

МЕТОДЫ, ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ



УДК 621.10+536

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-5-166-178

ОЧИСТКА НЕФТИ ОТ АСФАЛЬТЕНО-СМОЛ И ПАРАФИНОВ

Сафиуллин Б.Р., Козелкова В.О., Кашаев Р.С., Козелков О.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Разработать новые методы экспресс-контроля характеристик скважинной жидкости и нефти, в частности асфальтено-смола и парафинов (АСП). Задача актуальна, поскольку из-за ухудшения свойств нефтестройности АСП сопровождается явлением возникновения асфальто-смолисто-парафиновых отложений, что приводит к осложнению добычи нефти, увеличению расхода энергии и износу оборудования. Разработать технологию и установку удаления АСП из нефти воздействиями физических полей. **МЕТОДЫ.** Для разработки методик измерения физико-химических свойств нефти использовался метод ядерного (протонного) магнитного резонанса (ПМР), являющийся неконтактным и не требующим подготовки пробы. Для удаления АСП из нефти использовались: вращающееся магнитное поле, неоднородные переменные электрические и центробежные поля, отстой водонефтяной эмульсии. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Разработаны методики экспресс-контроля концентрации АСП, воды и дисперсного распределения капель воды в водонефтяной эмульсии. Получены экспериментальные соотношения между концентрациями асфальтено-смола, парафинов и временами спин-спиновой релаксации, позволяющие по параметрам ПМР определять характеристики нефти. Теоретически обоснована технология удаления АСП из нефти; описаны силы, действующие на капли водного раствора реагентов с АСП, во вращающемся магнитном и неоднородных переменных электрических полях. Разработана структурно-функциональная схема установки для удаления АСП из нефти, управляемая от разработанного релаксометра ПМР. Произведен расчет источника вращающегося магнитного поля, его оптимизация, физическое и математическое моделирование работы в MatlabSimulink. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Обзор методического и приборного оснащения нефтяных месторождений показал, что контроль АСП осуществляется в лабораториях и длителен по времени, инструментальный метод определения и удаления АСП отсутствует. Получены экспериментальные уравнения для измерения концентраций асфальтено-смола в диапазоне 0-30% с относительной погрешностью $\approx \pm 2\%$, концентраций парафинов в диапазоне 0-30% с относительной погрешностью $\approx \pm 3\%$ и дисперсного распределения капель в диапазоне 0-20 мкм с абсолютной погрешностью $\gamma_H \approx \pm 1$ мкм, предложено устройство для очистки нефти от АСП с управлением от ПМР-анализатора.

Ключевые слова: экспресс-контроль; асфальтено-смола; парафины; протонный; магнитный; резонанс; поля; очистка.

Для цитирования: Сафиуллин Б.Р., Козелкова В.О., Кашаев Р.С., Козелков О.В. Очистка нефти от асфальтено-смола и парафинов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 5. С. 166-178. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-166-178.

REFINING OF THE OIL FROM ASPHALTENE-RESINS AND PARAFFINS

BR. Safiullin, VO. Kozelkova, RS. Kashaev, OV. Kozelkov
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract: THE PURPOSE. To consider the problems of express-control and asphaltene-resins and paraffins (ARP) purification of oil from them. Elaborate new methods of oil-well liquid and oil express-control, especially of ARP. The task is actual, because great amount of ARP lead to ARP – deposits in pipeline, which result to complications in oil-mining, increase of power consumption and wearing of machinery. Elaborate the technology and installation for removing ARP from oil under affect of physical fields. **METHODS.** When solving this problem, we used the backward/forward method of nuclear (proton) magnetic resonance (PMR) relaxometr, which is noncontact, nondestructive, does not need probe preparense. For ARP removing were used: rotating magnetic, nonuniform alternating electric, centrifugal fields and gravitation separation of emulsion. Was used also physica modeling and MatLab Simulink mathematical modeling. **RESULTS.** Elaborated the methodics of express-control of ARP and water concentrations, disperse distributions of water solutions of ARP with reagents in emulsions. Were received experimental equations between ARP and water concentrations and times of PMR spin-spin relaxations, which gives the opportunity determine the oil characteristics from NMR-parameters. Theoreticall grounded the technology of the ARP removing from oil, described the forces, affecting on droplets in the rotating magnetic, nonuniform alternating electric, centrifugal fields. Elaborated the structure-functional scheme of installation for purification of oil from ARP, controlled by elaborated relaxometer NMR-NP2. Made the calculation of the rotating magnetic resonance source, its optimization and physical, mathematical modeling of its function in Matlab Simulink program. **CONCLUSION.** The survey of methodic and instrumental equipment of oil-mining deposits showed, that control of studied oil characteristics is carried in laboratories, expensive and long in time, there is no instrumental method of ARP determination and removing. Were received experimental equations for the asphaltene-resins control in the range 0-30% withthe accuracy of $\approx \pm 2\%$, for paraffinsin the range 0-30% withaccuracy $\approx \pm 3\%$, droplets distribution in the range 1-20 μm withaccuracy $\approx \pm 1\mu\text{m}$, offered the installation for ARP removing from oil.

Key words: express-control; express control; asphaltene-resins; paraffins; proton; magnetic; resonance; fields; purifying.

For citation: Safiullin BR, Kozelkova VO, Kashaev RS, Kozelkov OV. Refining of the oil from asphaltene-resins and paraffinsisolated power hub. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(5):166-178. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-166-178.

Введение

С усложнением условий нефтедобычи из-за ухудшения свойств нефти в связи с ростом в ней концентрации асфальтенов, смол и парафинов (АСП), обводненности, плотности и вязкости необходим постоянный автоматический контроль характеристик скважинной жидкости нефти для оперативного управления работой нефтедобывающего оборудования и оптимизации подготовки, сбора, сепарации и транспортировки нефти. Особого внимания требует меры по предотвращению асфальто-смолисто-парафиновых отложений (АСПО) (рис.1), наличие которых в насосно-компрессорных и магистральных трубах ведет к усложнению эксплуатации, затруднению учета нефти, снижению технико-экономических показателей работы нефтяных скважин и нефтепромысла в целом. Это делает актуальным экспресс-контроль АСП [1] и других характеристик нефти и автоматизированных способов их отделения от нефти для дальнейшей переработки с целью создания цифрового нефтяного промысла. Важность решения указанной проблемы отражена в Распоряжении Правительства РФ от 28.07.2017 N 1632-р «Об утверждении программы Цифровая экономика Российской Федерации».



Рис. 1 Асфальто-смолисто-парафиновые отложения в трубопроводе Fig. 1 Asphalt-resin-paraffin deposits in pipeline

К научной новизне данного исследования можно отнести:

- установлены взаимные корреляции между физико-химическими свойствами нефти и характеристиками АСП в нефти, являющиеся базой для методик их контроля при добыче нефти и очистки ее от АСП и ПМР-релаксационными параметрами, как основы методик их экспресс-контроля;

- предложены методы и алгоритмы экспресс-контроля АСП повременам спиновой релаксации T_{3AC} , используемые для управления установкой по удалению АСП из нефти;

- разработана структурная схема, модель и блоки установки по отделению асфальтенов, смол и парафинов от нефти с экспресс-контролем по данным ПМР-релаксации.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования её результатов для создания новых систем управления нефтяным оборудованием по экспресс-данным ПМР-параметров. Предложенные методики развивают приборные средств до уровня автоматического цифрового контроля, что обеспечивает новый цифровой уровень методического и приборного оснащения месторождений. Авторами получен патент РФ №2689103, вошедший в число лучших в РФ за 2019-2020 гг на способ, позволяющий удалять АСП непосредственно в скважине, и добывать нефть более высокого качества.

Литературный обзор

По литературным данным в нефти и по характеристикам исследованных нами образцов АСП колеблются от долей процента до 30% [2]. В статье [3] установлено, что присутствие асфальто-смолистых (АС) веществ способствует устойчивости нефтяных дисперсий и формированию АСПО в насосно-компрессорных трубах и магистральных трубопроводах. Поэтому, вопрос контроля АСП, а также образованию АСПО посвящено большое число работ отечественных Сафиева Р.З., Евдокимов И.Н., Лосев А.П. [3,4] и зарубежных исследователей Mansourpoor., Chi, Kasumu, Yangetal [5-8]. Чан Ван Тунг, Козелковым О.В. была разработана аппаратура и технология экспресс-контроля характеристик нефти, а также структурно-функциональная схема установки по экспресс-контролю и удалению примесей (воды и солей) из нефти [2, 9, 10]. В статье [15] изложена разработанная методика определения распределения капель воды в эмульсиях для экспресс-контроля процесса удаления воды (водного раствора реагента) в установке, которая, однако еще не была адаптирована к применению для удаления АСП из нефти.

В связи с этим актуальна задача разработки новых методов проточного контроля АСП и характеристик скважинной жидкости и нефти при её добыче, подготовке и транспортировки во всем диапазоне их значений в едином проточном анализаторе.

Материалы и методы

Уникальными возможностями, отмеченными в главе зарубежной монографии [2] обладает один из наиболее современных - метод ядерного (протонного) магнитного резонанса (ПМР), являющийся неконтактным, неразрушающим, не требующий подготовки пробы и легко автоматизируемый и экспрессным (время измерения в среднем < 2 минут). Аппаратура ПМР-релаксометрии может быть применена для контроля и управления работой установки по повышению качества нефти очисткой от АСП. На кафедре «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета с 2000 г. ведутся работы по созданию аппаратуры на базе протонной магнитной резонансной (ПМР) релаксометрии для экспресс-контроля и анализа физико-химических свойств и характеристик скважинной жидкости и нефти.

В данной статье нами исследованы нефти и стандартные образцы, предоставленные ПАО «Татнефть», АО «Транснефть», Томским ЦСМ. Их характеристики описаны в таблицах 1 и 2. Из-за практической химической неразличимости асфальтенов и смол, нами использованы данные по суммам (АС) этих компонентов в нефти.

Таблица 1

Характеристики нефтей ПАО Татнефть, АО Транснефть, Томского ЦСМ

Характеристики образцов	СИК Н-215	СИК Н-223	СИК Н-224	СИК НС-1	СИК НС-4	Транс-нефть1	Транс-нефть2	Станд 1.2%	Станд д3.6%	Станд д3.7%	Станд д7%
$\rho_{20}(\text{кг/м}^3)$	866,6	879,9	902	918,4	920,6	863,2	879	-	-	-	-
Влажность W (%)	0,062	0,06	0,12	39,52	17,03	0,15	0,18	-	-	-	-
Соли (мг/л)	17,4	53,4	48,3	1732	590	18,2	24,4	-	-	-	-
Парафин (%)	4,2	1,8	3,7	-	-	-	-	1,2	3,6	3,7	7

Вязкость мм ² /с	-	-	-	-	-	14,45	19,23	-	-	-	-
-----------------------------	---	---	---	---	---	-------	-------	---	---	---	---

Таблица 2

Характеристики образцов нефтей от НГДУ ПАО Татнефть и модельных образцов

Образцы нефтей	Плотность кг/м ³	Асфальтены. %	Смолы, бз+сбз %	Парафины, %
Ленинградская	873	2,3	19,8	
Ленинградская	867	3,4	-	-
Альметьевская	867,5	3,3	17,4+7,1	3,1
Альметьев+0,5 г C ₂₂ H ₄₆	867,5	3,3	17,4+7,1	6,2
Альметьев.+1 г C ₂₂ H ₄₆	867,5	3,3	17,4+7,1	9,2
Альметьев+ 1,5 г C ₂₂ H ₄₆	867,5	3,3	17,4+7,1	11,9

Результаты

Зависимости T_{2B} от концентрации асфальтенов и асфальтено-смола, полученные для температур нефти 20, 30, 50 и 70°C, представлены на рисунке 2. Максимальная температура нефти на выходе из скважины обычно не превышает 70 градусов, но может быть и ниже (например, зимой), поэтому взяты и более низкие температуры.

$T_{2B}(мс)$

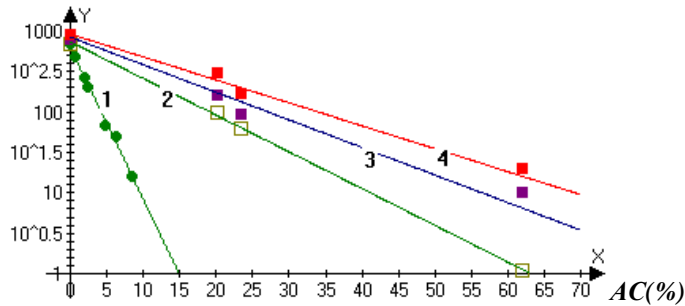


Рис. 2 Зависимости T_{2B} от концентрации асфальтенов (кривая 1) и асфальтено-смола, полученные для температур нефти 20, 30, 50 и 70°C (кривые 2-4).

Fig. 2 Dependence of T_{2B} on the concentration of asphaltenes (curve 1) and asphaltene resins obtained for oil temperatures 20, 30, 50 and 70°C (curves 2-4).

Они с коэффициентами корреляции $R^2 \approx 0.9$ описываются уравнениями:

Для 20°C $T_{2B} = 626 \exp(-0,43 AC)$ (1)

Для 30°C $T_{2B} = 741 \exp(-0,104 AC)$ (2)

Для 50°C $T_{2B} = 844 \exp(-0,078 AC)$ (3)

Для 70°C $T_{2B} = 923 \exp(-0,065 AC)$ (4)

На рисунке 3. представлены полученные зависимости концентраций парафинов P от времен релаксации $T_{2a,в,с}$

$Pар (%)$

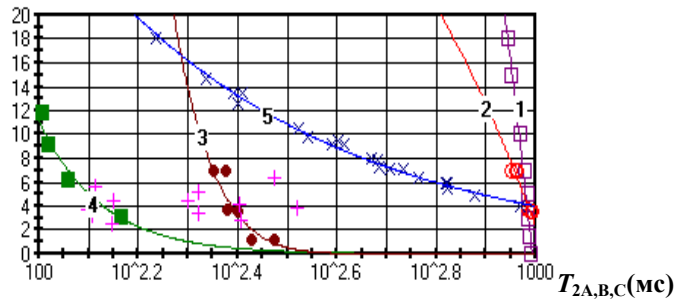


Рис.3. Зависимости концентраций парафинов P от времен релаксации $T_{2a,в,с}$ фаз А, В, С.

Fig.3. Dependence of paraffin P concentrations on relaxation times $T_{2a, B, C}$ phases А, В, С.

1,2,3 – кривые А, В и С в стандартных образцах Нефтемодульстрой, Омск; 4- кривая для разных концентраций парафина в Альметнефти; 5- кривая длины цепей парафинов CL по данным

1.2.3 - curves А, В and С in standard samples Neftemodulastroy, Omsk; 4 - curve for different concentration of paraffin in Almetneft; 5 - curve of length of paraffin CL chains by data [11], crosses

[11], крестами обозначены данные из работы [12]. denoted data from work [12].

Кривые на рисунке 3 описываются с коэффициентами корреляции $R^2 = 0,83-0,98$ и среднеквадратическими отклонениями $S = 0,5-1$ уравнениями:

$$\text{Кривая 1 } \Pi = 167,3 - 0,17T_{2A} \quad (5)$$

$$\text{Кривая 2 } \Pi = 52 - 0,05T_{2A} \quad (6)$$

$$\text{Кривая 3 } \Pi = 3722 \exp(-0,028T_{2B}) \quad (7)$$

$$\text{Кривая 4 } \Pi = 8,5 \cdot 10^7 \cdot (T_{2A})^{-3,44} \quad (8)$$

Ур (5-8) представлены в форме, удобной для определения концентраций Π по временам спин-спиновой релаксации T_{2A} протонов. Наличие зависимостей для времен релаксации разных протонных фаз позволяет верифицировать полученные данные по разным каналам.

В качестве технологий депарафинизации (ДП) и деасфальтизации (ДА) сырья и нефтепродуктов в настоящее время используется несколько способов: сольвентная, карбамидная, карбамидно-кристаллическая, карбамидно-сольвентная фирмы *Edeleanu Gesellschaft* (Германия) и каталитическая. Практически все они основаны на реакциях водных растворов карбамида с АСП, требуют пробоподготовки, термообработки и длительны во времени (до 20 ч.). Для карбамидно-сольвентной деасфальтизации и депарафинизации (напр. по технологии *Edeleanu Gesellschaft*), требуется вначале создать тонкодисперсную эмульсию из водного реагента, а затем удалить водный раствор из нефти, т.е. встает проблема удаления водных растворов АСП путем обезвоживания - демульсации.

Для обезвоживания ВНЭ наибольшее практическое применение в парках подготовки нефти и на нефтеперерабатывающих заводах нашёл способ ее обработки во внешнем переменном электрическом поле напряжённостью $E_0 = 15-33$ кВ, используемый в электрообезвоживающих установках (ЭЛОУ), наиболее продвинутой из которых является установка Швецова с сотр.(в чем преимущества данной установки) [13].

Нами предложено усовершенствовать установки обезвоживания введением вращающегося магнитного поля (ВМП), создаваемого статорными обмотками асинхронного двигателя с ферромагнитным ротором и неоднородных переменных электрических полей (НЭП) между электродами на роторе. На рисунке 4 представлена технологическая схема универсальной установки для удаления водной фазы с АСП из нефти.

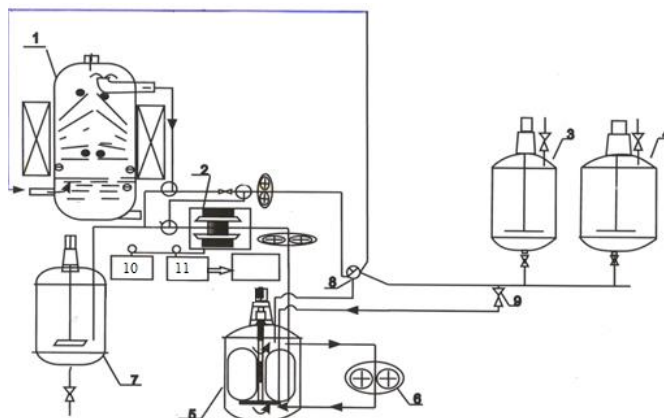


Рис. 4 Технологическая схема универсальной установки для удаления примесей (парафина, асфальтено-смола и водного раствора реагента с АСП) из нефти. 1 - блок удаления водной фазы во ВМП и НЭП, 2 - магнит с датчиком ПМР-анализатора, 3 - емкость с нефтью; 4 - емкость с водным раствором реагента; 5 - блок эмульгирования нефти с реагентом; 6 - шестеренный насос, способствующий дополнительной эмульсации; 7 - емкость для очищенной нефти; 8 - трехходовой кран; 9 - автоматический кран; 10 - усилитель мощности радиочастотных импульсов; 11 - усилитель ЯМР-

Fig. 4 The technological scheme of the universal plant for removing impurities (paraffin, asphaltene-resin and aqueous solution of the reagent with ACP) from oil. 1 - aqueous phase removal unit in the WMP and NEP, 2 - magnet with MRR analyser sensor, 3 - tank with oil; 4 - tank with aqueous reagent solution; 5 - oil emulsification unit with reagent; 6 - gear pump promoting additional emulsion; 7 - purified oil tank; 8 - three-way crane; 9 - automatic crane; 10 - RF pulse power amplifier; 11 - NMR signal amplifier in PMR analyzer.

сигналов в ПМР-анализаторе.

Степень очистки зависит от степени загрязнения исходного сырья, и фактически трудно предсказуем, поэтому очистку ведет до требуемой степени, закичивая процесс. Очистка осуществляется до III категории по ГОСТ Р 51858-2002

На рисунке 5 представлена подробная структурная схема блока. Вращающееся магнитное поле создается статорными обмотками асинхронного двигателя с ферромагнитным ротором (АДФМР). Здесь цифрами на рисунке 5 обозначены: 1 - корпус с входными и выходными патрубками, расположенными под углом так, что придавать вращательное движение поступающей эмульсии, тем самым создавая центробежные силы к стенкам блока 1; 2 - источник ВМП; 3 - источник высокого переменного напряжения; 4 - отрицательно заряженный сетчатый электрод; 5, 6 и 7 - положительно заряженные конусные электроды на роторе; 8 - отстоявшаяся вода с водным раствором реагентов с АСП; 9 - поверхность отстоя воды; 10 - зона коалесценции капель воды с реагентом и АСП под действием ВМП; 11 - ферромагнитный ротор; 12 - патрубок вывода остаточного газа; 13 - патрубок слива отстоявшейся воды с АСП; 14 - магнитная система релаксометра ПМР с проточным датчиком; 15 - электронные блоки релаксометра, расположенные на расстоянии $l = v_0 c$ от магнитной системы 14 (здесь v_0 - резонансная частота ПМР, c - скорость света); 16 - емкость для очищенной нефти; 17 - емкость для отстоявшейся воды; ПП1-ПП3 - переключатели потоков эмульсии.

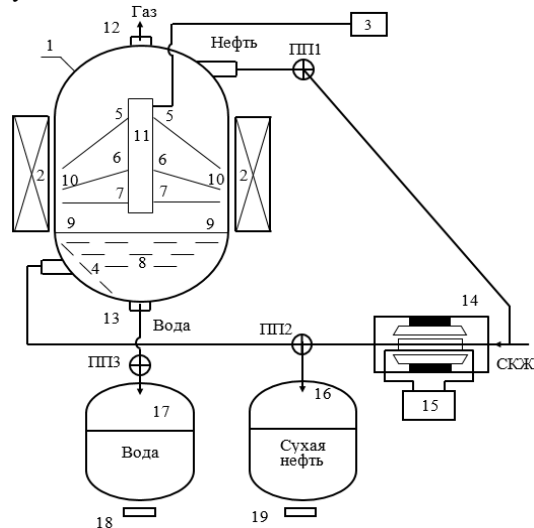


Рис. 5 Структурная схема блока разделения эмульсии нефти с АСП с реагентом

Fig.5. Structural diagram of oil emulsion unit with ACP with reagent

Исследования показывают [2], что для контроля и управления процессом из всех известных, метод ядерного (протонного) магнитного резонанса (ПМР) является, пожалуй единственным, способным одновременно контролировать такие критически важные для деэмульсации характеристики, как: концентрация воды W в эмульсии, АСП, вязкость η , плотности ρ в нефти, а также дисперсность D_{CA} (среднеарифметический диаметр капель воды/раствора реагента) [15]. Контроль осуществляется проточным ПМР-анализатором.

Процесс удаления АСП в установке под контролем ПМРА включает стадии:

1. **Входной контроль** физико-химических свойств сырья (концентрации АСП, воды W и плотности ρ_H нефти) экспресс-методом в анализаторе ПМРА путем:

- предварительного измерения эффективных времен релаксации воды $T_{2В}$ и нефти $T_{2Н}$ с использованием последовательности Карра-Парселла-Мейбум-Гилла (КПМГ) [14];
- измерении эффективного T_2^* времени релаксации в контролируемой ВНЭ;
- определении концентраций АС и П в нефти по ур. (1-8);
- определении влажности нефти по формуле: $W_{ПМР} = T_{2В}(T_2^* - T_{2Н})100\% / T_2^*(T_{2В} - T_{2Н})$ (9)

2. **Снижение W** водной фазы АСП с реагентом блоке 1.

Смесь АСП с водой и реагентом в виде водонефтяной эмульсии (ВНЭ) поступает в блок 1 через патрубок через сетку, предотвращающую попадание механических примесей и являющуюся одновременно отрицательно заряженным электродом, а затем через слой отстоя водной фазы, в которой улавливаются наиболее крупные капли воды. При прохождении эмульсии сквозь сетку патрубка капля и частицы АСП приобретает заряд q :

$$q \approx 1,64 E_0 r_0^2 \quad (10)$$

$$\text{Приобретя заряд, капля отталкивается с силой: } F \approx 1,37E_0^2 r_0^2 \epsilon_{cp} = 0,835 qE_0, \quad (11)$$

где r_0 и ϵ_{cp} - средний радиус капли и диэлектрическая проницаемость среды.

Выше зоны отстоя находится промежуточный слой, где более мелкие капли эмульсии коалесцируют, подвергаясь обработке ВМП, создаваемым обмотками АДФМР и одновременно НЭП между поверхностью воды и электродами на роторе, на которые подано положительное постоянное/переменное напряжение.

В промежуточной зоне на капли воды действуют силы:

$$\text{а) сила } F_L \text{ Лоренца: } F_L = q [v \cdot B] \quad (12)$$

где B - магнитная индукция ВМП, v - линейная скорость вращения ВМП. Под действием силы F_L заряженные капли перемещаются вниз, в зону отстоя. Из-за наличия заряда и дипольного момента капли движутся по направлению градиента магнитного поля, который максимален на периметре блока 1 и ближе к источнику вращающегося магнитного поля.

б) силы F_D диполь-дипольного взаимодействия между поляризованными каплями-диполями, определяемые формулой:

$$F_D = 6(|\alpha|)^2 E_0^2 \epsilon_{cp} / r^4 \quad (13)$$

Капли при таком типе взаимодействия притягиваются независимо от того, постоянное поле или переменное, поскольку в ур.(13) поле представлено в квадрате. Электрическое поле между электродами изменяется в сторону увеличения по мере повышения расположения электродов от $E_{уд} = 2,5$ кВ/см до 7,5 кВ/см в связи с тем, что для концентраций водной фазы $W < 2,9$ % расстояние между каплями-диполями становится больше $d \approx br_0$, силы притяжения по ур.(13) становятся малыми, и требуются более высокие поля $E_{уд}$;

$$\text{в) силы диэлектрфореза: } F_E = 2\pi\epsilon_0(\epsilon - 1)E_0 R^3 \text{grad} E^2 / (\epsilon + 2) \quad (14)$$

Силы F_G перемещают каплю в зону максимальных электрических полей, т.е. к отрицательно заряженным стенкам. В НЭП конусных электродов 5 все капельки движутся в сторону увеличения напряженности E^2 , и повышенной концентрации капель. Это приводит к повышению скорости коагуляции и более быстрому расслоению эмульсии.

Перед выходным патрубком обезвоженная нефть проходит через олеофильные фильтры, что позволяет повысить эффект отделения воды от нефти.

3. **Контроль в ПМР-анализаторе** характеристик нефти: концентраций АСП по ур. (1-8) и среднеарифметического диаметра капель воды $D_{CA}(\text{мкм}) = \sum N_i D_i / \sum N_i$ по формуле [15]:

$$D_{CA} = 0,1645 \cdot \exp(2,85 \cdot T_{1B}) \quad (15)$$

4. Альтернативный контрольный анализ дисперсности осуществляется также на *микроскопе Microscope MC-300 (Austria)*.

Разделение 50%-й эмульсии в макетной установке с ВМ и НЭП осуществлялось при включении на статорные обмотки АДФМР 3-х фазного напряжения в течение $t=10$ мин. Анализ релаксометром ПМР-НР2п, описанном в [2], нефти, полученной на выходе установки, показал, что концентрация воды в ней составляет 1,7 %. Удельные затраты электроэнергии составили $0,5 \div 1,5$ В·ч/дм³, что близко к значениям $0,2 \div 0,8$ кВ·ч/т затрат для на ЭЛОУ АВТ-6 с удельной напряженностью электрического переменного поля $E_{уд} = 1-3$ кВ/см. Сюда, однако, необходимо добавить мощность $P_{СТ}$, потребляемую на питание статорных обмоток для вращающегося магнитного поля $P_{СТ} = 1,25$ кВ·ч/дм³.

Характеристики АДФМР даны в работе [16]. Нами предложен метод расчета параметров АДФМР, оптимизирующий его конструкцию. В воздушном зазоре $\delta = 0,1 \div 0,9$ мм большинства электрических машин значение магнитной индукции составляет $B_0 = 0.6 \div 1$ Тл с номинальным скольжением $s = 0,7 \div 0,9$. Но так как нами как источник ВМП используется АДФМР, его номинальное скольжение - в пределах $s = 0,3 \div 0,4$.

Ротор имеет диаметр $D = 0,03$ м (при диаметре внутренней стороны статора 0,07 м), т.е. зазор равен $\delta = 0,02$ м для возможности размещения конических электродов для создания неоднородных электрических полей в установке по снижению концентраций АСП в нефтина рисунках 4 и 5. Уменьшение диаметра D ротора приводит к снижению индукции магнитного поля B_0 ввиду обратной пропорциональности B_0 величине δ , что по данным работы [17] отражено в таблице 3.

Таблица 3

Зависимость индукции магнитного поля $B(\text{Тл})$ от диаметра D якоря

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
--	---	---	---	---	---	---	---	---	---

$B(\text{Тл})$	0,4	0,5	0,59	0,65	0,71	0,76	0,8	0,84	0,88
$D(\text{м})$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5

По данным таблицы зависимость $B(D)$ может быть описана уравнением:

$$B(\text{Тл}) = 0,5 + 7,6 D(\text{м}) \quad (16)$$

Для того, чтобы определить, как скажется изменение диаметра ротора такой машины на скольжении s ферромагнитного ротора (и соответственно на его угловой скорости вращения ω_2), воспользуемся уравнением из [17,] для активного сопротивления ротора из ферромагнитного материала:

$$R = 1,4 \cdot 4 \cdot m_1 l_1 w_{31}^2 k_{л,с} \sqrt{[\omega_1 \mu_0 \mu \rho (2s)^{-1}] / (\pi D)} \quad (17)$$

где $m_1 = 3$ число фаз обмотки статора, $l_1 = 0,1$ – длина ротора, w_{31} – эффективное число витков фазы обмотки статора, $k_{л,с} = 1$ – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления ротора за счет лобовых частей ротора, $\omega_1 = 2\pi n / 60 = 6,28 \cdot 1500 / 60 = 157$ рад/с – угловая скорость вращения ВМП, магнитная постоянная $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$, относительная магнитная проницаемость на поверхности ротора $\mu = 200$, $\rho = 1,3 \cdot 10^{-7}$ Ом·м – удельное электрическое сопротивление стали.

Уравнение (17) преобразуем к виду, удобному для расчетов скольжения:

$$s = 5,6^2 m_1^2 l_1^2 w_{31}^2 \omega_1 \mu_0 \mu \rho / 2R^2 \pi^2 D^2 = 7200 / D^2 \quad (18)$$

Результаты расчетов представлены в виде графика на рисунке 6.

Видно, что со снижением диаметра ротора D скольжение растет по ур. (19):

$$s = 3,03 \cdot \exp(-46,3D) \quad (19)$$

С другой стороны, используя зависимость $B(D)$ и подставив ее в ур. (19), получим зависимость $s(B)$ в виде уравнения:

$$s = 8,9 \exp(-3,52 \cdot B) \quad (20)$$

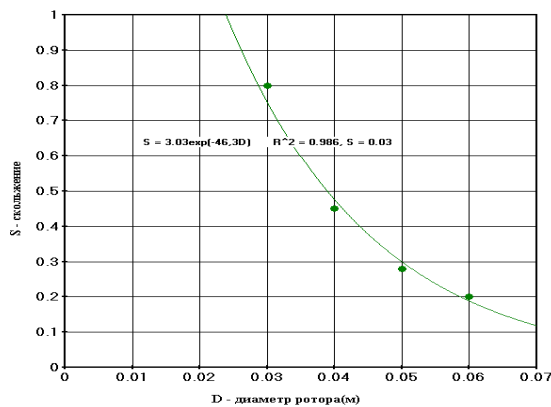


Рис. 6 Зависимость скольжения s в АДФМР от диаметра D ротора. *Fig. 6 The dependence of the sliding s in the ADFMP on the diameter D of the rotor.*

Анализ динамических свойств АДФМР является достаточно сложной задачей из-за существенной нелинейности описывающих их уравнений, обусловленной наличием произведений переменных. Поэтому, удобную форму математического описания дают уравнения относительно производной потокосцепления [18]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_{1x}}{dt} &= u_{1x} - \frac{R_1 L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{1x} + \frac{R_1 L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{2x} + \omega_{0эл} \Psi_{1y}; \\ \frac{d\Psi_{1y}}{dt} &= u_{1y} - \frac{R_1 L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{1y} + \frac{R_1 L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{2y} - \omega_{0эл} \Psi_{1x}; \\ \frac{d\Psi_{2x}}{dt} &= -\frac{R'_2 L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{2x} + \frac{R'_2 L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{1x} + (\omega_{0эл} - \omega_{эл}) \Psi_{2y}; \\ \frac{d\Psi_{2y}}{dt} &= -\frac{R'_2 L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{2y} + \frac{R'_2 L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{1y} - (\omega_{0эл} - \omega_{эл}) \Psi_{2x}; \\ M &= \frac{p_{\Pi} L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} (\Psi_{1y} \Psi_{2x} - \Psi_{1x} \Psi_{2y}). \end{aligned} \right\} (21)$$

В приведенных уравнениях индексы 1 соответствуют токам в обмотке статора, индексы 2 – в роторе. Структурная схема электрохимического преобразования энергии в АДФМР, полученная по ур. (21), представлена на рисунке 7. Схема, реализованная в среде *MatLabSimulink*, позволяет анализировать тенденции изменения выходных координат АДФМР при изменениях диаметра ферромагнитного ротора D .

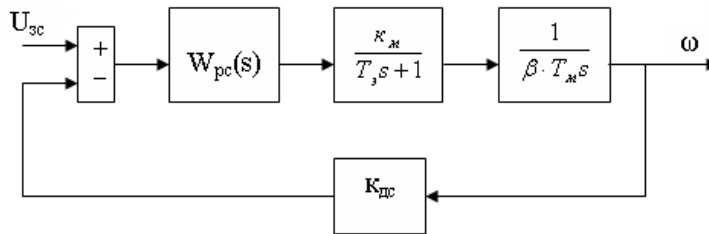


Рис.7 Структурная схема динамической модели контура скорости. Fig. 7 Flow diagram of the dynamic speed loop model.

Необходимо определить передаточную функцию регулятора скорости для разомкнутого контура регулирования с магнитными параметрами. Передаточная функция разомкнутой системы, настроенной на оптимум по модулю, должна иметь вид:

Исходя из этого, имеем:

$$W_{кк} = W_{pc} \cdot \frac{K_m}{T_s p + 1} \cdot \frac{1}{\beta T_m p} \cdot K_{dc} = \frac{1}{2T_{\Sigma}^{кк} p (T_{\Sigma}^{кк} p + 1)}, \quad (22)$$

$$W_{pc} = \frac{(T_s p + 1) \cdot \beta T_m p}{K_m \cdot K_{dc} \cdot 2T_{\Sigma}^{кк} p (T_{\Sigma}^{кк} p + 1)}.$$

С учетом уравнений для постоянных времени T_s и T_{ϕ} (которые малы), электромагнитная постоянная времени: $T_s = \frac{1}{\omega_{0элном} s_{\kappa}} = \frac{1}{314 \cdot 0.2} = 0,0159(c)$, где $\omega_{0элном}=314$, рад/с.

Электрохимическая постоянная времени: $T_m = \frac{J}{\beta} = \frac{56 \cdot 10^{-4}}{2,06} = 0,0027$, где β - модуль жесткости линеаризованной механической характеристики.

$$\beta = \frac{2M_{\max}}{\omega_{0ном} \cdot s_{\kappa}} = \frac{2 \cdot 32,43}{157 \cdot 0,2} = 2,06 \quad (23)$$

Соответственно, передаточная функция принимает вид: $W_{pc} = \frac{K_{pc}}{(T_{\phi} p + 1)}$. (24)

Скорость вращения поля при $f=f_{ном}=50$ Гц: $\omega_{0ном} = \frac{314}{p_{\Pi}} = \frac{314}{2} = (157 \text{ рад/с})$ (25)

Коэффициент преобразователя частоты: $\kappa_f = \frac{\omega_{0ном}}{U_{вых}} = \frac{314}{10} = 31,4$, где $U_{вых}=10$ В – напряжение управления инвертором.

Подбором значений $\kappa_{p,m}$ и $\kappa_{п,с}$ обеспечивается положительная связь по скорости:

$$(k_{p,m} \cdot k_{n,c}) = \frac{p_{II}}{k_f} = \frac{2}{31,4} = 0,0639 \approx 0,064. \quad (26)$$

Суммарная постоянная времени: $T_{\Sigma}^{kc} = T_{\phi} + T_{\gamma} = 0,01 + 0,0159 = 0,0259(c)$, где $T_{\phi}=0.01$ с – постоянная времени фильтра.

Коэффициент обратной связи по скорости (датчик скорости): $k_{oc} = \frac{1,2 \cdot U_{вых}}{1,2 \cdot \omega_n} = \frac{1,2 \cdot 10}{1,2 \cdot 149,15} = 0,067$, где ω_n – номинальная угловая частота вращения:

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} = \frac{3,14 \cdot 1425}{30} = 149,15 \quad (27)$$

Коэффициент регулятора скорости

$$k_{pc} = \frac{\beta T_m}{2T_{\Sigma}^{kc} k_m k_{oc}} = \frac{2,06 \cdot 0,0027}{2 \cdot 0,0259 \cdot 0,067 \cdot 8,18} = 0,196. \quad (28)$$

С помощью программы *MatlabSimulink* настраиваем контур скорости на оптимум по модулю при моменте статической нагрузки $M_c=0$. На рисунке 8 изображена структурная схема динамической модели контура скорости для переходных характеристик.

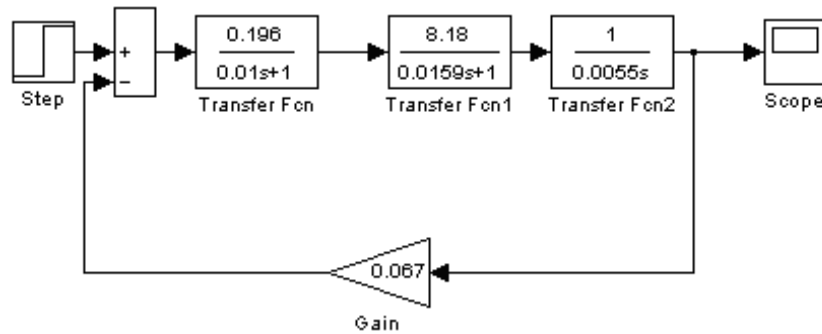


Рис.8 Структурная схема динамической модели контура скорости при построении переходных характеристик с применением *Matlab*.

Fig. 8 Structural diagram of dynamic model of speed contour when constructing transition characteristics using *Matlab*.

На рисунке 9 представлена переходная характеристика по управляющему воздействию.

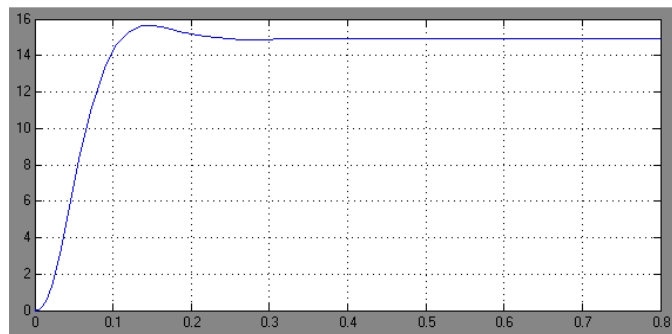


Рис.9. Переходная характеристика скорости по управляющему воздействию.

Fig. 9. Transient velocity of control action.

Данные рисунка 9 с максимальным отклонением $\Delta\omega_i = 0,06$ рад/с совпадают с данными таблицы 1. Со снижением диаметра D ротора снижается и угловая скорость его вращения с $\omega_1 \approx 260$ рад/с до $\omega_2 \approx 75$ рад/с. Переходный процесс идет в колебательном режиме в течение 8.5 с с размахом $<\pm 2\%$, что позволяет конструктивно модифицировать АДФМР на разные диапазоны скоростей вращения и значений магнитных полей.

По результатам моделирования в среде *MatlabSimulink* перерегулирование системы составило: $\omega_{max} = 15,63$ рад/с, $\omega_{уст} = 14,9$ рад/с, $\sigma = (\omega_{max} - \omega_{уст}) \cdot 100\% / \omega_{уст} = 4,7\%$. Время первого согласования составило 0,11 с, запас по фазе 63,8 градуса; запас по амплитуде 18,6 Дб. По данным сделан вывод, что контур скорости настроен правильно.

Заключение

1. Обзор методического и приборного оснащения нефтяных месторождений для контроля асфальтено-смолисто-парафинов (АСП) показал, что приборно-методическая база контроля АСП на месторождениях практически отсутствует, диапазон и точность измерений низки и неоперативны, необходимы методики и устройства их проточного экспресс-контроля АСП для предотвращения АСПО-отложений в скважинах и трубопроводном транспорте. Этим условиям многопараметрического экспресс-контроля удовлетворяет метод ПМР-релаксометрии и проточный ПМР-анализатор.

2. Разработаны и апробированы методики экспресс-контроля, расширены номенклатура и диапазоны измерений компонент нефти, участвующих в формировании АСПО и приведены экспериментально зависимости между временами релаксации протонов нефтей для:

- концентраций асфальтено-смолов диапазоне 0-30% с погрешностью $\gamma_{AC} \approx \pm 2$ %.
- концентраций парафинов в диапазоне 0-30% с погрешностью $\gamma_{II} \approx \pm 3$ %.
- дисперсного распределения капель в диапазоне 0-20 мкм с погрешностью $\gamma_{II} \approx \pm 1$ мкм.

3. Предложен способ снижения концентрации АСП-компонент нефтей в установке с вращающимися магнитным и неоднородными электрическими полями с управлением от ПМР-анализатора, реализующей данный способ.

4. Представлены способ конструктивной оптимизации и расчет источника вращающегося магнитного поля для его применения в конкретных диапазонах конструктивных размеров и динамических параметров.

5. В *MatlabSimulink* осуществлено моделирование управления скоростью вращения магнитного поля в асинхронном двигателе с ферромагнитным ротором в установке очистки нефти от асфальтено-смолов и парафинов нефти.

Литература

1. Чан Ван Тунг, Кашаев Р.С. Радиочастотный генератор и программа импульсных последовательностей релаксометра ПМР // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 3. С. 90-96.
2. Злобин А.А. Экспериментальные исследования процессов агрегации и самосборки наночастиц в нефтяных системах // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2015. №15. С.57-72
3. Тихомирнов Л.И., Земцов С.А., Волков С.В., Мещеряков М.А., Волчков С.В. Интеллектуальное месторождение // Нефтегаз. 2019. №.1-2. С.142-143..
4. Евдокимов И.Н., Лосев А.П. Применение УФ-видимой абсорбционной спектроскопии для описания природных нефтей // Нефтегазовое дело. 2007. Т.2. С. 31-37. <http://www.ogbus.ru>.
5. Кашаев Р.С., Козелков О.В. Кубанго Б.Э. Проточные ПМР-анализаторы для контроля скважинной жидкости по ГОСТ 8.615-2005 // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. №1-2. С. 137-151.
6. Швецов В. Н., Юнусов А. А., Набиуллин М. И. Новые технические решения по усовершенствованию электродегидраторов для обезвоживания и обессоливания нефти // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2012. № 5. С. 48-54.
7. Кашаев Р.С., Сафиуллин Б.Р., Козелков О.В. Paraffins in petroleum oils, studied by nuclear magnetic resonance relaxometry. *Advanced Aspectsof Engineering Research*. London, 2021. No.:2021/BP/2354F.
8. Safieva R.Z., Mishin V.D. Systems Analysis of the Evolution of Views on Oil Systems: From Petroleum Chemistry to Petroinformatics // *Pet. Chem.* 2021. V.61,p.539-554.
9. Mansourpoor M., Azin R. Osfour S., Izadpanah A. Experimental investigation of wax deposition from waxy oil mixtures // *Applied Petrochemical Research*, V.9, Issue 2, pp 77–90.
10. Kasumu A. Mehrotra A. Solids deposition from wax–solvent–water “Waxy” mixtures using a cold finger apparatus // *Energy Fuels*. 2015. V.29. P.501–511. <https://doi.org/10.1021/ef501835b>.
11. Mansourpoor M., Azin R. Osfour S., Izadpanah A. Experimental investigation of wax deposition from waxy oil mixtures // *Applied Petrochemical Research*, V.9, Issue 2.
12. Kasumu A. Mehrotra A. Solids deposition from wax–solvent–water “Waxy” mixtures using a cold finger apparatus // *Energy Fuels*. 2015. V.29. P.501–511. <https://doi.org/10.1021/ef501835b>.
13. Nikolskaya E., Hiltunen Y. Molecular properties of fatty acid mixtures estimated by on-line time domain NMR // *Appl. Magn. Res.* 2019. 50 (1-3), 159-170.

14. Kozelkova V.O., Kozelkov O.V., Kashaev R.S. Nuclear magnetic resonance relaxometry method for the study of crude oil/water emulsions and dispersion of water droplets./ Intern.Conf «Process Management and Scientific Developments» Abstracts. Birmingham, UK.2021. p.208-214.

15. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А. Оценка эффективности безотказности систем // Вести вузов Черноземья. 2013. №1. с.25–33.

16. Бертинов А.И., Бут Д.А., Мизюрин С.Р. Специальные электрические машины. – М.: Энергоиздат, 1982. -552 с.

17. Арсеньев О.В., Коновалов Ю.В. Электрические машины. – Ангара. Изд. АГУ, 2016. -17с.

18. Терехов В. М. Системы управления электроприводов. М.: Изд.«Академия», 2006.

19. Петров И.В., Иванов Р.Н. Название патента. Патент РФ на изобретение №2193864. 10.12.2002. Бюл. №34. Доступно по: http://www.ntpo.com/patents_technical/technical_1/technical_432.shtml. Ссылка активна на 12 ноября 2017.

Авторы публикации

Сафиуллин Б.Р. – ассистент кафедры «Приборостроение и мехатроника», Казанский государственный энергетический университет.

Козелкова В.О. – инженер кафедры «Приборостроение и мехатроника», Казанский государственный энергетический университет.

Кашаев Р.С. – д-р техн. наук, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника», Казанский государственный энергетический университет.

Козелков О.В. – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Приборостроение и мехатроника», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Tran Van Tung, Kashaev R.S., Radiochastotny generator I programma impuls nichposledovatelnoy relaksometriy PMR. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(3):90-96.

2. Zlobin A.A. Eksperimentalniye issledovaniya prosessov agregatsiy I samosborki nanochastits v neftyanich sistemach. *Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftegazovoe I gornedelo.* 2015;15:57-72

3. Tihomirnov LI, Zemtsov SA, Volkov SV, et al. Intellectualnoye mestorogdenie. *Neftegaz.* 2019;1-2:142-143.

4. Evdokimov IN, Losev AP. *Application of UV-Visible Absorption Spectroscopy for Description of Natural Oil and Gas Business.* <http://www.ogbus.ru>.

5. Kashaev RS, Kozelkov OV, Kubango BE. *Prochnyye PMR-analizatory dlya kontrolya skvaginnoy gidkosti po GOST 8.615-2005.* 2017;1-2:137-151.

6. Shvetsov VN, Yunusov AA, Nabiullin MI. *Novye technicheskie resheniya po usovershenstvovaniyu elektrodehidratorov dlya obezvozhivaniya I obessolivaniya nefiti. Oborudovanie I tehnologii neftegazovogo kompleksa.* 2012;5:48-54.

7. Kashaev RS, Safiullin BR, Kozelkov OV. *Paraffins in petroleum oils, studied by nuclear magnetic resonance relaxometry.* *Advanced Aspectsof Engineering Research.* London, 2021. No.: 2021/BP/2354F

8. Safieva RZ., Mishin V.D. Systems Analysis of the Evolution of Views on Oil Systems: From Petroleum Chemistry to Petroinformatics. *Pet. Chem.* 2021;61:539-554.

9. Mansourpoor M., Azin R. Osfour S., Izadpanah A. Experimental investigation of wax deposition from waxy oil mixtures. *Applied Petrochemical Research.* 2020;9(20):77–90.

10. Kasumu A. Mehrotra A. Solids deposition from wax–solvent–water «Waxy» mixtures using a cold finger apparatus *Energy Fuels.* 2015;29:501–511. <https://doi.org/10.1021/ef501835b>.

11. Mansourpoor M, Azin R. Osfour S., Izadpanah A. Experimental investigation of wax deposition from waxy oil mixtures. *Applied Petrochemical Research.* 2020;9(2):77–90.

12. Kasumu A. Mehrotra A. Solids deposition from wax–solvent–water «Waxy» mixtures using a cold finger apparatus. *Energy Fuels.* 2015;29:501–511. <https://doi.org/10.1021/ef501835b>.

13. Nikolskaya E, Hiltunen Y. Molecular properties of fatty acid mixtures estimated by on-line time domain NMR. *Appl. Magn. Res.* 2019;50 (1-3);159-170.
14. Kozelkova VO, Kozelkov OV, Kashaev RS. *Nuclear magnetic resonance relaxometry method for the study of crude oil/water emulsions and dispersion of water droplets.* Intern.Conf «Process Management and Scientific Developments» Abstracts. Birmingham, UK.2021. p. 208-214.
15. Shpiganovich AN, Shpiganovich AA. Ocenka ehffektivnosti bezotkaznosti system. *Vesti vuzov CHernozem'ya.* 2013; 1:25-33.
16. Bertinov AI, But DA, Mizyurin SR. *Spetsialnyie elektricheskie mashiny.* M.:Energoizdat, 1982. -552 с.
17. Arsen'ev OV, Kononov YuV. *Elektricheskie mashiny.* Angara. Izd. AGU, 2016. 17 p.
18. Terechov VM. *Sistemyupravleniyaelectroprivodov.*M.: Izd.«Akademiya», 2006
19. Petrov IV, Ivanov RN. *Nazvaniepatenta – транслитерацией.* Patent RUS. №2193864. 10.12.2002. Byul. №34. Available at: http://www.ntpo.com/patents_technical/technical_1/technical_432.s.html. Accessed: 12 Nov 2017.

Authors of the publication

Bulat R. Safiullin – Kazan State Power Engineering University.

Valeriya O. Kozelkova – Kazan State Power Engineering University.

Rustem S. Kashaev – Kazan State Power Engineering University.

Oleg V. Kozelkov. – Kazan State Power Engineering University.

Получено

31.08.2022г.

Отредактировано

09.09.2022г.

Принято

16.09.2022г.