

УДК 537.868

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДЕГИДРАТОРА ДЛЯ ПРОМЫСЛОВОЙ ПОДГОТОВКИ НЕФТИ

Максудов Денис Вилевич¹,
maksudov.dv@ugatu.su

Янгиров Ильгиз Флюсович¹,
yangirov@yandex.ru

Хазиева Регина Тагировна²,
khazievart@mail.ru

Хакимянов Марат Ильгизович²,
hakimyanovmi@gmail.com

¹ Уфимский государственный авиационный технический университет,
Россия, 450008, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12.

² Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Актуальность. Добываемая нефть большинства месторождений нашей страны имеет значительную обводненность. Содержание воды в нефти достигает 98–99 %. Перекачка нефти с водой по промышленным трубопроводам очень неэкономична. Поэтому нефтяная промышленность испытывает потребность в установках для отделения воды (дегидрататорах). Существует несколько способов дегидратации: химические, механические, термические и электрические методы. Все эти методы имеют свои достоинства и недостатки. В статье предлагается электромагнитный дегидрататор, в котором используется совместное воздействие электрического и магнитного полей. Авторами предложена оригинальная конструкция магнитоэлектродегидрататора, предназначенного для эксплуатации в нефтяной промышленности в целях обезвоживания и обессоливания нефти. В данном устройстве электрическое поле создается системой электродов, а пульсирующее магнитное поле – однофазной обмоткой. Под воздействием электрического поля заряженные частицы воды начинают двигаться к противоположно заряженному электроду, при этом разноименно заряженные капли движутся навстречу друг другу. Обмотка создает пульсирующее магнитное поле, которое индуцирует в каплях воды вихревые токи и взаимодействует с магнитными полями, создаваемыми этими токами. Совместное воздействие электрического и магнитного полей увеличивает частоту столкновений капель, что приводит к их слиянию и увеличению размера. Вследствие этого капли быстрее осаждаются под действием силы тяжести, что позволяет увеличить производительность дегидрататора.

Цель: разработать конструкцию магнитоэлектродегидрататора и провести исследование его характеристик; построить математическую модель процессов разделения воды и нефти и получить графики зависимостей; сформулировать требования к источникам питания для электромагнитных дегидрататоров.

Объекты: установки подготовки нефти, дегидрататоры для разделения водонефтяных эмульсий, установки с электромагнитным воздействием.

Методы: теория электрического поля, теория магнитного поля, математическое моделирование, программа для математических и инженерных вычислений Mathcad.

Результаты. Предложена конструкция магнитоэлектродегидрататора, математическая модель процессов разделения воды и нефти. Получены графики зависимостей магнитной индукции от частоты и производительности дегидрататора. Построена зависимость времени между столкновениями капель от частоты магнитного поля. Сформулированы требования к источнику питания для электромагнитного дегидрататора.

Ключевые слова:

Водоотделение, дегидрататор, промышленная подготовка нефти, электромагнитное воздействие, математическая модель, водонефтяная эмульсия.

Введение

Основная часть добываемого в России углеводородного сырья откачивается из скважин механизированным способом, главным образом при помощи погружных электроцентробежных насосов [1]. При механизированной эксплуатации скважин одной из основных проблем является сокращение энергозатрат, обусловленных глубиной залегания, высокой вязкостью и обводненностью продукции и другими факторами [2].

Продукция скважин большинства месторождений нашей страны имеет очень высокую степень обводненности – иногда доходящую до 98–99 % [3–5]. В среднем обводненность российской нефти составляет 84 %, тогда как средняя обводненность добываемой нефти в мире – 75 %. Это означает, что в России добывается воды в пять раз больше, чем нефти. Если снизить содержание воды на 10 %, то уменьшение отбора воды составит один миллиард тонн в год [6].

Большое содержание воды в добываемой нефти вызвано тем, что месторождения находятся на позд-

них стадиях эксплуатации и сильно истощены, и для интенсификации добычи используют заводнение пластов, для чего приходится закачивать много воды. Часто к увеличению обводненности приводят операции гидроразрыва пласта [7]. Следствием высокой обводненности скважин являются высокие затраты энергии на внутрипромысловую перекачку продукции, если технологическая схема промысла предусматривает трубопроводный транспорт продукции скважин вместе с водой до удаленных пунктов подготовки нефти.

С целью сокращения потерь необходимо производить отделение воды непосредственно в местах добычи. Отделенная вода повторно используется в системе поддержания пластового давления для закачки в пласт.

Однако отделение нефти от воды (или дегидрация) является достаточно сложной задачей. Вода может содержаться в водонефтяной жидкости как в виде смеси, так и в виде эмульсии. В первом случае отделение может быть произведено достаточно просто – методом отстаивания. Во втором случае требуется проведение достаточно сложных операций с целью разрушения водонефтяных эмульсий.

Методы дегидрации нефти

Существует несколько методов дегидрации нефти, среди которых можно выделить механические, химические, тепловые и электрические, а также их сочетания (рис. 1).

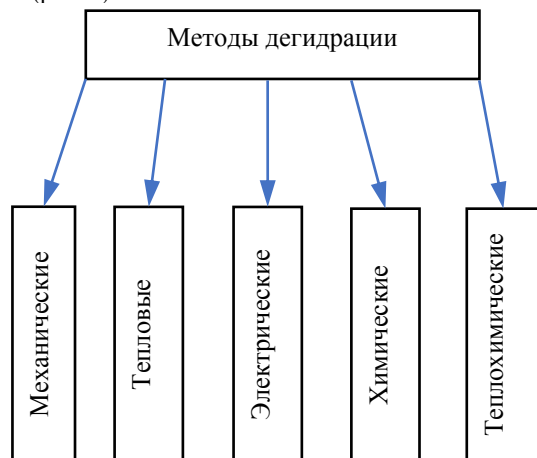


Рис. 1. Методы дегидрации

Fig. 1. Dehydration methods

К механическим методам относятся: отстаивание, фильтрация и центрифугирование. Достоинством механических методов является отсутствие необходимости использовать дополнительные химические вещества (деэмульгаторы, катализаторы), которые будут также воздействовать на окружающую среду. Недостаток – это длительное время отстаивания, затраты энергии на центрифугирование, необходимость периодической очистки и замены фильтров. Для предварительного сброса воды наиболее широко используются трубные водоотделители, размещаемые в непосредственной близости от кустов нефтедобывающих скважин [8].

Также на промыслах часто устанавливаются вертикальные дегидрататоры – подогреватели для отстаивания продукции скважин. Такие дегидрататоры – подогреватели – выполняются в виде вертикальных емкостей, в нижней части которых вмонтированы системы подогрева.

Широко применяются теплохимические методы, сочетающие в себе нагрев и воздействие химических реагентов.

На нефтяных промыслах используются горизонтальные и сферические электродегидрататоры, в которых жидкость нагревается до температуры около 100 °С и подвергается воздействию высокого давления и электрического поля. В некоторых электродегидрататорах одновременно осуществляется воздействие постоянного и переменного токов [9].

Недостатками применяемых методов дегидрации являются: невысокая степень водоотделения при использовании какого-то одного метода, относительно высокие затраты энергии на нагрев, создание высокого давления и электростатического поля, причиняемый окружающий среде вред от химических реагентов.

Процесс дегидрации водонефтяной эмульсии в скрещенных электрическом и магнитном полях

Воздействие электрического поля в электродегидрататоре увеличивает интенсивность движения водяных капель в водонефтяной эмульсии, что приводит к возрастанию частоты их столкновений и, как следствие, к росту размеров капель вследствие их взаимных сливаний. В соответствии с законом Стокса капли большего размера осаждаются с большей скоростью, пропорциональной их диаметру, что позволяет повысить производительность дегидрататора [10–15].

Однако электрический метод дегидрации водонефтяной эмульсии имеет определенные ограничения. Скорость роста капель увеличивается с ростом напряженности электрического поля E . В то же время, если напряженность E становится достаточно большой, может произойти разрушение водяной капли. Это объясняется тем, что частицы воды поляризуются. Если воздействовать на воду электрическим полем, создаваемым внешним источником, то молекулы воды будут ориентироваться определенным образом. Атомы кислорода будут ориентироваться в сторону положительного электрода, а атомы водорода – в сторону отрицательного.

Критическое значение напряженности, при котором происходит разрушение капли, может быть определено по формуле

$$E_{кр} = A \sqrt{\frac{\sigma}{2\epsilon r}}, \quad (1)$$

где A – коэффициент, характеризующий свойства эмульсии; ϵ – диэлектрическая проницаемость нефти; r – радиус капли; σ – значение силы поверхностного натяжения на границе раздела вода–нефть (0,02 Н/м).

Также следует отметить, что большое значение напряженности электрического поля способно вы-

звать возникновение пробоя эмульсии, располагающейся между электродами, вдоль цепочки водяных капель.

Ввиду указанных ограничений электрического метода для увеличения производительности дегидрататора водонефтяная эмульсия может быть помещена в скрещенные электрическое и магнитное поля, совместное воздействие которых на движение водяных капель рассмотрено ниже.

Воздействие электрического поля на движение водяных капель обусловлено наличием у них электрического заряда. Абсорбция ионов из окружающей нефти вызывает приобретение электрического заряда каплями воды. Система «вода–нефть» со временем теряет электрическую нейтральность, так как часть зарядов уносится из-за различных факторов, таких как сила тяжести, развиваемый насосом напор и других. Появляется избыточный заряд воды, положительный либо отрицательный.

В емкости дегидрататора происходят столкновения частиц воды с электродами, благодаря чему частицы воды также приобретают электрический заряд. Электрическое поле заставляет частицы воды перемещаться к электроду, имеющему противоположный заряд.

Если водонефтяную эмульсию подвергать воздействию пульсирующего магнитного поля, то в каплях воды будет происходить индуцирование вихревых токов, направление которых будет противодействовать изменению магнитного поля индуктора. Происходит отталкивание магнитного поля вихревого тока от внешнего магнитного поля индуктора, это взаимодействие приводит к возникновению дополнительной силы $F_{\text{мар}}$, воз-

действующей на движение водяной капли, которая может быть определена по следующей формуле

$$d\vec{F}_{\text{мар}} = \vec{B} \times \vec{j}dV, \quad (2)$$

где B – магнитная индукция; dV – элемент объема капли; j – плотность вихревого тока.

Магнитоэлектродегидрататор

Для осуществления процесса дегидрации в скрещенных электрическом и магнитном полях была предложена оригинальная конструкция магнитоэлектродегидрататора [16]. Данная конструкция предназначена для использования в нефтегазовой отрасли для отделения из нефти воды и соли.

Устройство магнитоэлектродегидрататора показано на рис. 2. Дегидрация происходит внутри корпуса – 1, имеющего цилиндрическую форму. Водонефтяная эмульсия поступает в емкость дегидрататора по трубе для подачи водонефтяной эмульсии – 2 в коллектор – 6. Обезвоженная нефть собирается и удаляется через коллектор – 7 и трубку – 8. Для отведения воды используется трубки – 4. Электрическое поле и пульсирующее магнитное поле внутри корпуса – 1 создаются, соответственно, системой электродов – 5, и однофазной обмоткой – 3.

Капли воды имеют электрический заряд, приобретенный либо вследствие поглощения ионов из окружающей нефти еще до попадания в дегидрататор, либо по причине столкновения капель с электродами – 5. Электрическое поле заставляет заряженные частицы воды перемещаться в сторону электрода, имеющего противоположный заряд (при этом разноименно заряженные капли двигаются навстречу друг другу).

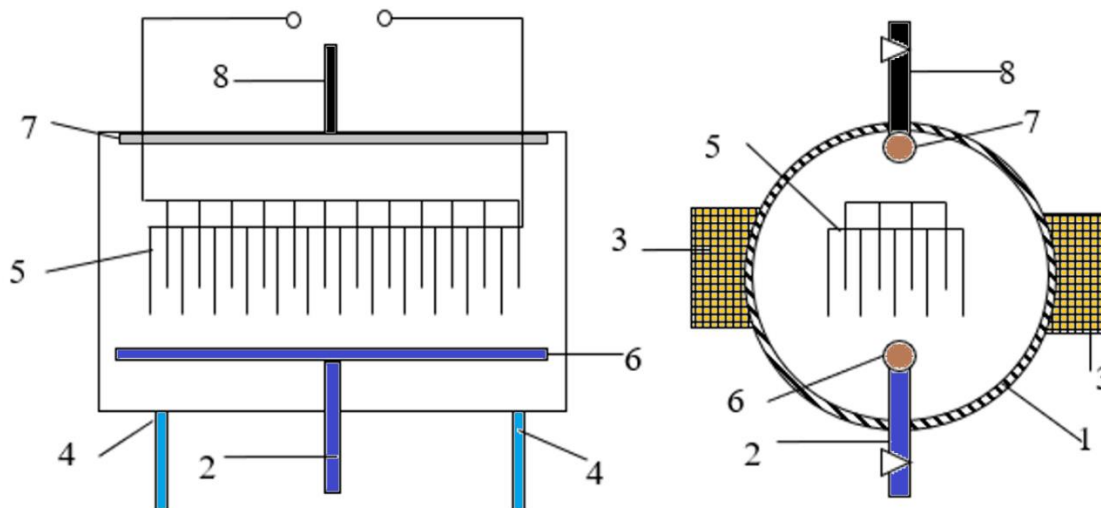


Рис. 2. Устройство магнитоэлектродегидрататора: 1 – корпус магнитоэлектродегидрататора; 2 – труба для подачи водонефтяной эмульсии; 3 – катушка для создания магнитного поля; 4 – труба для вывода воды; 5 – электроды для создания электрического поля; 6 – коллектор для подачи водонефтяной эмульсии; 7 – нефтяной коллектор; 8 – труба для вывода обезвоженной нефти

Fig. 2. Magnetoelectrodehydrator: 1 – housing; 2 – tube for introducing water-oil emulsion; 3 – AC winding; 4 – water drainage pipe; 5 – electrodes; 6 – water-oil emulsion input manifold; 7 – oil collector; 8 – dry oil outlet pipe

В то же время воздействие пульсирующего магнитного поля, создаваемого обмоткой – 3, индуцирует в каплях воды вихревые токи. Магнитные поля вих-

ревых токов отталкиваются от магнитного поля индуктора, вследствие чего капли воды перемещаются в сторону плоскости, которая равномерно удалена от

обоих полюсов катушки. Данный процесс приводит к росту концентрации водяных капель в этой области, и, следовательно, увеличивается частота столкновений капель, вызывающих их слияние. Таким образом, размер капель увеличивается и в дальнейшем, и они быстрее осаждаются под действием силы тяжести, что позволяет увеличить производительность дегидрататора.

Разработка математической модели, описывающей процессы в магнитоэлектродегидрататоре

Для разработки любой математической модели необходимо принять ряд допущений. Для создания данной модели приняты следующие допущения [17–20]:

- 1) магнитное поле в корпусе магнитоэлектродегидрататора (МЭДГ) является плоскопараллельным;
- 2) магнитная индукция первичного магнитного поля, возникающая в рабочем зазоре, задается только основной пространственной гармоникой и не может изменяться вдоль объёма МЭДГ;
- 3) капли воды равномерно распределены в объеме водонефтяной эмульсии и имеют сферическую форму, а электропроводность нефтяной среды, разделяющей капли, равна нулю (т. е. под действием магнитного поля токи индуцируются только в водной фазе);
- 4) на движение капли не оказывают существенного влияния поля, создаваемые другими каплями;
- 5) капля относительно мала, инерцией происходящих в ней тепловых процессов можно пренебречь; нагрев капли, обусловленный возбуждением в ней вихревых токов, приводит к равномерному изменению температуры внутри ее объема;
- 6) указанное изменение температуры в каплях незначительно и не оказывает существенного влияния на температуру водонефтяной эмульсии в целом; в больших масштабах (намного превосходящих размер капли) распределение температуры в эмульсии равномерно и конвекционные процессы не происходят;
- 7) на границе раздела сред не происходит массообменных (диффузных) процессов.

Производительность дегидрататора Q определяется скоростью осаждения водяных капель и габаритами устройства в соответствии с равенством:

$$Q \leq \frac{V_0 S}{2}, \quad (3)$$

где V_0 – скорость осаждения капель воды; R – радиус корпуса МЭДГ; L – длина вдоль горизонтальной оси; $S=LR$ – площадь сечения дегидрататора.

На сферическую водяную каплю воздействуют силы Архимеда F_a , сила тяжести F_T , и силы трения $F_{тр}=6\pi r \nu \rho_n V$, баланс которых определяется уравнением

$$g \rho_b \frac{4\pi r^3}{3} = g \rho_n \frac{4\pi r^3}{3} + 6\pi r \nu \rho_n V_0, \quad (4)$$

где r – радиус капли; ν – значение кинематической вязкости для нефти; ρ_b – значение плотности воды; ρ_n – значение плотности нефти; g – ускорение свободного падения.

Из выражения (4) скорость осаждения капли составляет

$$V_0 = \frac{d^2 g (\rho_b - \rho_n)}{18 \rho_n \nu}, \quad (5)$$

где d – диаметр водяной капли.

Из выражений (3) и (5) следует, что производительность дегидрататора Q прямо пропорциональна диаметру капель в квадрате. Чтобы увеличить размеры капель может быть использовано воздействие электрического поля, которое увеличивает частоту их столкновений и слияний.

Сила воздействия электрического поля на водяную каплю

$$F_{эл} = qE = \frac{qU}{l}, \quad (6)$$

где $q = \pi \epsilon \epsilon_0 d^2 E$ – заряд водяной капли; $E = \frac{U}{l}$ – значение напряженности электрического поля; U, l – напряжение и расстояние между электродами.

Под воздействием силы $F_{эл}$, определяемой по выражению (6), капля движется в направлении электрода, имеющего противоположный заряд, при этом скорость этого движения $V_{эл}$ определяется из уравнения баланса, в которое также входят сила инерции и сила трения

$$m \frac{dV}{dt} + 3\pi d \nu \rho_n = F_{эл} = Eq, \quad (7)$$

где $m = \frac{\pi d^3 \rho_b}{6}$ – масса капли.

Решение уравнения (7) позволяет найти зависимость скорости движения капли под действием электрического поля от времени $V_{эл}(0)=0$ имеет вид

$$V_{эл}(t) = \frac{F_{эл}}{\alpha} \left(1 - \exp\left(\frac{-\alpha t}{m}\right) \right), \quad (8)$$

где $\alpha = 3\pi d \nu \rho_n$.

Необходимо учитывать, что в соответствии с (1) значение напряженности электрического поля E должно быть не выше значения, являющегося критическим

$$E < E_{кр} = A \sqrt{\frac{\sigma}{\epsilon d}}, \quad (9)$$

где d – диаметр капли; A – коэффициент, характеризующий свойства эмульсии; σ – значение силы поверхностного натяжения водяной капли; ϵ – диэлектрическая проницаемость нефти.

Выполнение условия (9) накладывает ограничение и на скорость движения капли под действием электрического поля

$$V_{эл}(t) < \frac{q}{\alpha} \times \sqrt{\frac{\sigma}{\epsilon d^3}} \left(1 - \exp\left(\frac{-\alpha t}{m}\right) \right). \quad (10)$$

Частота столкновений капель воды, приводящих к слиянию, зависит не только от скорости их движения $V_{эл}$, которая должна удовлетворять условию (10), но и от соотношения между средним диаметром капель $d_{ср}$

и средним расстоянием между ними l_{cp} . Данное соотношение находится с использованием выражения:

$$\frac{d_{cp}}{l_{cp}} = \sqrt[3]{\frac{6\nu}{\pi}}, \quad (11)$$

где ν – объемная доля воды в водонефтяной эмульсии.

С учетом (11) средняя длина пути капли, который она проходит до столкновения с некой другой каплей,

$$l_{cp} \left(\frac{l_{cp}}{d_{cp}} \right)^2 = d_{cp} \frac{\pi}{6\nu}. \quad (12)$$

С другой стороны, данный путь может быть определен как интеграл от скорости капли по времени ее перемещения. С учетом (8) данный интеграл

$$\int_0^{T_{cp}} V_{эл}(t) dt = F_{эл} \left(\frac{T_{cp}}{\alpha} + \frac{m}{\alpha^2} \left(\exp\left(\frac{-\alpha T_{cp}}{m} \right) - 1 \right) \right). \quad (13)$$

С учетом (12) и (13) можно записать уравнение

$$d_{cp} \frac{6\nu}{\pi} = F_{эл} \left(\frac{T_{cp}}{\alpha} + \frac{m}{\alpha^2} \left(\exp\left(\frac{\alpha T_{cp}}{m} \right) - 1 \right) \right), \quad (14)$$

с помощью которого может быть найдено значение среднего интервала времени T_{cp} , который проходит между столкновениями водяных капель. Для увеличения частоты этих столкновений в рассматриваемой конструкции дегидрататора наряду с электрическим полем применяется также пульсирующее магнитное поле.

С учетом принятых допущений плотность тока, индуцируемого в водяных каплях, находится с использованием выражения

$$j = \frac{B\omega\pi d}{4\rho}, \quad (15)$$

где B – магнитная индукция; d – диаметр водяной капли; $\omega=2\pi f$ циклическая частота пульсирующего магнитного поля; ρ – удельное электрическое сопротивление воды.

Согласно выражениям (2) и (15) значение силы, которая воздействует на объем водяной капли в водонефтяной эмульсии со стороны магнитного поля, находится по формуле:

$$F_{маг} = \frac{Bj\pi d^3}{6} = \frac{B^2\omega\pi^2 d^4}{24\rho}. \quad (16)$$

Под воздействием силы $F_{маг}$, определяемой по выражению (16), происходит движение водяных капель в сторону пространства, расположенного между полюсами катушки, где и находятся два электрода, что увеличивает концентрацию капель в этой области и способствует их столкновениям и росту. В то же время необходимо, чтобы сила $F_{маг}$ достигала таких значений, чтобы под ее воздействием капля могла бы переместиться в данную область пространства за промежуток времени, в течение которого водонефтяная эмульсия перемещается вверх между полюсами катушки, имеющими ширину h :

$$F_{маг} \geq \beta = \frac{Q\alpha}{hL}. \quad (17)$$

При этом необходимо также учитывать фактор нагрева водяной капли в результате действия индуцированных в ней вихревых токов. Изменение температуры капли описывается уравнением

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P - T\gamma S}{mC}, \quad (18)$$

где T – температура капли относительно температуры окружающей нефти; t – время пребывания капли в магнитном поле; P – мощность тепловых потерь, обусловленных токами, индуцированными в капле; S – площадь поверхности капли; m – масса капли; C – теплоемкость воды; γ – коэффициент теплоотдачи на границе раздела сред вода–нефть.

Решение уравнения (18) при условии $T(0)=0$ дает следующую зависимость температуры водяной капли от времени пребывания в магнитном поле

$$T(t) = \frac{P}{\gamma S} \left(1 - \exp\left(\frac{-\gamma S t}{mC} \right) \right). \quad (19)$$

Для оценки верхнего предела нагрева капли под действием вихревых токов рассмотрен случай, когда капля достаточно мала и теплообмен с окружающей средой осуществляется только путем теплопроводности. В таком случае коэффициент теплоотдачи можно

оценить, используя выражение $\gamma = \frac{\lambda}{d}$, где λ – теплопроводность нефти; d – диаметр капли. Таким образом, при $\lambda=0,14$ Вт/(м·К) и усредненном размере капли $d_{cp}=0,001$ м коэффициент теплоотдачи $\gamma=140$ Вт/(м²·К).

На рис. 3 показаны кривые минимальных значений магнитной индукции B в зависимости от частоты f и производительности Q дегидрататора, при которых будет выполняться условие (17). При указанных значениях B расчеты, произведенные на основании (19), показывают незначительный нагрев капли ($\Delta T < 1$ К).

Кривые, представленные на рис. 3, получены для следующего набора параметров: длина дегидрататора $L=16,4$ м; радиус $R=1,7$ м; вязкость нефти $\nu=2,9 \cdot 10^{-6}$ м²/с; удельное электрическое сопротивление воды в капле $\rho=0,01$ Ом·м; плотность воды $\rho_в=1000$ кг/м³; плотность нефти $\rho_н=800$ кг/м³; усредненный диаметр капли $d_{cp}=0,001$ м; кривые, представленные на графике, рассчитаны для случаев производительности 100; 150; 200 м³/ч.

В случае воздействия скрещенных электрического и магнитного полей уравнение (14) преобразуется к виду

$$d_{cp} \frac{6\nu}{\pi} = F_{эм} \left(\frac{T_{cp}}{\alpha} + \frac{m}{\alpha^2} \left(\exp\left(\frac{\alpha T_{cp}}{m} \right) - 1 \right) \right), \quad (20)$$

где $F_{эм} = \sqrt{F_{эл}^2 + F_{маг}^2}$.

На рис. 4 показан график уменьшения среднего времени между столкновениями T_{cp} водяных капель для предложенной конструкции электромагнитного дегидрататора и частоты f магнитного поля, создаваемого индуктором. Данный график получен в результате решения уравнения (20) при различных значениях f . Для расчетов, представленных на рис. 4, исполь-

зованы следующие значения параметров: индукция магнитного поля $B=0,052$ Тл; напряженность электрического поля 50 кВ/м; объемная доля воды в эмульсии $v_0=1$ %. Значения прочих параметров такие же, как и в случае расчетов к рис. 3.

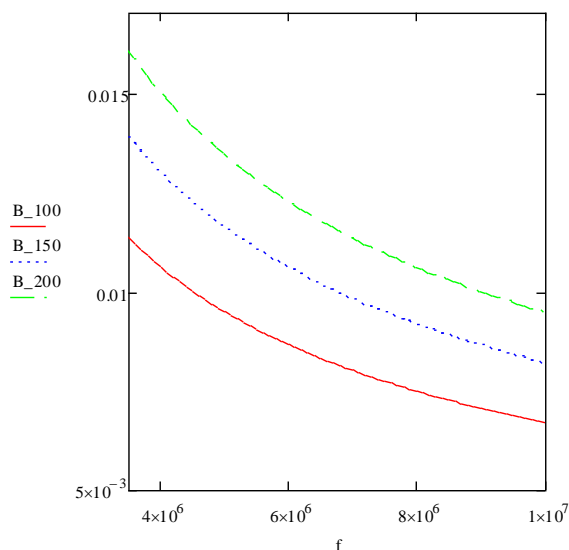


Рис. 3. Графики значений магнитной индукции B (Тл) в зависимости от частоты питающего тока f (Гц), при которых будет выполняться условие $F_{max}=\beta$: результаты математического моделирования при $L=16,4$ м и $R=1,7$ м, производительности 100; 150; 200 м³/час

Fig. 3. Dependence of the magnetic induction B (T), necessary to fulfill the condition, on the frequency f (Hz): results of numerical simulation at $L=16,4$ m and $R=1,7$ m and productivity 100; 150; 200 m³/hour

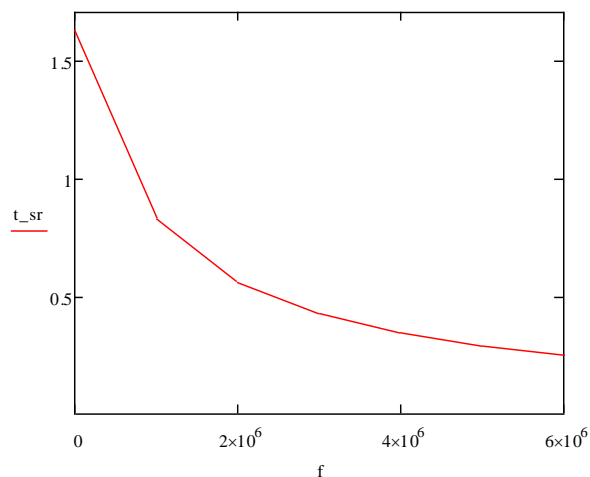


Рис. 4. Зависимость уменьшения среднего значения времени между столкновениями водяных капель t_{cp} , с, от частоты магнитного поля f , Гц: результаты численного моделирования при напряженности электрического поля $E=50$ кВ/м, объемной доле воды в эмульсии $v_0=1$ %

Fig. 4. Reduction of the average time between collisions of drops t_{av} , s, depending on the frequency of the magnetic field f , Hz: results of numerical simulation at an electric field strength $E=50$ kV/m, the volume fraction of water in the emulsion $v_0=1$ %

Требования к источнику питания для электромагнитного дегидратора

Области применения индуктивно-емкостных преобразователей (ИЕП) в источниках питания достаточно обширны, так как почти в каждой области электроэнергетики и электротехники имеются задачи, эффективное решение которых возможно при помощи систем стабилизированного тока (ССТ) [21, 22].

Известны различные схемотехнические решения ИЕП на дискретных и гибридных электромагнитных элементах (ЭМЭ). Системы на основе дискретных элементов имеют ряд существенных недостатков. ИЕП на основе гибридных ЭМЭ – многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов – позволяет устранить эти недостатки [23–25].

Актуальность, перспективность и технико-экономическая эффективность развития ИЕП подтверждаются практическими реализациями и научными исследованиями. Патентные исследования позволили выбрать схему для будущего исследования ИЕП на основе МИЭК с улучшенными массогабаритными и энергетическими параметрами [26, 27].

К параметрам ИЕП, по которому выбиралась схема для исследования, относятся:

- коэффициент мощности и КПД;
 - коэффициент усиления по напряжению;
 - относительные отклонения выходного тока;
 - добротность колебательного контура;
 - коэффициент стабилизации по току;
 - удельные габариты и масса.
 - входное и переходное сопротивления;
 - переходная проводимость.
- Из вышеперечисленных параметров определяем основные требования, которые нужно учитывать при исследовании индуктивно-емкостного преобразователя:
- высокая надёжность за счёт малого количества элементов;
 - малые массогабаритные показатели;
 - высокий коэффициент полезного действия (0,98–1) и мощности;
 - компенсация реактивной мощности;
 - стабилизация высоких значений тока;
 - высокие показатели коэффициента увеличения напряжения;
 - широкий диапазон стабилизации.

Для того чтоб выбранный ИЕП соответствовал большинству вышеперечисленных требований, необходимо провести исследования. Как пример можно привести ИЕП, который стабилизирует ток меньшей амплитуды, но в широком диапазоне изменения частоты [28–30].

Благодаря функциональной интеграции, которая используется в течение последних нескольких лет, источники питания уменьшают массогабаритные показатели и увеличивают функциональные возможности [31, 32]. Изучение функциональной интеграции способствовало созданию гибридных LC-контуров, что позволяет объединять в одном корпусе несколько функций благодаря различным физическим законам и эффектам.

Выводы

1. С целью сокращения потерь на трубопроводный транспорт продукции необходимо производить отделение воды от нефти непосредственно в местах добычи. Отделенная вода повторно используется в системе поддержания пластового давления для закачки в пласт.
2. Существует несколько методов дегидратации нефти, среди которых можно выделить механические, химические, тепловые и электрические, а также их сочетания. Недостатками применяемых методов дегидратации являются: невысокая степень водоотделения при использовании какого-то одного метода, относительно высокие затраты энергии на нагрев, создание высокого давления и электростатического поля, причиняемый окружающий среде вред от химических реагентов.
3. Как показал анализ, проведенный в разделе «Разработка математической модели, описывающей процессы в магнитоэлектродегидрататоре» при значениях параметров, указанных в данном разделе, использование только электрического метода дегидратации имеет ограничения по эффективности. Также данный анализ показал, что можно повысить эффективность дегидрататора, если воздействовать на водонефтяную эмульсию скрещенными электрическим и магнитным полями. Совместное воздействие электрического и магнитного полей влияет на перемещение капель воды, что делает процесс разделения сред более динамичным.
4. Предложенная конструкция магнитоэлектрического дегидрататора позволяет осуществлять воздействие на водонефтяную эмульсию скрещенными электрическим и магнитным полями. Устройство может быть востребовано нефтяными компаниями для отделения воды и соли из продукции скважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Определение параметров схемы замещения погружного электродвигателя на основании данных испытаний / С.С. Шубин, В.У. Ямалиев, А.С. Глазырин, Д.С. Буньков, С.Н. Кладиев, И.В. Раков, Е.В. Боловин, В.З. Ковалев, Р.Н. Хамитов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 204–214.
2. Определение погонных электротехнических параметров нефтепогружного кабеля / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов, И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, В.З. Ковалев, А.В. Лавринович // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 6. – С. 186–197.
3. Высокая обводненность нефти // ОЗНА. 2022. URL: <https://ozna.ru/projects/tekhnologicheskie-vyzovy/vysokaya-obvodnenost-nefti.php> (дата обращения 18.03.2022).
4. Насыров В.А., Шляпников Ю.В., Насыров А.М. Обводненность продукции скважин и влияние ее на осложняющие факторы в добыче нефти // Экспозиция Нефть Газ. – 2011. – № 2. – С. 14–17.
5. Велиев М.М. Прогнозирование обводненности добывающих скважин фундамента месторождения «Дракон» // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2011. – № 2. – С. 15–24.
6. Барков С., Грунис Е., Хавкин А. Нефтедобыча: запасы и КИН // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2012. – № 8. – С. 30–33.
7. Причины увеличения обводненности в скважинах после проведения гидравлического разрыва в неоднородных пластах / А.С. Валеев, М.Р. Дулкарнаев, Ю.А. Котенев, Ш.Х. Султанов, Л.С. Бриллиант // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 6. – С. 140–147.
8. Роль ТВО в нефтедобыче // ООО «Диплайн». 2022. URL: <http://diplinegroup.ru/novosti/rol-tvo-v-neftedobyche.html> (дата обращения 18.03.2022).
9. Обезвоживание нефти. Обессоливание нефти. Электродегидрататоры. Сепараторы нефти и системы сепарации нефти // ИНТЕХ ГмбХ. 2022. URL: https://intech-gmbh.ru/oil_desalting/#processing (дата обращения 18.03.2022).
10. Tarantsev K.V., Tarantseva K.R. Influence of electric field strength on the processes of destruction and creation of water-oil emulsions during crude oil desalting // Chemical and Petroleum Engineering. – 2018. – V. 53. – № 11 – P. 703–706.
11. Noik C., Chen J., Dalmazzone C. Electrostatic demulsification on crude oil: a state-of-the-art review // International Oil & Gas Conference and Exhibition in China. – China, 2006. – V. 1. – P. 255–261.
12. Demulsification of water-in-crude oil emulsions by a continuous electrostatic dehydrator / B.Y. Kim, J.H. Moon, T.H. Sung, S.M. Yang, J.D. Kim. // Separation science and technology. – 2002. – V. 37. – № 6. – P. 1307–1320.
13. Lee C.M., Sams G.W., Wagner J.P. Power consumption measurements for AC and pulsed DC for electrostatic coalescence of water-in-oil emulsions // Journal of electrostatics. – 2001. – V. 53. – № 1. – P. 1–24.
14. Писаная Е.А., Кохан О.В. Установка комплексной подготовки нефти // Международный студенческий научный вестник. – 2016. – № 5-3. – С. 473–479.
15. Меньшов Б.Г., Суд И.И. Электрификация предприятий нефтяной и газовой промышленности. – М.: Недра, 1984. – 416 с.
16. Магнитоэлектродегидрататор: пат. Рос. Федерация, № 2706316, заявл. 17.06.2019; опубл. 15.11.2019. Бюл. № 32. – 9 с.
17. Магнитоэлектрический дегидрататор нефтяной жидкости / И.Ф. Янгиров, Д.В. Максудов, Э.А. Хасанов, Х.Х. Каланов // Поволжская научная корпорация: Международная научно-практическая конференция НИЦ. – Самара, 2016. – С. 328–330.
18. Янгиров И.Ф. Магнитоёмкостные дегидрататоры // Изобретатели – машиностроению. – 2003. – № 2. – С. 30–36.
19. Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф., Максудов Д.В. Влияние электродинамических сил на характеристики преобразователя ускорений // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2014. – Т. 14. – № 3. – С. 25–32.
20. Magneto-electrodehydrator / I.K. Khajrullin, D.V. Maksudov, I.F. Yangirov, M.V. Okhotnikov // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). – Ufa, Russia, 2019. – P. 1–5.
21. Lv W. Research and analysis on the principle and application of crude oil electric dehydrator // AIP Conference Proceedings. – Hohhot: AIP Publishing LLC, 2019. – V. 2154. – № 1. – P. 020068.
22. Modulated AC/DC Crude Desalting Technology Application & Best Practices / R. White, S. Mulas, P. Domini, M. Lopez, F. Abusittah // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Dubai: OnePetro, 2021. – P. 1–12.
23. Ultra-high frequency and Self-adaptive voltage technology for water separation from oil emulsion / D. Yang, H. Wu, H. Sun, L. He, Y. Guo // Separation and Purification Technology. – 2021. – V. 279. – P. 119732.
24. Dynamic demulsification of oil-in-water emulsions with electrocoalescence: diameter distribution of oil droplets / J. Hu, J. Chen, X. Zhang, J. Xiao, S. An, Z. Luan, B. Zhang // Separation and Purification Technology. – 2021. – V. 254. – P. 117631.
25. Coalescence behavior of aqueous drops in water-in-oil emulsions under high-frequency pulsed AC fields / W. Kang, M. Li, H. Yang, X. Kang, F. Wang, H. Jiang, B. Sarsenbekuly // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2021. – V. 93. – P. 415–422.
26. Sustainable offshore oil and gas fields development: Techno-economic feasibility analysis of wind-hydrogen-natural gas nexus / X. Zou, R. Qiu, M. Yuan, Q. Liao, Y. Yan, Y. Liang, H. Zhang // Energy Reports. – 2021. – V. 7. – P. 4470–4482.

27. Song Y., Xu Y., Wang Z. An experimental study on efficient demulsification for produced emulsion in alkaline/surfactant/polymer flooding // Journal of Energy Resources Technology. – 2022. – V. 144. – № 9. – P. 093001.
28. Mohammadi F., Mohammadi M., Nonahal B. A comprehensive electrical model for the electrostatic desalting process of crude oil // Petroleum & Coal. – 2019. – V. 61. – № 4. – P. 738–748.
29. Chen X., Wang J., Wang Y. Test and analysis of electrical conductivity for ASP flooding produced fluid // Oil-Gas Field Surface Engineering. – 2020. – V. 46. – № 2. – P. 85–93.
30. Non-coalescence behavior of neutral droplets suspended in oil under a direct current electric field / X. Huang, L. He, X. Luo, H. Yin, D. Yang // AIChE Journal. – 2019. – V. 65. – № 11. – P. e16739.
31. Effects of the particle concentration on the electro-dehydration of simulated SAGD produced ultra-heavy oil / B. Li, Z. Sun, Z. Wang, J. Wang, Z. Wang, X. Dou, H. Liu // Chemical Engineering Research and Design. – 2019. – V. 151. – P. 157–167.
32. Acceleration of Novel Technology Development for Stabilized Emulsion Treatment in EOR Applications / M.Z. Mohd Sahak, M.M. Myo Thant, S. Saadon, T. Krebs, P. Verbeek, M.R. Akdim, L. Villacorte // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. – Abu Dhabi: OnePetro, 2021. – P. 1–8.

Поступила 09.06.2022 г.

Информация об авторах

Максудов Д.В., кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханики Уфимского государственного авиационного технического университета.

Янгиров И.Ф., доктор технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханики Уфимского государственного авиационного технического университета.

Хазиева Р.Т., кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электрооборудования предприятий Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Хакимьянов М.И., доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования предприятий Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 537.868

DEVELOPMENT OF ELECTROMAGNETIC DEHYDRATOR FOR FIELD OIL TREATMENT

Denis V. Maksudov¹,
maksudov.dv@ugatu.su

Ilgiz F. Yangirov¹,
yangirov@yandex.ru

Regina T. Khazieva²,
khazievart@mail.ru

Marat I. Khakimyanov²,
hakimyanovmi@gmail.com

¹ Ufa State Aviation Technical University,
12, K. Marx street, Ufa, 450008, Russia.

² Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Russia.

The relevance. The produced oil of most of the fields in our country has a significant water cut. The water content in oil reaches 98–99 %. Pumping oil with water through field pipelines is very uneconomical. Therefore, the oil industry is in need of water separation units (dehydrators). There are several methods of dehydration: chemical, mechanical, thermal and electrical methods. All these methods have their advantages and disadvantages. The article proposes an electromagnetic dehydrator, which uses the combined effect of electric and magnetic fields. The authors proposed an original design of a magneto-electrodehydrator. Magneto-electric dehydrator is designed for operation in the oil industry for dehydration and desalting of oil. The electric field is created by a system of electrodes. A pulsating magnetic field is created by a single-phase winding. Under the influence of an electric field, charged water particles begin to move towards an oppositely charged electrode. Oppositely charged drops move towards each other. The winding creates a pulsating magnetic field. The latter induces eddy currents in the water droplets. Droplet size increases. Droplets settle faster under the action of gravity, which allows you to increase the performance of the dehydrator.

The main aims of the research are to develop the design of a magneto-electrodehydrator; to conduct a study of its characteristics; to build a mathematical model of water and oil separation and obtain dependency graphs; to formulate requirements for power sources for electromagnetic dehydrators.

Objects: oil treatment plants, dehydrators for the separation of water-oil emulsions, plants with electromagnetic influence.

Methods: electric field theory, magnetic field theory, mathematical modeling, program for mathematical and engineering calculations Mathcad.

Results. The article proposes the design of a magneto-electrodehydrator. A mathematical model of water and oil separation is proposed. Graphs of dependences of magnetic induction on the frequency and performance of the dehydrator are obtained. The dependence of the time between droplet collisions on the frequency of the magnetic field is plotted. The article formulates the requirements for a power source for an electromagnetic dehydrator.

Key words:

Water separation, dehydrator, oil field treatment, electromagnetic effect, mathematical model, water-oil emulsion.

REFERENCES

- Shubin S.S., Yamaliev V.U., Glazyrin A.S., Bunkov D.S., Kladiev S.N., Rakov I.V., Bolovin E.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N. Estimation of submersible induction motor equivalent circuit parameters based on test data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 204–214. In Rus.
- Glazyrin A.S., Langraf S.V., Isaev Y.N., Filipas A.A., Kladiev S.N., Kopyrin V.A., Leonov A.P., Khamitov R.N., Rakov I.V., Kovalev V.Z., Kolesnikov S.V., Lavrinovich A.V. Determination of running electrical characteristics of oil submersible cable. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 6, pp. 186–197. In Rus.
- Vysokaya obvodnennost nefiti [High water cut]. 2022. Available at: <https://ozna.ru/projects/tehnologicheskie-vyzovy/vysokaya-obvodnyennost-nefti.php> (accessed: 18 March 2022).
- Nasyrov V.A., Shlyapnikov Yu.V., Nasyrov A.M. Obvodnennost produktivni skvazhin i vliyaniye ee na oslozhnyayushchie faktory v dobyche nefiti [Water cut of well production and its influence on complicating factors in oil production]. *Ekspozitsiya Neft Gaz*, 2011, no. 2, pp. 14–17.
- Veliev M.M. Prognozirovaniye obvodnennosti dobyvayushchikh skvazhin fundamenta mestorozhdeniya «Drakon» [Forecasting the water cut in the production wells of the basement of the «Drakon» field]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov*, 2011, no 2, pp. 15–24.
- Barkov S., Grunis E., Khavkin A. Neftedobycha: zapasy i KIN [Oil production: reserves and oil recovery factor]. *Delovoy zhurnal Neftegaz.RU*, 2012, no 8, pp. 30–33.
- Valeev A.S., Dulkarnaev M.R., Kotenev Yu.A., Sultanov Sh.Kh., Brilliant L.S. Reasons for the increase in water cut in wells after hydraulic fracturing in heterogeneous reservoirs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 6, pp. 140–147. In Rus.
- Rol TVO v neftedobyche [The role of tubed water teachers in oil production]. 2022. Available at: <http://diplinegroup.ru/novosti/rol-tvo-v-neftedobyche.html> (accessed: 18 March 2022).
- Obvezozhivaniye nefiti. Obessolivaniye nefiti. Elektrodegradatory. Separatory nefiti i sistemy separatsii nefiti [Oil dehydration. Oil desalination. Electric dehydrators. Oil separators and oil separation systems]. 2022. Available at: https://intech-gmbh.ru/oil_desalting/#processing (accessed: 18 March 2022).
- Tarantsev K.V., Tarantseva K.R. Influence of electric field strength on the processes of destruction and creation of water-oil emulsions during crude oil desalting. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2018, vol. 53, no 11, pp. 703–706.

11. Noik C., Chen J., Dalmazzone C. Electrostatic demulsification on crude oil: a state-of-the-art review. *International Oil & Gas Conference and Exhibition in China*. China, 2006, vol. 1, pp. 255–261.
12. Kim B.Y., Moon J.H., Sung T.H., Yang S.M., Kim J.D. Demulsification of water-in-crude oil emulsions by a continuous electrostatic dehydrator. *Separation science and technology*, 2002, vol. 37, no 6, pp. 1307–1320.
13. Lee C.M., Sams G.W., Wagner J.P. Power consumption measurements for AC and pulsed DC for electrostatic coalescence of water-in-oil emulsions. *Journal of electrostatics*, 2001, vol. 53, no 1, pp. 1–24.
14. Pisanaya E.A., Kokhan O.V. Installation of complex oil treatment. *Mezhdunarodny studencheskiy nauchnyy vestnik*, 2016, no. 5-3, pp. 473–479. In Rus.
15. Menshov B.G., Sud I.I. *Elektrifikatsiya predpriyatiy neftyanoy i gazovoy promyshlennosti* [Electrification of oil and gas industry enterprises]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 416 p
16. Khairullin I.K., Yangirov I.F., Okhotnikov M.V., Maksudov D.V. *Magnitoelektrodehidrator* [Magnitoelectrodehydrator]. Patent RF, no. 2706316, 2019.
17. Yangirov I.F., Maksudov D.V., Khasanov E.A., Kalanov Kh.Kh. Magnitoelektricheskiy degidator neftyanoy zhidkosti [Magnitoelectric oil liquid dehydrator]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya NITS. Povolzhskaya nauchnaya korporatsiya* [International Scientific and Practical Conference of the Research Center. Volga Scientific Corporation]. Samara, 2016. pp. 328–330.
18. Yangirov I.F. Magnitoemkostnye degidratory [Magnetic capacitance dehydrators]. *Izobretateli – mashinostroeniye*, 2003, no. 2, pp. 30–36.
19. Ismagilov F.R., Yangirov I.F., Maksudov D.V. Influence of electrodynamic forces on the characteristics of the acceleration transducer. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 25–32. In Rus.
20. Khajrullin I.K., Maksudov D.V., Yangirov I.F., Okhotnikov M.V. Magnitoelektrodehidrator. *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. Ufa, Russia, 2019. pp. 1–5.
21. Lv W. Research and analysis on the principle and application of crude oil electric dehydrator. *AIP Conference Proceedings*. Hohhot, AIP Publishing LLC, 2019, vol. 2154, no. 1, pp. 020068.
22. White R., Mulas S., Domini P., Lopez M., Abusittah F. Modulated AC/DC Crude Desalting Technology Application & Best Practices. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Dubai, OnePetro, 2021. pp. 1–12.
23. Yang D., Wu H., Sun H., He L., Guo Y. Ultra-high frequency and Self-adaptive voltage technology for water separation from oil emulsion. *Separation and Purification Technology*, 2021, vol. 279, pp. 119732.
24. Hu J., Chen J., Zhang X., Xiao J., An S., Luan Z., Zhang B. Dynamic demulsification of oil-in-water emulsions with electrocoalescence: diameter distribution of oil droplets. *Separation and Purification Technology*, 2021, vol. 254, pp. 117631.
25. Kang W., Li M., Yang H., Kang X., Wang F., Jiang H., Sarsenbekuly B. Coalescence behavior of aqueous drops in water-in-oil emulsions under high-frequency pulsed AC fields. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2021, vol. 93, pp. 415–422.
26. Zou X., Qiu R., Yuan M., Liao Q., Yan Y., Liang Y., Zhang H. Sustainable offshore oil and gas fields development: Techno-economic feasibility analysis of wind–hydrogen–natural gas nexus. *Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 4470–4482.
27. Song Y., Xu Y., Wang Z. An experimental study on efficient demulsification for produced emulsion in alkaline/surfactant/polymer flooding. *Journal of Energy Resources Technology*, 2022, vol. 144, no. 9, pp. 093001.
28. Mohammadi F., Mohammadi M., Nonahal B. A comprehensive electrical model for the electrostatic desalting process of crude oil. *Petroleum & Coal*, 2019, vol. 61, no. 4, pp. 738–748.
29. Chen X., Wang J., Wang Y. Test and analysis of electrical conductivity for ASP flooding produced fluid. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 2020, vol. 46, no. 2, pp. 85–93.
30. Huang X., He L., Luo X., Yin H., Yang D. Non-coalescence behavior of neutral droplets suspended in oil under a direct current electric field. *AIChE Journal*, 2019, vol. 65, no. 11, pp. e16739.
31. Li B., Sun Z., Wang Z., Wang J., Wang Z., Dou X., Liu H. Effects of the particle concentration on the electro-dehydration of simulated SAGD produced ultra-heavy oil. *Chemical Engineering Research and Design*, 2019, vol. 151, pp. 157–167.
32. Mohd Sahak M. Z., Myo Thant M. M., Saadon S., Krebs T., Verbeek P., Akdim M. R., Villacorte L. Acceleration of novel technology development for stabilized emulsion treatment in EOR applications. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. Abu Dhabi, OnePetro, 2021. pp. 1–8.

Received: 9 June 2022.

Information about the authors

Denis V. Maksudov, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Aviation Technical University.

Ilgiz F. Yangirov, Dr. Sc., associate professor, Ufa State Aviation Technical University.

Regina T. Khazieva, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Marat I. Khakimyanov, Dr. Sc., associate professor, head of the department, Ufa State Petroleum Technological University.