitnogo izlucheniya. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 42(4(248)), p. 136-144. (In Russian).
12. Balakirev, V. A., Sotnikov, G. V., Tkach, Yu. V., & Yatsenko, T. Yu. (1998). VCh metod ustraneniya parafinovyykh probok v oborudovanii neftyanykh skvazhin i nefteprovodakh. *Elektromagnitnye yavleniya*, 4, pp. 552-560. (In Russian).

13. Shiryayeva, R. N., Sayakhov, F. L., Kudasheva, F. K., Kovaleva, L. A., & Gimaev, R. N. (2001). Regulation of the Rheological Properties of Paraffin-Base Crudes with A High-Frequency Electromagnetic Field. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 37(6), pp. 407-409. (In Russian). DOI: 10.1023/A:1014262610098
14. Morozov, N. N. (2013). Razrabotka SVCH-tekhnologii zashchity truboprovoda ot zaku-porok pri transportirovke vyazkikh zhidkostey. *Vestnik of MSTU*, 16(1), pp. 135-136. (In Russian).
15. Kovaleva, L. A., Zinnatullin, R. R., & Shaykhislamov, R. R. (2010). K issledovaniyu vliyaniya temperatury obrabotki na konechnuyu vyazkost' neftyanykh sred. *High Temperature*, 48(5), pp. 796-798. (In Russian).
16. Leontyev, A. Yu., Poletaeva, O. Yu., Babayev, E. R., & Mamedova, P. Sh. (2018). In-fluence of microwave exposure on the change of the viscosity of highly viscous heavy oil. *Oil & Gas Chemistry*, (2), pp. 25-27. (In Russian).
17. Rachevsky, B., & Tsao, B. (2015). Extra-heavy crude oil is an alternative to convention-al oil. *Transport na al'ternativnom toplive*, 6(48)), pp. 40-45. (In Russian).
18. Galanov, E. K., Yakovenko, E. K., Filatov, M. K., & Kytin, Yu. A. (2006). Primenenie SVCH- i IK-izlucheniya dlya povysheniya effektivnosti sliva tyazhelykh neftey. *Proceedings of Pe-tersburg Transport University*, (2(7)), pp. 118-123. (In Russian).
19. Morozov, G. A., Anfinogentov, V. I., Morozov, O. G., Nasybullin, A. R., Samigullin, R. R., & Smirnov, S. V. (2016). Methods and tools for control and monitoring of microwave heating processes in the oil industry. 26th Mezhdunarodnaya Krymskaya konferentsiya " SVCH-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii " (KryMiKo'2016) (September, 4-10, 2016, Sevastopol). Se-vastopol, Sevastopol State University Publ., pp. 59-69. (In Russian).
20. Yudina, V. O., & Arkhangelskiy, Yu. S. (2019). Using the microwave energy for heating the fluid flow. *Voprosy elektrotekhnologii*, (1(22)), pp. 22-34. (In Russian).
21. Arkhangelskiy, Yu. S., Yudina, V. O. (2019). Designing a continuous UHF of electro-thermic installation for heating fluids at laminar flow. *Voprosy elektrotekhnologii*, (2(23)), pp. 5-12. (In Russian).
22. Kovaleva, L. A., Zinnatullin, R. R., Valeev, M. D., Minnigalimov, R. Z., & Fassahov, R. H. (2019). Laboratory investigations of the heating of high-viscosity oil in pipelines by a high frequency electromagnetic field. *Neftyanoe Khozyaystvo - Oil Industry*, (2), pp. 82-85. (In Russian). DOI: 10.24887/0028-2448-2019-2-82-85

Сведения об авторах

Секачёв Андрей Фёдорович, старший преподаватель, Омский государственный технический университет, г. Омск, e-mail: Seka4ev_andrei@mail.ru

Шалай Виктор Владимирович, д. т. н., профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, заведующий кафедрой нефтегазового дела, стандартизации и метрологии, президент Омского государственного технического университета, г. Омск

Земеников Юрий Дмитриевич, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Фицнер Артём Фёдорович, ведущий специалист, АО «РН-Няганьнефтегаз», г. Нягань

Яковлев Алексей Евгеньевич, инженер, филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть», г. Тюмень

Information about the authors

Andrei F. Sekachev, Senior Lecturer, Omsk State Technical University, e-mail: Seka4ev_andrei@mail.ru

Viktor V. Shalai, Doctor of Engineering, Professor, Honored Worker of Higher School of the Russian Federation, Head of the Department of Oil and Gas Business, Standardization and Metrology, President of Omsk State Technical University

Yuri D. Zemenkov, Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen

Artyom F. Fitzner, Leading Specialist, RN-Nyaganneftegaz JSC, Nyagan

Aleksey E. Yakovlev, Engineer, KogalymNIPIneft Branch of LUKOIL-Engineering LLC, Tyumen