

УДК 532.529.5, 532.54

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ В ВОДОНЕФТЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ В НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Зайковский Всеволод Викторович¹,
alkast@tpu.ru

Харламов Сергей Николаевич¹,
felicit@tpu.ru

Муратов Василий Михайлович¹,
vmm@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения качества подготовки и переработки нефти, снижения содержания воды в сырой нефти, поступающей на нефтеперерабатывающие заводы, а также целесообразностью расширения банка экспериментальных данных о закономерностях динамики капель воды в гетерогенных средах, таких как водомасляные эмульсии, при их обработке неоднородным электрическим полем. Данные сведения весьма актуальны при разработке теоретических моделей процессов переноса в смесях, весьма ценны и полезны в вопросах совершенствования методик и методов интенсификации фазового и компонентного разделения состава эмульсий, выработки технических решений по совершенствованию конструкций аппаратов для разделения водонефтяных эмульсий.

Цель работы: экспериментальное исследование отклонений отдельных капель воды в масле от траектории свободного падения под действием неоднородного электрического поля различной интенсивности, а также анализ пространственного распределения капель воды в эмульсии при такой обработке.

Методы исследования: наблюдение и анализ движения отдельных капель соленой и пресной воды, и капель в составе эмульсии в экспериментальной ячейке при обработке в электрическом поле, созданном плоскими электродами различных линейных размеров.

Результаты. Показано, что относительное отклонение капли к короткому электроду нелинейно зависит от напряженности электрического поля в центре межэлектродного пространства: при напряженности 2,61–2,93 кВ/см среднее относительное отклонение капель составляет 33–46 %, при напряженности 3,31 кВ/см наблюдается отскок капель воды в противоположную от электрода сторону, отклонение сокращается до 18 %, при напряженности в 3,5 кВ/см наблюдается отскок и повторное притяжение капель, вплоть до границы электрода, что дает максимальное смещение капель в среднем на 57 %. Содержание солей хлорида натрия концентрации 3,4 моль/литр в промывочной воде отрицательно сказывается на эффективности обработки капель воды неоднородным электрическим полем – отклонение соленых капель в среднем на 42 % ниже, чем отклонение капель пресной воды. Показано, что отклонение капель воды в масле в неоднородном электрическом поле не зависит от диаметра капель. Имеют место три зоны скопления капель вокруг короткого электрода, характер движения капель в каждой из них различен и может быть использован для оптимизации формы электродов в аппаратах, реализующих обработку в неоднородном электрическом поле.

Ключевые слова:

Подготовка нефти, водонефтяная эмульсия, электрическое поле, содержание солей, диаметр капель.

Введение

Подготовка и переработка нефти неразрывно связана с процессами обезвоживания и обессоливания водонефтяных эмульсий. На начальной стадии извлечения и подготовки вода является необходимым материалом для реализации таких технологических процессов, как увеличение пластового давления в скважине, а также обессоливание нефти путем смешения с пресной водой. В дальнейшем, после выполнения своих функций, вода удаляется из нефти, поскольку содержит экстрагированные соли и механические примеси, снижающие срок службы технологического оборудования, занимает полезный объем аппаратов, промышленных и магистральных нефтепроводов. Кроме того, вода аккумулирует тепло при переработке нефти и в дисперсном виде значительно увеличивает вязкость гетерогенной системы [1, 2].

Обезвоживание нефти входит в состав технологического цикла при промышленной подготовке для сдачи в магистральные нефтепроводы, а также при окончательной подготовке нефти перед переработкой на нефтеперерабатывающих заводах. При этом, в соответствии с требованиями государственного стандарта РФ, в товарной нефти массовая доля воды не должна превышать 1 % [3].

Эксплуатируемые на нефтепромыслах и нефтеперерабатывающих заводах аппараты по электрообезвоживанию и обессоливаю нефти, как правило, реализуют комбинированный способ обработки водонефтяных эмульсий: ввод деэмульгаторов, совмещенный с нагревом и обработкой эмульсии в однородном электрическом поле. При этом, несмотря на то, что ввод деэмульгаторов ослабляет бронирующие оболочки капель воды, а нагрев эмульсии снижает вязкость дисперсионной среды

(нефти), сближение и укрупнение капель происходит за счет создания вокруг каждой капли микромасштабной неоднородности электрического поля [4].

Механизм обработки эмульсии в однородном электрическом поле достаточно подробно рассмотрен, например, в [5–10]. Среди недостатков современного уровня технологии такой обработки авторы выделяют: образование при коалесценции дисперсной фазы вторичных капель значительно меньших размеров (так называемая частичная коалесценция) [11], наличие критического значения напряженности электрического поля, выше которого происходит разрушение укрупненных капель [12, 13], объединение капель воды в цепочки, приводящие к короткому замыканию электродов [14], низкая эффективность электрокоалесценции в однородном электрическом поле при расстоянии между каплями на много больше, чем их диаметр [15].

При этом исследователями отмечается возможность интенсификации процесса электрокоалесценции водонефтяных эмульсий путем создания макромасштабного неоднородного электрического поля. По мнению авторов [16], генерация в объеме аппарата равномерного градиента напряженности электрического поля способствует созданию областей повышенной концентрации капель, что приводит к увеличению скорости коалесценции капель и росту темпов расслоения фаз.

С помощью математического моделирования поведения капель воды в неоднородном электрическом поле, созданном конфигурацией плоских электродов различного линейного размера в [17] установлено, что капли воды притягиваются к электроду, имеющему меньший линейный размер, за счет макромасштабной силы диэлектрофореза, генерируемой за счет создания в эмульсии существенно неоднородного электрического поля. Также в результате численного моделирования свободного падения двух капель под действием электрического поля, созданного различными конфигурациями электродов, авторами показана целесообразность применения неоднородного электрического поля, созданного электродной системой в форме трубы Вентури [18].

Вместе с тем стоит отметить, что экспериментальные исследования воздействия на водонефтяную эмульсию неоднородным электрическим полем в литературе представлены весьма ограничено и не дают полной детальной картины эволюции процессов разделения в рассматриваемой смеси.

Так, в [19] выполнено сравнение среднеарифметического диаметра капель при обработке в однородном электрическом поле и обработке в поле, созданном электродной системой «пластина–точка». Установлено, что при обработке в однородном электрическом поле конечный среднеарифметический диаметр капель составляет величину порядка 30 мкм, в то время как в неоднородном электрическом поле – 40 мкм.

Также в [20] в рамках моделей и методов математического и численного моделирования рассматриваемых процессов отмечается, что конфигурация плоских электродов различного линейного размера способствует улавливанию взвешенных в воздухе частиц по идентичному физическом механизму.

Указанные результаты показывают, что задача по оптимизации процесса обезвоживания водонефтяных эмульсий с помощью использования неоднородного электрического поля требует детальной верификации используемых теоретических моделей и систематического экспериментального анализа данных об эффективности обработки таким полем среды с целью сокращения расстояния между каплями воды.

С учётом вышеуказанного в настоящей работе поставлены следующие цели: дать количественную оценку и произвести анализ отклонений отдельных капель воды в масле под действием неоднородного электрического поля различной интенсивности; детально изучить процесс сближения капель воды в водомасляной эмульсии под действием неоднородного электрического поля.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования были выбраны капли воды, претерпевающие свободное падение в масле, а также водомасляные эмульсии различного водосодержания, начального распределения капель по размерам и содержания хлорида натрия в воде.

При проведении экспериментальных исследований использовались следующие материалы:

- масло минеральное (плотность при 15 °С – 878 кг/м³, кинематическая вязкость при 40 °С – 91,4 мм²/с, кинематическая вязкость при 100 °С – 13,9 мм²/с, относительная диэлектрическая проницаемость – 2,4);
- вода питьевая (плотность – 1000 кг/м³, динамическая вязкость при 20 °С – 1,002 мПа·с, относительная диэлектрическая проницаемость – 80,4);
- соль поваренная, приготовленная по ГОСТ Р 51574–2000 «Соль поваренная пищевая. Технические условия».

Плотность раствора хлорида натрия в воде доводили до требуемого значения, а затем воду смешивали с маслом либо использовали для создания отдельных капель воды.

Молярную концентрацию хлорида натрия рассчитывали исходя из известной плотности раствора соли. Измерение веса хлорида натрия и воды до смешивания производили на лабораторных весах с ценой деления 1 г. Приготовление солевого раствора и водомасляной эмульсии производили с использованием лабораторной программируемой механической мешалки ММ-1000. Частоту и длительность перемешивания для приготовления солевого раствора выбирали равной 150 об/мин и

1 мин соответственно. Для приготовления эмульсии данные параметры варьировали, исходя из требуемой степени дисперсности эмульсии, при частоте и времени перемешивания в диапазоне от 60 до 1000 об/мин и 1–5 мин соответственно.

Описание экспериментальной установки

Для проведения экспериментальных исследований была разработана и создана специальная измерительная камера, а также компактно смонтировано регистрационное и вспомогательное оборудование. Общая схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Измерительная камера была изготовлена прямоугольной формы с целью исключения оптических искажений. На задней стенке камеры была нанесена шкала с вертикальными и горизонтальными отметками для корректного расчета диаметра и величины отклонений при движении капель. Размер камеры – 200×30×20 мм, толщина стекла – от 3,5 до 4 мм. Преобладание вертикального размера камеры над горизонтальным обеспечило наблюдение за движением капель под действием силы тяжести в течение продолжительного времени, как до, так и после зоны обработки электрическим полем. Малое поперечное расстояние позволило фиксировать исследуемые эффекты при величине подаваемого на электроды напряжения не более 8 кВ. Электроды были выполнены из оцинкованных стальных пластин шириной 10 мм и толщиной 0,2 мм. Длина протяженного электрода – 80 мм, короткого электрода – 10 мм. Расстояние между электродами h составляло 18 мм. Ввиду того что рамки для электродов были выполнены из

непрозрачного полимерного материала, движение капли вдоль оси аппликата не фиксировалось. В эксперименте длинный электрод – высокопотенциальный, короткий электрод – низкопотенциальный. Полярность электродов в ходе экспериментов не изменялась.

На рис. 2 показано распределение потенциала φ и градиента квадрата напряженности электрического поля ∇E^2 , создаваемого используемой в эксперименте конфигурацией электродов, совмещенное с месторасположением вводимых капель, при подаче на электроды напряжения 5,5 кВ. Указанные распределения получены с использованием подхода, изложенного в [17].

Оптическое оборудование состояло из камеры Canon G16 и источника освещения. Характеристики камеры: разрешение 12.1 мегапикселей, возможность 5-кратного оптического и 4-кратного цифрового приближения, записи видео качеством Full HD, размером изображения 1920×1080 пикселей и частотой кадров от 30 до 240 в минуту.

Электрическое оборудование состояло из источника питания, выпрямительного блока, киловольтметра КВЦ-120 (предел допускаемой основной относительной погрешности измерения действующего значения напряжения постоянного тока 0,25 %), соединительных проводов. Использовался высоковольтный высокоомощный источник питания напряжением до 100 кВ, мощностью 25 кВт.

Эксперимент по изучению динамики одиночных капель воды в масле выполняли в следующей последовательности:

1. В измерительной ячейке жестко закрепляются рамки с электродами.

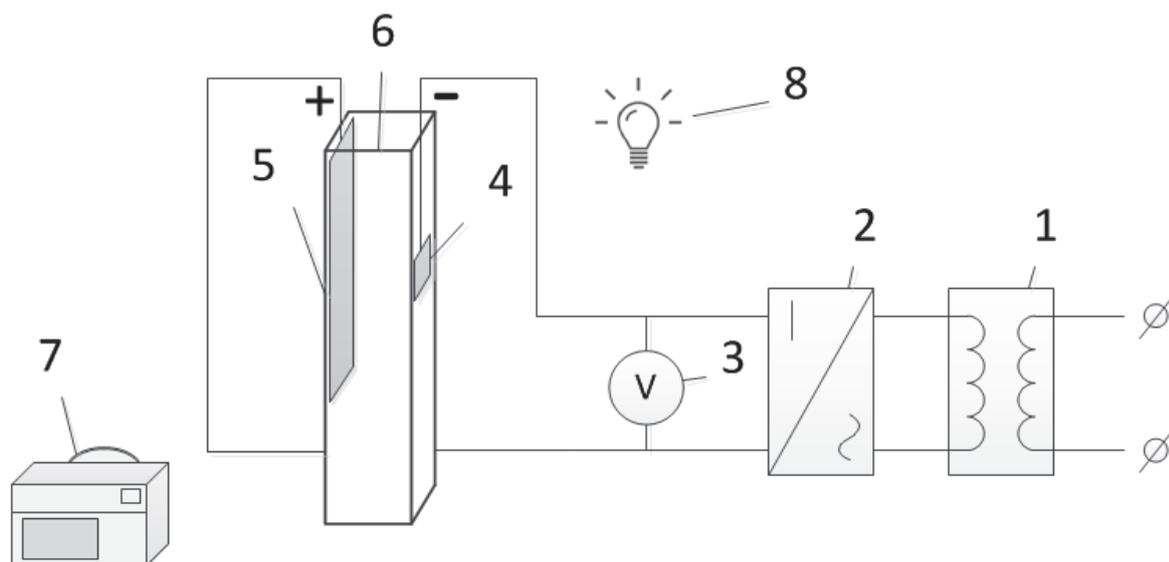


Рис. 1. Общая схема экспериментальной установки: 1 – высоковольтный источник переменного тока; 2 – выпрямительный блок; 3 – киловольтметр; 4 – короткий электрод (катод); 5 – длинный электрод (анод); 6 – измерительная камера; 7 – видеокамера; 8 – источник света

Fig. 1. General scheme of the laboratory setup: 1 is the high voltage AC power source; 2 is the rectifier; 3 is the voltmeter; 4 is the short electrode (cathode); 5 is the long electrode (anode); 6 is the measuring chamber; 7 is the camera; 8 is the light source

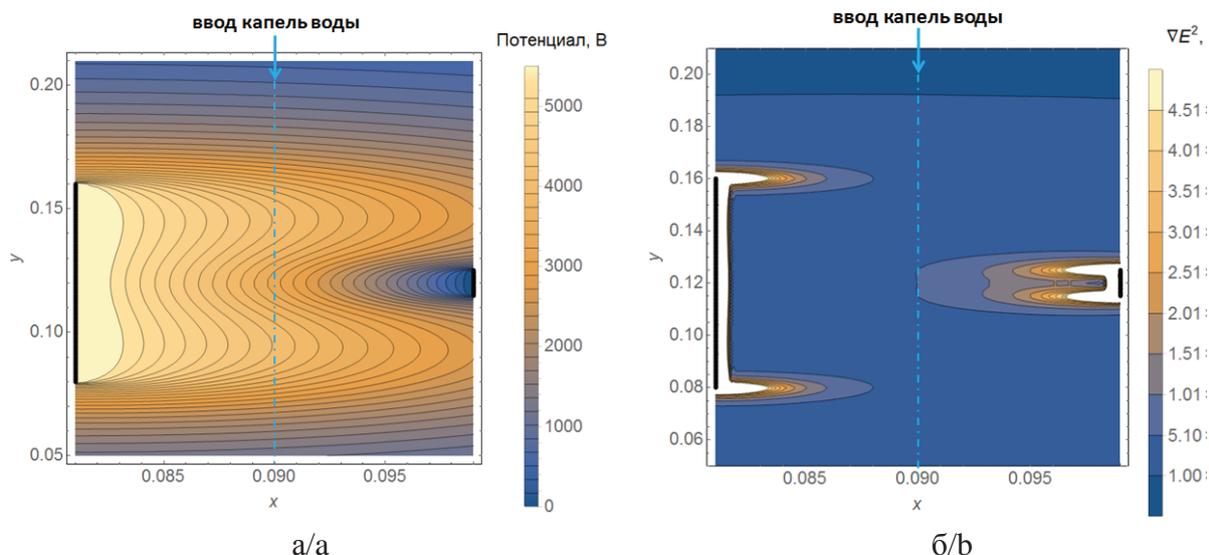


Рис. 2. Распределение параметров электрического поля, создаваемого используемой в эксперименте конфигурацией электродов при подаче напряжения 5,5 кВ: а) потенциал электрического поля ϕ ; б) градиент квадрат напряженности электрического поля

Fig. 2. Distribution of the electric field parameters at 5,5 kV voltage: a) electric field potential ϕ ; b) square gradient of electric field intensity

2. В объем аппарата заливается масло.
3. К верху измерительной ячейки устанавливается заполненное водой устройство для ввода капль.
4. Ячейка подключается к высоковольтному оборудованию.
5. Включается камера и производится видеозапись эксперимента.
6. Подается напряжение на электроды.
7. Фиксируются показания киловольтметра.
8. В объем ячейки вводится по одной капле воды.
9. Наблюдается процесс осаждения капли.
10. Повторяется ввод капль до требуемого количества экспериментальных данных.
11. Обесточивается камера и высоковольтное оборудование.
12. Сливаются масло и вода из объема измерительной ячейки и повторно не используются.

Для подачи капль использовалась игла диаметра 0,45 мм. Эксперимент по изучению динамики множества капль воды в масле в составе водомасляной эмульсии проводили в той же последовательности, за исключением этапов 3, 8 и 10. Устройство для ввода капль в таких экспериментах не использовалось – в аппарат заливалась заранее приготовленная эмульсия.

Анализ экспериментальных данных, измерение координат и линейных размеров капль проводились методом цифровой обработки полученных изображений в программном обеспечении ImageJ. При размере изображения 1920×1080 пикселей и разрешением съемки 12 пикселей на миллиметр точность линейных измерений составила 0,083 мм.

Результаты эксперимента

Влияние неоднородного электрического поля на единичную каплю воды

В эксперименте определялись следующие параметры: истинные координаты капль по осям X и Y ; поперечное смещение капль l_x ; диаметр капль d ; напряженность электрического поля в центре межэлектродной области E_0 . Относительное отклонение капль вычислялось как отношение абсолютного отклонения капль от траектории свободного падения по оси абсцисс к половине межэлектродного расстояния $h=18$ мм. Напряженность электрического поля в центре межэлектродной области E_0 вычислялась как отношение напряжения на электродах V к межэлектродному расстоянию h .

Опыты были проведены при стандартных условиях, в диапазоне величины напряженности электрического поля в центре межэлектродной области E_0 от 2,61 до 3,5 кВ/см.

В результате анализа совокупности опытных данных определено, что напряженность электрического поля в центре межэлектродной области E_0 является главным фактором, определяющим динамику поведения капль воды в масле при проведении эксперимента. Сводные результаты эксперимента представлены в табл. 1.

Из результатов, представленных в табл. 1, следует, что в общем случае капль воды испытывает тем большее отклонение, чем больше напряженность поля между электродами. Вместе с тем имеются особенности, на которых следует остановиться подробнее.

Таблица 1. Результаты экспериментальных наблюдений

Table 1. Results of experimental observation

№ опыта Experiment	Напряженность Intensity of electric field E_0 , кВ/см	Диаметр капли Droplet diameter d , мм	Абсолютное отклонение Absolute displacement l_x , мм	Относительное отклонение Relative displacement $l_x/0,5h$, %
1	2,61	2,58	3,34	42
		2,54	2,52	31
		2,83	2,61	33
		2,80	2,76	34
		1,82	1,85	23
2	2,79	3,06	4,97	62
		2,05	2,84	35
		2,13	2,42	30
		2,49	2,59	32
3	2,93	2,73	2,82	35
		3,02	3,55	44
		2,66	3,58	45
4	3,31	2,83	3,81	48
		3,17	3,67	46
		2,84	1,14	14
		2,92	2,53	32
5	3,5	2,88	1,83	23
		2,21	0,26	3
		2,64	4,47	56
		2,88	4,08	51
		2,76	3,98	49
		2,47	5,83	73

В частности, в опытах №№ 1–3, при напряженности электрического поля в центре межэлектродной области 2,61–2,93 кВ/см, капли воды в масле испытывают среднее отклонение в 3 мм от начального (центрального) положения в сторону короткого электрода. Конкретные значения отклонения капли от вертикали зависят от напряжения на электродах, диаметра капли, начального положения. Смещение капли воды в поперечном направлении в динамике представлено на рис. 3.

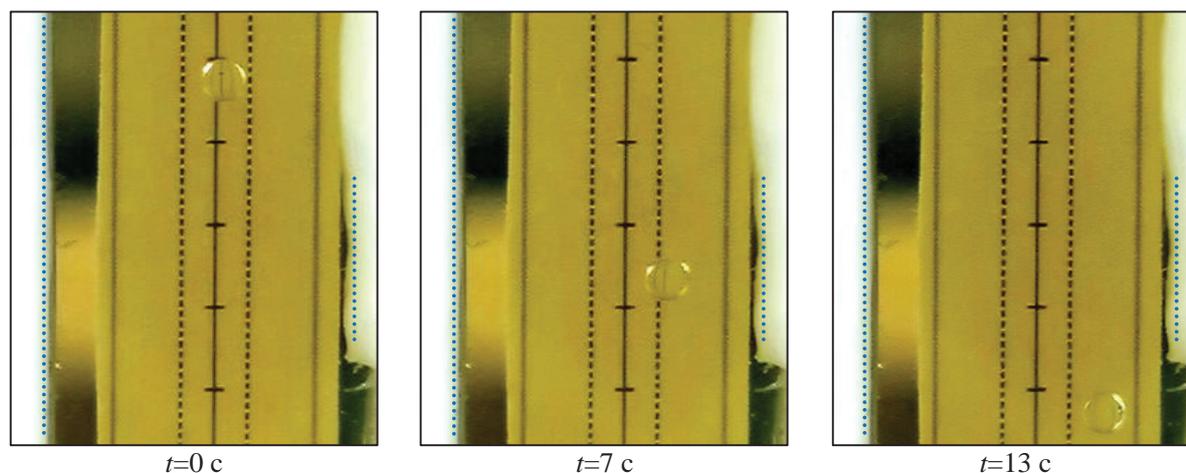


Рис. 3. Картины притяжения капли воды к короткому электроду под действием силы диэлектрофореза, $E_0=2,93$ кВ/см. Синим пунктиром условно указано расположение электродов внутри рамок-держателей

Fig. 3. Dielectrophoretic attraction of water droplets to a short electrode, $E_0=2,93$ kV/cm. Blue dotted line shows the location of electrodes within the frames

На рис. 4 представлено графическое сопоставление среднего отклонения капель пресной воды \bar{l}_x при различной напряженности в центре межэлектродной области E_0 в опытах №№ 1–3.

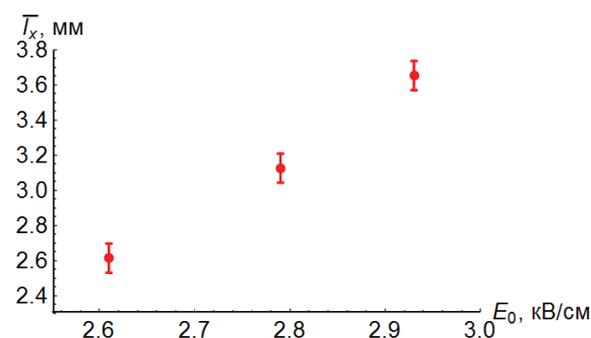


Рис. 4. Зависимость среднего отклонения капли пресной воды \bar{l}_x от напряженности электрического поля в центре межэлектродной области в опытах № 1–3

Fig. 4. Dependence of the average displacement of fresh water drops \bar{l}_x on the electric field intensity in the central interelectrode area in the experiments no. 1–3

На рис. 5 представлено графическое сопоставление отклонения капель пресной воды различного диаметра при различном значении напряженности в центре межэлектродной области E_0 в опытах №№ 1–3.

В опыте № 4 при значении напряженности электрического поля в центре межэлектродной области $E_0=3,31$ кВ/см наблюдается иная картина движения капель воды в масле. Видно, что конечное горизонтальное отклонение, несмотря на рост напряжения, значительно сокращается – вплоть до полного отсутствия (минимальное отклонение 0,2 мм). Причиной такого сокращения является экспериментально наблюдаемый отскок капель при касании короткого электрода.

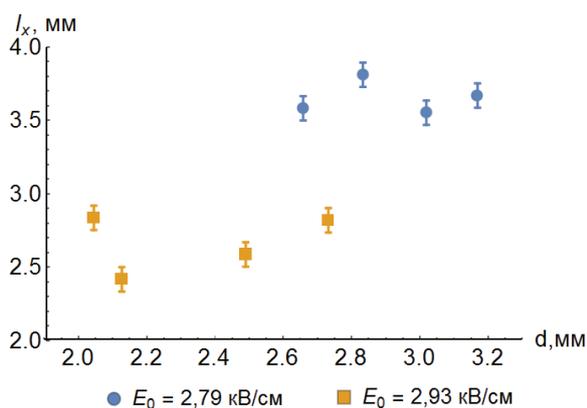


Рис. 5. Зависимость поперечного отклонения капли пресной воды l_x от её диаметра d при различной величине напряженности E_0 : 2,79 и 2,93 кВ/см

Fig. 5. Dependence of fresh water drop displacement l_x on its diameter d . Values of electric field intensity in the central interelectrode area are 2,79 and 2,93 kV/cm

По нашему мнению, причиной отскока является приобретение каплей дополнительного положительного заряда при контакте с коротким электродом. Наличие избыточного положительного заряда создает условия для кулоновского отталкивания капли от короткого электрода. При этом для сообщения капле заряда не требуется её полного касания – при приближении капли к электроду от ближнего к электроду края наблюдается образование «мостика» воды небольших размеров, который существует очень короткое время и служит проводником передачи заряда от электрода к капле. В результате отскока капли такие «мостики» могут являться источником формирования вторичных капель воды гораздо меньших размеров, что может создать дополнительные трудности в технологическом процессе обезвоживания эмульсий.

В опыте № 5 при $E_0=3,5$ кВ/см динамика движения капель воды в масле в неоднородном электрическом поле также претерпевает изменения. При данном значении параметров в эксперименте удалось достичь больших значений поперечного смещения капли – среднее значение смещения l_x составляет 4,57 мм. Причиной большего смещения является изменение механизма движения. В частности, при данном значении напряжения наблюдался комбинированный эффект, заключающийся в отскоке и повторном притяжении отскочившей капли. Фотография явления представлена на рис. 6, 7.

Механизм отскока, наблюдаемый в опыте № 5, аналогичен наблюдаемому в опыте № 4: от ближнего к короткому электроду края капли формировался «мостик», после касания которого капля стремительно отталкивалась в противоположную от электрода сторону. Однако в данном опыте после отскока капля продолжала притягиваться к электроду по дуге, при этом принимая эллипсоидную форму. При этом капля неоднократно формировала «мостик» и касалась электрода, колеблясь между фазами отскока и притяжения. Однако каждый раз величина отскока была меньше первоначального значения. Опытами установлено, что процесс колебательного притяжения заканчивается при достижении каплей нижнего края короткого электрода. После этого капля вновь принимает сферическую форму и продолжает свободное падение.

Влияние солености воды на движение капель в неоднородном электрическом поле

Ввиду того что вода в составе водонефтяной эмульсии содержит некоторое количество солей, было проведено исследование движения капель соленой воды в неоднородном электрическом поле.

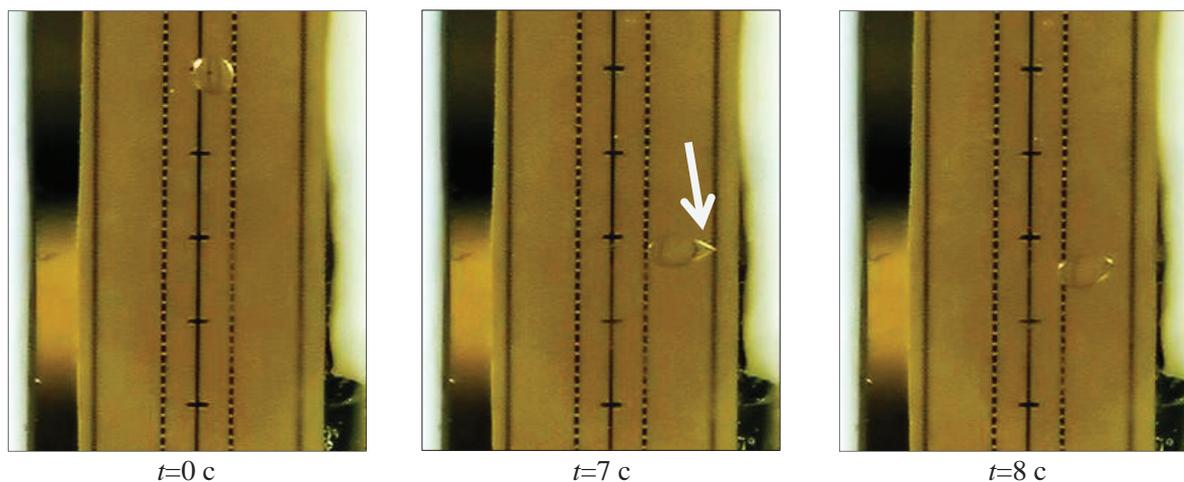


Рис. 6. Картины отскока и повторного притяжения капли воды в масле (фаза притяжения и отскока), $E_0=3,5$ кВ/см. Стрелкой указан «мостик», через который происходит заряд капли

Fig. 6. Rebound and re-attraction of water droplet in oil (attraction and rebound phases), $E_0=3,5$ kV/cm. Arrow indicates a «bridge» which passes a droplet charge

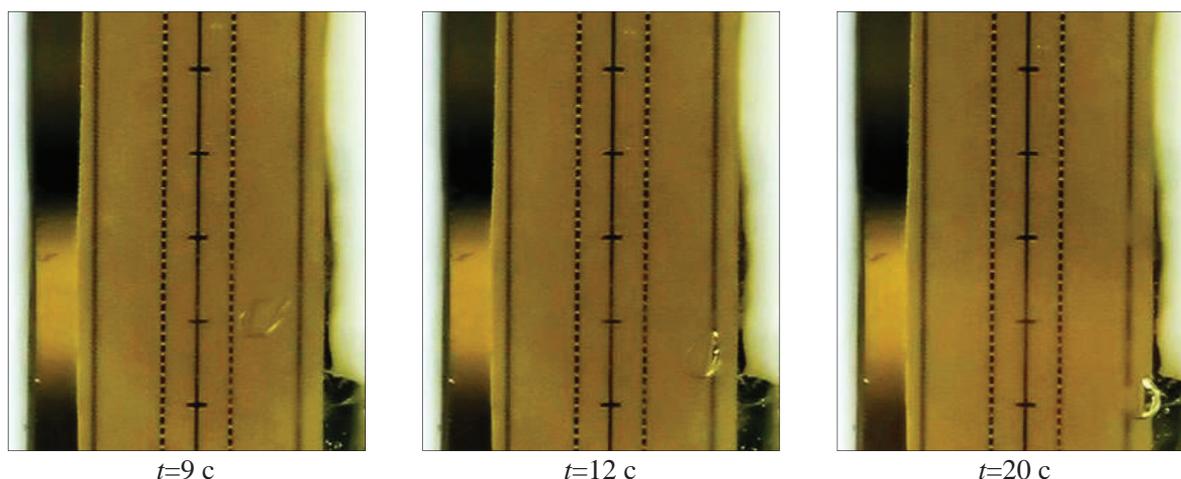


Рис. 7. Картины отскока и повторного притяжения капли воды в масле (фаза повторного притяжения), $E_0=3,5$ кВ/см

Fig. 7. Rebound and re-attraction of water droplet in oil (re-attraction phase), $E_0=3,5$ kV/cm

Для получения соленой воды 100 г пресной воды смешивали с 20 г хлорида натрия (для получения раствора плотностью 1200 кг/м^3), что эквивалентно молярной концентрации раствора хлорида натрия 3,4 моль/литр. Диапазон изменения величины напряженности электрического поля в центре межэлектродной области E_0 в опытах составил от 2,87 до 3,69 кВ/см. Обработанные результаты измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты измерений положения капель раствора хлорида натрия при его обработке в неоднородном электрическом поле

Table 2. Measurements of sodium chloride solution drops position when processing it in inhomogeneous electric field

№ опыта Experiment	Напряженность Electric field intensity E_0 , кВ/см	Диаметр капли Droplet diameter d , мм	Абсолютное отклонение Absolute displacement l_x , мм	Относительное отклонение Relative displacement $l_x/0,5h$, %
1	2,87	2,43	2,52	30
		3,15	1,71	22
		2,79	1,25	15
		3,07	1,65	20
2	3,13	2,76	1,61	19
		2,76	1,96	19
		2,46	1,82	18
		2,98	2,79	27
3	3,69	2,54	1,37	20
		2,94	1,53	17
		2,76	2,51	30
		2,74	1,52	18

Можно отметить, что в рамках эксперимента значение абсолютного отклонения раствора хлорида натрия слабо зависит от вариации, создаваемой напряженностью электрического поля. Графически распределение среднего отклонения капель соленой воды от напряженности электрического поля в центре межэлектродной области E_0 на элек-

троды, в сравнении с аналогичным распределением для пресной воды, представлена на рис. 8.

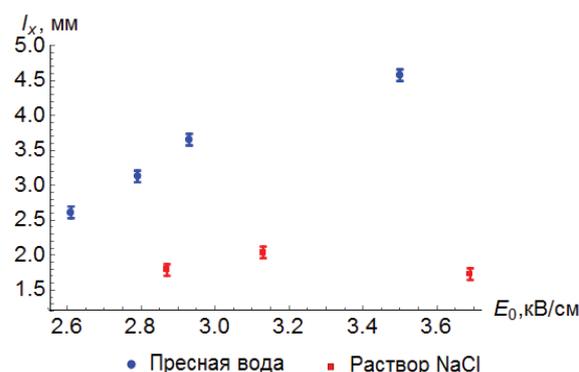


Рис. 8. Изменение величины отклонения капель пресной и соленой воды в неоднородном электрическом поле при различных значениях E_0

Fig. 8. Change in fresh and salt water drops displacement value in non-uniform electric field at different magnitudes of E_0

Из рис. 8 видно, что капли раствора NaCl демонстрируют меньшее среднее значение абсолютного отклонения l_x , а также меньшую зависимость от напряженности электрического поля в межэлектродной области E_0 .

Поведение капель воды в водомасляной эмульсии

Для наглядного представления траектории движения капель воды была приготовлена водомасляная эмульсия с 10%-м объемным содержанием пресной воды (по методике, приведенной выше). В составе эмульсии под действием неоднородного электрического поля было произведено измерение координат пяти капель по осям X , Y с различным начальным положением по горизонтали и вертикали относительно короткого электрода. Начальное и конечное положение капель приведено на рис. 9. Расположение электродов внутри рамок-держателей идентично изображенному на рис. 2.

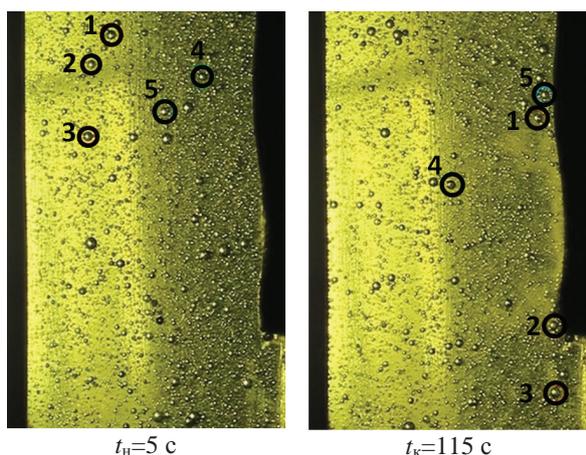


Рис. 9. Картины о начальном и конечном положениях капль воды в масле при обработке в неоднородном электрическом поле для анализа траекторий. $E_0=2,78$ кВ/см, ширина изображения 22 мм

Fig. 9. Water droplets position in oil when processing in non-uniform electric field. $E_0=2,78$ кВ/см, image width is 22 mm

Измерения проводились в течение 110 секунд, с шагом по времени до подачи напряжения в 10 секунд, после подачи напряжения – 5 секунд. Диаметр исследуемых капль определялся диапазоном от 0,64 до 0,66 мм. В ходе наблюдения, помимо измерения координат, наблюдалось также незначительное изменение формы капль от сферической к эллипсоидной. Во всех случаях измерялась координата центра масс капль.

По измеренным координатам были построены траектории движения капль воды в водомасляной эмульсии под действием неоднородного электрического поля. Траектории движения представлены на рис. 10. В порядке удаленности от электрода капль вели себя следующим образом:

Капль № 1, находящаяся на максимальном горизонтальном расстоянии от короткого электрода, при подаче напряжения на электроды под действием силы диэлектрфореза сместилась в сторону короткого электрода и продолжила вертикальное падение без отскока.

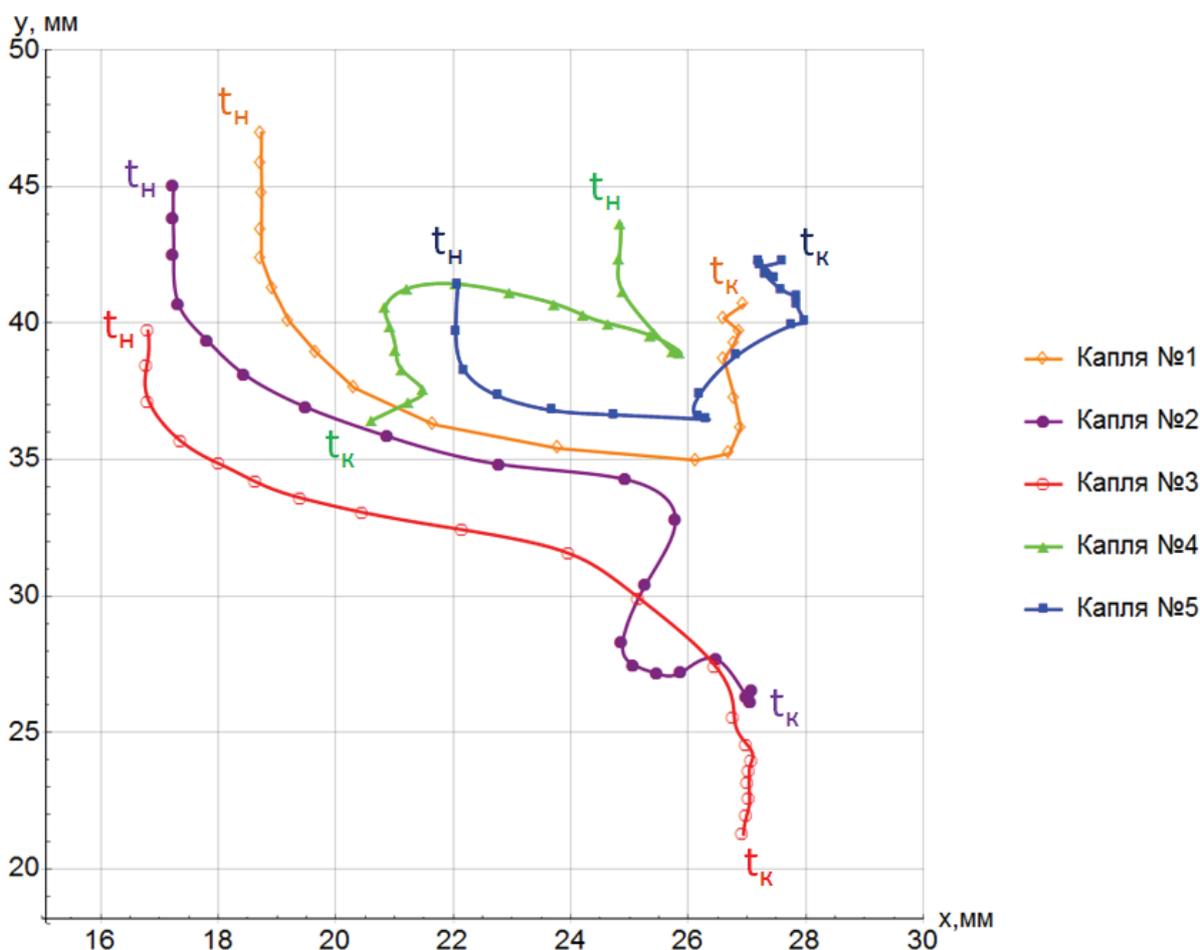


Рис. 10. Траектории движения капль воды в водомасляной эмульсии при обработке неоднородным электрическим полем, где t_n – точка начала наблюдения за движением капль (5 с), t_k – точка конца наблюдения за движением капль (115 с)

Fig. 10. Trajectories of water droplets motion in water-oil emulsions at processing with non-uniform electric field; t_n is the starting point of observation (5 s), t_k is the end point of drop motion observation (115 s)

Капля № 5 при подаче напряжения также сместилась в сторону короткого электрода. При приближении к электроду капля совершила отскок вниз с последующим притяжением и продолжила свободное падение.

Капля № 2 при подаче напряжения сместилась в сторону короткого электрода. При приближении к электроду капля совершила отскок вверх, после чего продолжила движение вверх, против направления силы тяжести.

Капля № 4 при подаче напряжения сместилась в сторону короткого электрода. При приближении к электроду капля совершила отскок вверх, после чего продолжила движение вверх, против направления силы тяжести.

Капля № 3, которая находилась на минимальном расстоянии от короткого электрода, имела отличный от предыдущих капель характер движения. После приближения к короткому электроду на некоторое расстояние капля начала движение в противоположную от электрода сторону – против направления действия силы диэлектрфореза и против направления силы тяжести. После некоторого удаления от короткого электрода капля продолжила вертикальное падение.

По результатам наблюдения траекторий, изображенных на рис. 10, исследуемые капли воды можно разделить по характеру движения на три группы:

- капли № 1 и № 5, которые притягиваются и отклоняются к нижнему краю короткого электрода;
- капли № 2 и № 4, которые притягиваются и отклоняются к верхнему краю короткого электрода;
- капля № 3, притягивающаяся и удаляющаяся от электрода в противоположную сторону.

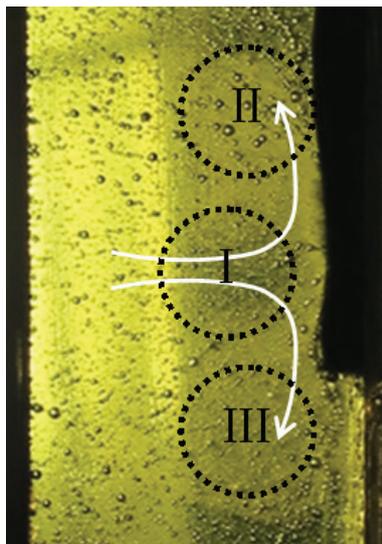


Рис. 11. Специфические зоны, формирующиеся вокруг короткого электрода. Белыми стрелками схематично показано направление движения капель по зонам

Fig. 11. Specific zones around the short electrode. White arrows schematically show the direction of droplets movement in these zones

С целью анализа расположения характерных зон скопления капель воды в водомасляной эмульсии при обработке в неоднородном электрическом поле, а также общей динамики поведения эмульсии как системы производилось наблюдение и фиксация зоны обработки в течение 370 секунд. Напряженность электрического поля в центре межэлектродного пространства составила 2,78 кВ/см. Конечный результат наблюдений представлен на рис. 11.

Из рис. 11 ясно видно формирование трех характерных зон в среде: зоны скопления капель перед коротким электродом (I), зоны выталкивания капель к верхнему краю короткого электрода (II) и зоны выталкивания капель к нижнему краю короткого электрода (III).

Обсуждение результатов

Отдельная капля пресной воды

В результате исследований экспериментальных данных на рис. 4, 5, а также сведений об абсолютных значениях отклонений капель от вертикали, приведенных в табл. 1, можно сделать следующие важные для практики технических приложений выводы.

Во-первых, при обработке водомасляной эмульсии неоднородным электрическим полем, создаваемым конфигурацией плоских пластинчатых электродов различного линейного размера, наблюдается притяжение капель воды в масле к электроду, имеющему меньший линейный размер, за счет наличия вокруг такого электрода областей максимума градиента квадрата напряженности электрического поля ∇E^2 .

Во-вторых, абсолютное значение отклонения капли воды в масле в неоднородном электрическом поле не зависит от её диаметра. Это позволяет распространить полученные результаты на широкий класс водонефтяных эмульсий, в том числе содержащих капли воды диаметром 10–500 мкм. Опытами установлено, что капля воды любого диаметра ускоряется до установившегося значения скорости очень быстро. Все это подтверждает ранее проведенную оценку критерия гомохронности, характеризующего отношение временных масштабов перемещения в объеме цилиндрического конденсатора и установления профиля скорости водной фазы [21].

В-третьих, конечное смещение капель воды нелинейно зависит от напряженности электрического поля. Так, опыты №№ 1–3 при напряженности электрического поля в центре межэлектродной области 2,61–2,93 кВ/см показывают тенденцию равномерного смещения капель воды без касания электрода. В опыте № 4 при подаваемом напряжении в 3,31 кВ/см наблюдается отскок капель воды в противоположную от электрода сторону, что значительно сокращает величину смещения. В опыте № 5 при подаваемом напряжении в 3,5 кВ/см наблюдается отскок и повторное притяжение капель вплоть до границы электрода, что дает максимальное смещение капель.

Отдельная капля раствора NaCl

Анализ данных на рис. 8 и численного сопоставления значений табл. 2 показывает, что отклонение капель раствора хлорида натрия при эквивалентных значениях напряженности в центре межэлектродной области в условиях эксперимента в среднем на 42 % ниже, чем отклонение капель пресной воды.

Установлено, что причиной снижения влияния силы диэлектрофореза на капли раствора хлорида натрия является меньшее значение диэлектрической проницаемости капель раствора по сравнению с диэлектрической проницаемостью капель пресной воды. Исследования [22] показывают, что раствор хлорида натрия концентрации 3,4 моль/литр, используемый в опыте, имеет относительную диэлектрическую проницаемость около 55, что на 30 % ниже, чем относительная диэлектрическая проницаемость пресной воды. Таким образом, отличия между диэлектрическими свойствами дисперсной фазы и дисперсионной среды уменьшаются, что приводит к снижению влияния силы диэлектрофореза.

Капли в водомасляной эмульсии

По результатам анализа вопросов эволюции траекторий капель в водомасляной эмульсии, а также выявления характерных зон, формирующихся вокруг короткого электрода, можно сделать следующие выводы.

Зона I перед коротким электродом является зоной притяжения и кратковременного скопления капель воды. Капли захватываются неоднородным электрическим полем, создаваемым электродами различного линейного размера, притягиваются в зону I, касаются электрода и, в зависимости от своего положения, отталкиваются либо в зону II, либо в зону III, которые являются зонами максимума градиента квадрата напряженности электрического поля ∇E^2 . В зоне I фиксировалось лишь поступательное движение капель к электроду. Коалесценции капель не наблюдалось либо её темпы были незначительны.

Зона II у верхнего края короткого электрода является зоной максимума градиента квадрата напряженности электрического поля ∇E^2 . Капли, прошедшие зону I, коснувшиеся электрода и находящиеся ближе к верхнему краю электрода, претерпевают отскок вверх и притяжение в зону II. Там в течение продолжительного времени происходит скопление и захват капель по следующему механизму: капли отскакивают вверх, коалесцируют и образуют вытянутые вдоль направления линий напряженности электрического поля цепочки. Цепочка капель под действием силы тяжести стремится вниз, частично разрушается и повторно попадает в зону I, повторяя приведенный выше цикл. Зону II можно охарактеризовать как зону наибольшей концентрации капель воды в масле при обработке в неоднород-

ном электрическом поле, поскольку капли здесь задерживаются наиболее продолжительное время. В данной зоне наблюдается активная коалесценция капель воды.

Зона III у нижнего края короткого электрода также является зоной максимума градиента квадрата напряженности электрического поля ∇E^2 , однако здесь, ввиду совпадения направления отскока и силы тяжести, механизм поведения капель отличается от зоны II. Капли, прошедшие зону I, коснувшиеся электрода и находящиеся ближе к нижнему краю электрода, претерпевают отскок и притяжение вниз, в зону III, образуя при этом единую вертикально ориентированную цепочку. Длина цепочки увеличивается при поступлении в неё новых капель. При достижении некоторой критической длины крайняя нижняя капля цепочки, не испытывая более притяжения к короткому электроду и другим каплям за счет действия силы диэлектрофореза, отделяется от цепочки и оседает на дно аппарата. Цикл повторяется при добавлении новых капель в цепочку. Таким образом, в зоне III реализуется полное осаждение капель на дно аппарата. Скопление капель более плотное, чем в зоне I, но ниже, чем в зоне II. В данной зоне наблюдается активная коалесценция капель воды.

Заключение

Таким образом, результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. В неоднородном электрическом поле, создаваемом конфигурацией плоских пластинчатых электродов различного линейного размера, капли воды в масле притягиваются к электроду, имеющему меньший линейный размер, при этом относительное отклонение капли нелинейно зависит от напряженности электрического поля. Наблюдаются три схемы притяжения капель: простое притяжение без касания; притяжение с касанием и отскоком капли; притяжение с касанием, отскоком и повторным притяжением капли. В первом случае среднее относительное отклонение капли составило 46 % при напряженности электрического поля в центре межэлектродного пространства 2,93 кВ/см, во втором случае – 18 % при напряженности 3,31 кВ/см, в третьем случае – 57 % при напряженности 3,5 кВ/см.
2. Содержание солей в промывочной воде отрицательно сказывается на эффективности обработки неоднородным электрическим полем. Отклонение капель раствора хлорида натрия молярной концентрации 3,4 моль/литр к короткому электроду, при эквивалентных значениях напряженности электрического поля, в среднем на 42 % ниже, чем отклонение капель пресной воды.
3. При длительной обработке водомасляной эмульсии в неоднородном электрическом поле

выделяются три характерных зоны скопления капель вокруг короткого электрода: зона притяжения в центре электрода, две зоны выталкивания и скопления капель по краям электрода. Характер движения капель в каждой из зон различен и может быть учтен при проектирова-

нии формы современных электродных систем аппаратов, реализующих обработку водонефтяных эмульсий в электрическом поле, а также для внесения дополнений в математические модели о прогнозе механизмов разделения водонефтяных эмульсий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байков Н.М., Колесников Б.В., Челпанов П.И. Сбор, транспорт и подготовка нефти. – М.: Недра, 1975. – 317 с.
2. Эмульсии нефти с водой и методы их разрушения / Д.Н. Левченко, Н.В. Бергштейн, А.Д. Худякова, Н.М. Николаева. – М.: Химия, 1967. – 200 с.
3. ГОСТ Р 51858–2002. Нефть. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2002. – 12 с.
4. Eow J.S., Mojtaba Ghadiri. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology // Chemical Engineering Journal. – 2002. – № 85. – P. 357–368.
5. Atten P., Lundgaard L., Berg G. A simplified model of electrocoalescence of two close water droplets in oil // Journal of Electrostatics. – 2006. – № 64. – P. 550–554.
6. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding / J.S. Eow, M. Ghadiri, A.O. Sharif, T.J. Williams // Chemical Engineering Journal. – 2001. – № 84. – P. 173–192.
7. Less S., Vilagines R. The electrocoalescers' technology: advances, strengths and limitations for crude oil separation // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2012. – № 81. – P. 57–63.
8. Eow J.S., Ghadiri M. Drop-drop coalescence in an electric field: the effects of applied electric field and electrode geometry // Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects. – 2003. – № 219. – P. 253–279.
9. Atten P. Electrohydrodynamics of dispersed drops of conducting liquid: from drops deformation and interaction to emulsion evolution // International Journal of Plasma Environmental Science & Technology. – 2013. – № 7. – P. 2–12.
10. Electrostatic phase separation: a review / S. Mhatre, V. Vivacqua, M. Ghadiri, A.M. Abdullh, M.J. Al-Marri, A. Hassanpour, B. Hewakandamby, B. Azzopardi, B. Kermani // Chemical Engineering Research and Design. – 2015. – № 96. – P. 177–195.
11. Electrophoretically mediated partial coalescence of a charged microdrop / R. Pillai, J.D. Berry, D.J. Harvie, M.R. Davidson // Chemical Engineering Science. – 2016. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250916303888> (дата обращения: 22.07.2016).
12. Electrocoalescence behavior of two identical droplets with various droplet radii / B.B. Wang, X.D. Wang, T.H. Wang, W.M. Yan // Applied Thermal Engineering. – 2016. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116307463> (дата обращения: 21.05.2016).
13. Changhui G., Limin H. Coalescence behaviour of two large water-drops in viscous oil under a DC electric field // Journal of Electrostatics. – 2014. – № 72. – P. 470–476.
14. Effects of high-frequency and high-voltage pulsed electric field parameters on water chain formation / B. Li, S. Zhiqian, W. Zhenbo, J. Youhai, F. Yuxin // Journal of Electrostatics. – 2016. – № 80. – P. 22–29.
15. Demulsification techniques of water-in-oil and oil-in-water emulsions in petroleum industry / R. Zolfaghari, A. Fakhru'l-Razi, A.C. Luqman, S. Elnashaie // Separation and Purification Technology. – 2016. – № 170. – P. 377–407.
16. Панченков Г.М., Цабек Л.К. Поведение эмульсий во внешнем электрическом поле. – М.: Химия, 1969. – 190 с.
17. Харламов С.Н., Зайковский В.В. Математическое моделирование влияния неоднородного электрического поля на движение капель воды в нефти // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2015. – № 4. – С. 95–117.
18. Таранцев К.В., Красная Е.Г., Коростелева А.В. Моделирование процесса электрокоалесценции капель воды в нефти при различной геометрии электродов // Известия Пензенского государственного педагогического университета им. В.Г. Белинского. – 2011. – № 26. – С. 641–645.
19. Mhatre S., Thaokar R. Electrocoalescence in non-uniform electric fields: an experimental study // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2015. – № 96. – P. 28–38.
20. Chen Z., Shen X. Study on dielectrophoretic deposition of airborne particles in a vertical micro channel // Building and Environment. – 2010. – № 45. – P. 968–975.
21. Харламов С.Н., Зайковский В.В. Оценка влияния нестационарных процессов при моделировании электрокоалесценции водонефтяных эмульсий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 4. – С. 268–272.
22. Gavish N., Promislow K. Dependence of the dielectric constant of electrolyte solutions on ionic concentration – a microfield approach // Physical Review E. – 2016. – № 94. – P. 1–7.

Поступила 01.09.2016 г.

Информация об авторах

Зайковский В.В., аспирант кафедры транспорта и хранения нефти и газа Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Харламов С.Н., доктор физико-математических наук, профессор кафедры транспорта и хранения нефти и газа Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Муратов В.М., кандидат технических наук, заведующий лабораторией № 11 Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 532.529.5, 532.54

EXPERIMENTAL STUDY OF WATER-IN-OIL EMULSION DESTABILIZATION IN NONUNIFORM ELECTRIC FIELD

Vsevolod V. Zaykovskiy¹,

alkast@tpu.ru

Sergey N. Kharlamov¹,

felic@tpu.ru

Vasiliy M. Muratov¹,

vmm@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by the necessity to improve the quality of oil preparation and processing, and decrease of water content in crude oil incoming the oil refining factories, as well as by the expediency of expanding the experimental data bank on regularities of water drops dynamics in heterogeneous media, such as water-in-oil emulsions, at their processing by non-uniform electric field. The data are rather relevant at the development of theoretical transfer models in mixtures. They are considerably valuable and useful in issues of improving the intensification techniques for phased and component separation of emulsion composition and at the development of technical decisions about perfection of devices for water-oil emulsion separation.

The aim of the research is the experimental study of separate water drops deflection in oil from a vertical surface under the influence of non-uniform electric field at different intensities; and the analysis of water drops spatial distribution in emulsion at such processing.

Research techniques: observation and analysis of motion of separate drops in salty and fresh water, and drops as a part of emulsion in the observational mesh affected by the electric field generated by flat electrodes of different linear dimensions.

Results. It is shown that the relative deviation of a drop to a short electrode depends nonlinearly on the electric field strength in the center of area between electrodes. So the average relative deviation of drops makes 33–46 % at electric field strength of 2,61–2,93 kV/cm. The rebound of water drops to the opposite side from electrode is observed at the strength of 3,31 kV/cm and the deviation is reduced to 18 %. The rebound and repeated attraction of drops up to electrode boundary is observed at the strength of 3,5 kV/cm. It gives maximum displacement of drops on the average on 57 %. The content of sodium chloride salts of 3,4 mole/liter concentration in flushing water affects negatively the effectiveness of processing with non-uniform electric field. It is ascertained that deflection of salty drops is at the average 42 % lower, than the one of drops in fresh water. It was determined as well that the drops are accumulated around a short electrode in three zones. The character of drop motion is different in each of them. It may be used for optimization of electrode form in the devices implementing processing in non-uniform electric field.

Key words:

Crude oil treatment, water-in-oil emulsion, electric field, salt content, droplet diameter.

REFERENCES

- Baykov N.M., Kolesnikov B.V., Chelpanov P.I. *Sbor, transport i podgotovka nefiti* [Gathering, transport and preparation of oil]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 317 p.
- Levchenko D.N., Bergshtein N.V., Khudyakova A.D., Nikolaeva N.M. *Emulsii nefiti s vodoy i metody ikh razrusheniya* [Water-oil emulsion and methods of their destruction]. Moscow, Khimiya Publ., 1967. 200 p.
- GOST R 51858–2002. *Neft. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [State Standart 51858–2002. Crude petroleum. General specifications]. Moscow, Standartinform, 2002. 12 p.
- John S. Eow, Mojtaba Ghadiri. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology. *Chemical Engineering Journal*, 2002, no. 85, pp. 357–368.
- Atten P., Lundgaard L., Berg G. A simplified model of electrocoalescence of two close water droplets in oil. *Journal of Electrostatics*, 2006, no. 64, pp. 550–554.
- Eow J.S., Ghadiri M., Sharif A.O., Williams T.J. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding. *Chemical Engineering Journal*, 2001, no. 84, pp. 173–192.
- Less S., Vilagines R. The electrocoalescers' technology: Advances, strengths and limitations for crude oil separation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, no. 81, pp. 57–63.
- Eow J.S., Ghadiri M. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 2003, no. 219, pp. 253–279.
- Atten P. Electrohydrodynamics of dispersed drops of conducting liquid: from drops deformation and interaction to emulsion evolution. *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology*, 2013, no. 7, pp. 2–12.
- Mhatre S., Vivacqua V., Ghadiri M., Abdullah A.M., Al-Marrari M.J., Hassanpour A., Hewakandamby B., Azzopardi B., Kermani B. Electrostatic phase separation: a review. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, no. 96, pp. 177–195.
- Pillai R., Berry J.D., Harvie D.J., Davidson M.R. Electrophoretically mediated partial coalescence of a charged microdrop. *Chemical Engineering Science*, 2016. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250916303888> (accessed 22 June 2016).
- Wang B.B., Wang X.D., Wang T.H., Yan W.M. Electrocoalescence behavior of two identical droplets with various droplet radii. *Applied Thermal Engineering*, 2016. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116307463> (accessed 21 May 2016).
- Changhui G., Limin H. Coalescence behaviour of two large water-drops in viscous oil under a DC electric field. *Journal of Electrostatics*, 2014, no. 72, pp. 470–476.

14. Li B., Zhiqian S., Zhenbo W., Youhai J., Yuxin F. Effects of high-frequency and high-voltage pulsed electric field parameters on water chain formation. *Journal of Electrostatics*, 2016, no. 80, pp. 22–29.
15. Zolfaghari R., Fakhru'l-Razi A., Luqman A.C., Elnashaie S. Demulsification techniques of water-in-oil and oil-in-water emulsions in petroleum industry. *Separation and Purification Technology*, 2016, no. 170, pp. 377–407.
16. Panchenkov G.M., Tsabek L.K. *Povedenie emulsii vo vneshnem elektricheskoy pole* [Behavior of emulsion in external electric field]. Moscow, Khimiya Publ., 1969. 190 p.
17. Kharlamov S.N., Zaykovskiy V.V. Mathematical modeling of nonuniform electric field influence on water droplets motion in oil. *Oil and Gas business journal*, 2015, no. 4, pp. 95–117. In Rus.
18. Tarantsev K.V., Krasnaya E.G., Korosteleva A.V. Modelirovanie protsessov elektrokoalesentsii kapel vody v nefiti pri razlichnoy geometrii elektrodov [Modeling water drops electrocoalescence in oil at different electrodes geometry]. *Izvestiya Penzenskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. V.G. Belinskogo*, 2011, no. 26, pp. 641–645.
19. Mhatre S., Thakkar R. Electrocoalescence in non-uniform electric fields: an experimental study. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2015, no. 96, pp. 28–38.
20. Chen Z., Shen X. Study on dielectrophoretic deposition of airborne particles in a vertical micro channel. *Building and Environment*, 2010, no. 45, pp. 968–975.
21. Kharlamov S.N., Zaykovskiy V.V. Otsenka vliyaniya nestatsionarnykh protsessov pri modelirovanii elektrokoalesentsii vodonosnykh emulsiy [Assessment of impact of non-stationary processes when simulating water-oil emulsion electrocoalescence]. *Gorniy informacionno-analiticheskii bulletin*, 2013, no. 4, pp. 268–272.
22. Gavish N., Promislow K. Dependence of the dielectric constant of electrolyte solutions on ionic concentration – a microfield approach. *Physical Review E*, 2016, no. 94, pp. 1–7.

Received: 1 September 2016.

Information about the authors

Vsevolod V. Zaykovskiy, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey N. Kharlamov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vasiliy M. Muratov, Cand. Sc., head of the laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.