

Моделирование процессов коагуляции и диспергирования воды в слабопроводящих жидкостях в электрическом поле

К. В. Таранцев

ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет»,
ул. Красная, д.40, г. Пенза, 440026, Россия, e-mail: kvitar@bk.ru

Представлены результаты физического и математического моделирования процессов получения и разрушения водонефтяных эмульсий в COMSOL Multiphysics, а также моделирования электрических полей, полей скорости и давления в граничных условиях, соответствующих разрабатываемым аппаратам. На основе анализа полученных данных предложены варианты выполнения электродиспергаторов и электродегидраторов.

Ключевые слова: электродиспергаторы, конструкция, модернизация, физико-химические характеристики, эмульсия, модельные среды, диаметр капли, напряженность поля.

УДК 537.8, 66.063.61, 66.066.3

ВВЕДЕНИЕ

В процессе добычи, перед подачей в нефтепровод, из нефти удаляют воду. На нефтеперерабатывающих заводах на первой стадии переработки производят обезвоживание и обессоливание нефти. Эти процессы осуществляют на установках электрообессоливания (ЭЛОУ), где вначале отделяют остатки промысловой воды, далее смешивают нефть с чистой водой в количестве от 0,5 до 2%, а затем отслаивают соленую воду.

Для интенсификации процесса обезвоживания применяют три основных способа: термический (предварительным нагревом нефти), химический (добавлением ПАВ) и электродегидратацию, то есть удаление воды осаждением в гравитационном поле после предварительной коагуляции капель воды в результате действия электрического поля.

Существующая аппаратурно-технологическая схема обессоливающей установки представлена на рис. 1. Установку обычно проектируют двухступенчатой. В электродегидрататорах первой ступени удаляется 75–80% (масс.) соленой воды и 95–98% (масс.) солей, а второй ступени – 60–65% (масс.) оставшейся эмульсионной воды и примерно 92% (масс.) оставшихся солей. Число устанавливаемых электродегидраторов при двухступенчатом обессоливании зависит от объема и качества (то есть содержания воды, солей и стойкости эмульсий) обрабатываемой нефти, от типа и производительности аппаратов.

Эксплуатация электродегидраторов связана с определенными трудностями. Электродегидра-

торы чувствительны к изменению свойств и обводненности нефти, скачкам производительности. Особенно трудно поддерживать электрический режим при обессоливание нефти, которая образует устойчивые эмульсии. Во многих случаях качество обессоливания нефти на НПЗ не отвечает современным требованиям.

При выборе оптимальной конструкции электродегидрататора необходимо учитывать гидродинамические параметры (форму и размеры электродов, скорость прохождения эмульсией рабочей зоны), электрофизические параметры (напряжение, частоту, силу тока, полярность электродов), назначение (обезвоживание «сухого» или «влажного» нефтепродукта) [1–6]. Потребление свежей воды для обессоливания нефти на таких установках доходит до 500 тыс. м³ в год.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Моделирование процессов диспергирования и коагуляции воды в слабопроводящих жидкостях осуществлялось в среде COMSOL Multiphysics. За основу был взят блок электрокоагуляции, предлагаемый в COMSOL. Блок использует два модуля: *AC/DC Module* и *Microfluidics Module*. *AC/DC Module* позволяет моделировать постоянное и переменное электрическое поле в рабочей зоне различной формы и размеров, определять распределение в пространстве и времени таких параметров, как электропроводность и диэлектрическая проницаемость. *Microfluidics Module* содержит приложения, описывающие динамику потока как в однородной, так и в многофазной

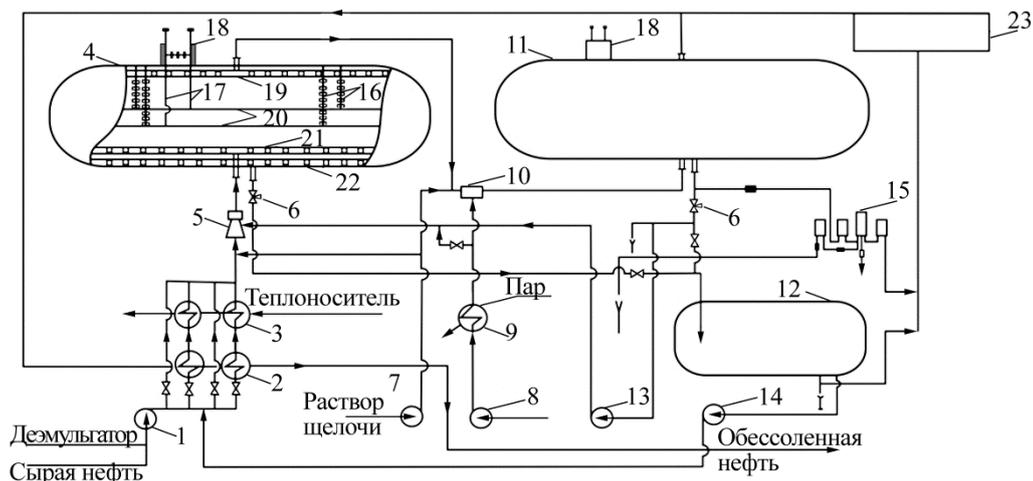


Рис. 1. Аппаратурно-технологическая схема электрообессоливающей установки (ЭЛОУ). 1, 7, 8, 13, 14 – насосы; 2 – теплообменники; 3, 9 – подогреватели; 4, 11 – электродегидраторы; 5, 10 – смесители; 6 – регулируемые вентили; 12 – отстойник; 15 – смотровой фонарь. Устройство электродегидратора: 16 – подвесные изоляторы; 17 – шины подвода электрического тока; 18 – трансформатор; 19 – коллектор обессоленной нефти; 20 – электроды; 21 – распределитель ввода сырья; 22 – коллектор соленой воды; 23 – модуль экологического мониторинга и контроля.

жидкости в рабочей зоне под действием различных объемных сил.

Моделирование процессов выполнено на основании уравнений, описывающих течение несжимаемой жидкости между электродами для схем, изображенных на рис. 2. Слабопроводящая жидкость с одной или двумя каплями воды движется между электродами. Верхняя и нижняя границы – это вход и выход слабопроводящей жидкости, а справа и слева заряженный и заземленный электроды.

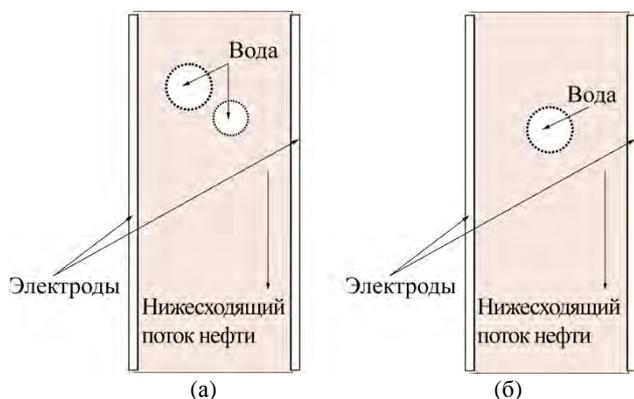


Рис. 2. Схемы модели: слияния (а) и разрушения (б) капель воды.

Система уравнений, решаемая при моделировании, содержит обобщенную версию уравнений Навье-Стокса с дополнительной силой электрического поля и уравнение неразрывности потока

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + \eta(\nabla u + (\nabla u)^T)] + \\ + F_{st} + \rho g + F, \\ \nabla \cdot u = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где ρ – плотность (кг/м^3); u – скорость потока (м/с); η – динамическая вязкость ($\text{Па}\cdot\text{с}$); p – давление (Па); I – единичный тензор; $\eta(\nabla u + (\nabla u)^T)$ – тензор вязких напряжений; g – ускорение свободного падения (м/с^2); F_{st} – силы на границе раздела (Н/м^3); F – дополнительная объемная сила электрического поля (Н/м^3).

Для отслеживания движения фаз на границе раздела жидкостей использована система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot \frac{3\chi\sigma\varepsilon}{2\sqrt{2}} \nabla \psi, \\ \psi = -\nabla \cdot \varepsilon^2 \nabla \phi + (\phi^2 - 1)\phi, \end{cases} \quad (2)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения (Н/м); ε – числовой параметр (м), который определяет толщину границы раздела между жидкостями, то есть область, где фазовая переменная ϕ изменяется от -1 (вода) до $+1$ (нефть); χ – числовой параметр, характеризующий подвижность границы раздела.

Электрический потенциал V рассчитывали по уравнению

$$-\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V) = 0, \quad (3)$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума; ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Относительную диэлектрическую проницаемость определяли в зависимости от внутренних объемных долей каждой жидкости:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{r1} Vf_1 + \varepsilon_{r2} Vf_2, \quad (4)$$

здесь ε_{r1} и ε_{r2} – относительные диэлектрические проницаемости нефти и воды соответственно; Vf_1 – объемная доля первой жидкости (вода); Vf_2 – объемная доля второй жидкости (нефть).

Напряженность электрического поля рассчитывали по формуле

$$E = -\nabla \cdot V. \quad (5)$$

Электрическую силу, входящую в уравнение Навье-Стокса, определяли как

$$F = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r E^2}{\sigma_e} \nabla \sigma_e. \quad (6)$$

Электропроводность определяли в зависимости от внутренних объемных долей каждой жидкости:

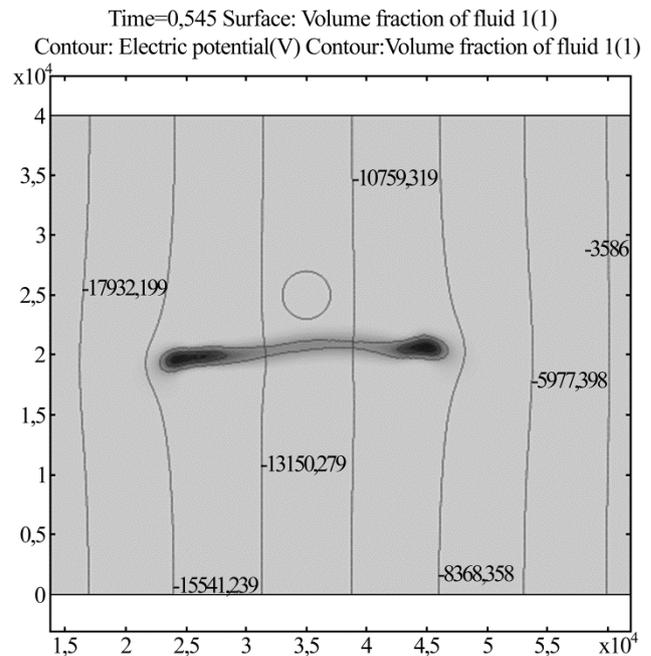
$$\sigma_e = \sigma_{e1} Vf_1 + \sigma_{e2} Vf_2, \quad (7)$$

здесь σ_{e1} и σ_{e2} – электропроводность касторового масла и воды соответственно.

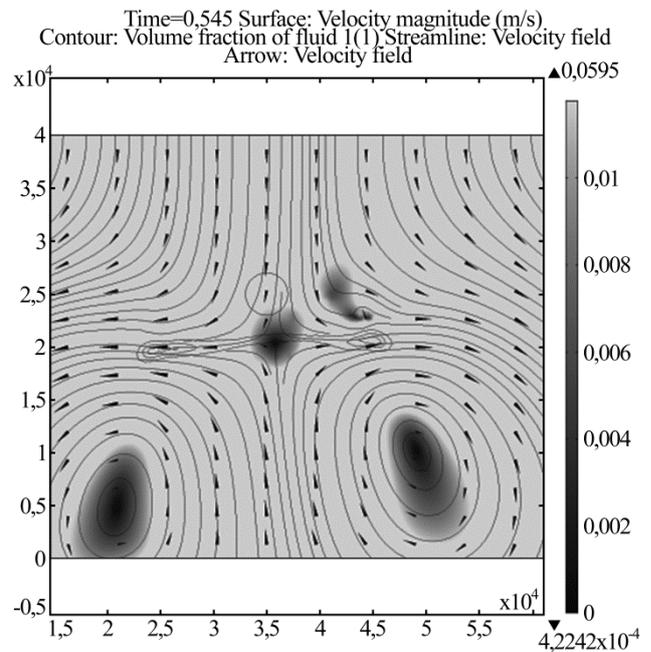
РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены результаты численного моделирования процесса разрушения капель воды различной электропроводности (солености) в нефтепродукте под воздействием электрического поля. Моделирование проведено для капель воды с электропроводностью $3 \cdot 10^{-4}$ (Ом·см) $^{-1}$, диаметром 4 мм в межэлектродном пространстве размером 70×40 мм. На рис. 3а показаны результаты расчета распределения потенциала электрического поля вблизи границы раздела капли. Результаты расчета поля скоростей (рис. 3б) позволяют сделать вывод, что за характер разрушения капли ответственны два вихря, возникающие в сплошной среде. Создание и усиление электрического поля приводят к торможению капли. Взаимодействие набегающего потока с каплей приводит к формированию дорожки Кармана. За неподвижным или медленно перемещающимся объектом образуются вихри, которые взаимодействуют с подвижной границей раздела. Капля деформируется, а затем разрушается вдоль линий напряженности электрического поля. Исследования показали, что механизм разрушения капли зависит не только от ее размеров, но и в существенной мере от гидродинамических, электрофизических свойств жидкостей, образующих эмульсию, и электрических параметров системы.

Проводимость нефти и воды сильно колеблется в зависимости от содержания в них различных веществ, и в результате электропроводность нефтяных эмульсий обуславливается не только количеством содержащейся воды и степенью ее дисперсности, но и количеством растворенных в этой воде солей и кислот. Эксперименты и моделирование проводились на модельных средах со свойствами в диапазоне, по возможности перекрывающем свойства встречающихся водонефтяных эмульсий.



(a)



(б)

Рис. 3. Результаты численного моделирования процесса разрушения капель воды с электропроводностью $3 \cdot 10^{-4}$ (Ом·см) $^{-1}$ в нефтепродукте, разность потенциалов между электродами 4 кВ/см, исходный диаметр капли 4 мм: (а) – электрическое поле; (б) – поле скоростей.

Предварительно был проведен натурный эксперимент по исследованию поведения капли воды в касторовом масле. Свойства касторового масла находятся в диапазоне возможных гидродинамических и электрофизических свойств нефти. Кроме того, оно прозрачно, и можно легко наблюдать и регистрировать происходящие процессы.

Были проведены эксперименты, позволившие выявить диапазон напряженностей электриче-

ского поля, в котором наблюдается явление разрушения капли под действием его сил. Результаты эксперимента для процесса разрушения капля воды диаметром от 1 до 8 мм в касторовом масле в электрическом поле различной напряженности представлены на рис. 4. Имеется неплохая сходимость экспериментальных и расчетных данных. Плотность и вязкость касторового масла, используемого в эксперименте, измеряли с помощью приборов. Эти свойства масла вводились в модель. Регистрировалась при проведении эксперимента и рассчитывалась на модели критическая напряженность электрического поля, при которой происходит разрыв капля воды разного диаметра.

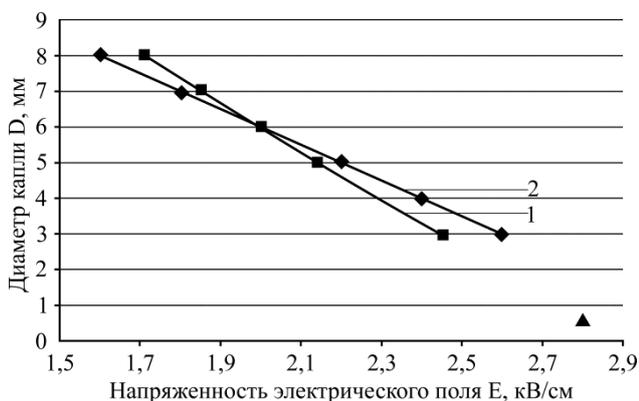


Рис. 4. Влияние диаметра капли на критическое напряжение начала ее разрушения в электрическом поле: 1 – эксперимент; 2 – результаты расчета.

Из представленных результатов видно, что с уменьшением размера капля воды напряженность поля, необходимая для их разрушения, увеличивается, следовательно, в процессе электродиспергирования, по мере уменьшения размеров капля в рабочей зоне аппарата, необходимо увеличивать напряженность электрического поля.

Эти результаты исследования согласуются с результатами С. Торза, Р. Кокса, С. Мейсона [7], полученными при разрушении капля воды в касторовом масле (показаны треугольником на рисунке), а также с данными других авторов [8–13].

Проведенные эксперименты и моделирование позволили при конструировании диспергаторов, работающих на основе электрогидродинамических эффектов, учесть возможные механизмы диспергирования.

Однако модель не совсем полно охватывает многообразие механизмов разрушения капля воды в слабопроводящих жидкостях. Это объясняется тем, что форма двойных слоев, образующихся на границе раздела жидкостей, зависит от природы контактирующих сред. Описано достаточно много механизмов разрушения капля. Так, в зависимости от напряженности поля у мелкой

капля может образовываться заостренный выступ (конус Тейлора) в направлении электрода или другой капля и сброс мелких капля. У более крупной капля по мере роста напряженности в направлении одного электрода происходит смывание мелких капля адсорбционным слоем сплошной среды, а в направлении другого – разрыв диффузной части слоя дисперсной фазы. Относительно крупная капля с ростом напряженности приобретает гантелеобразную форму, и происходит ее разрыв в средней части. В переменном поле имеет место не вытягивание капля по направлению силовых линий, а сплющивание ее поперек поля.

В случае процесса создания эмульсии наиболее удобным для интенсификации электрическим полем является смеситель эжекторного типа (рис. 5), так как в этом случае нет подвижных элементов. Высоковольтный электрод закрепляется в заземленном корпусе.

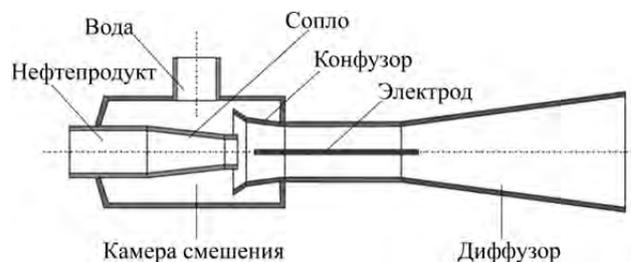


Рис. 5. Конструкция электрогидродинамического эжекторного диспергатора.

Произведено моделирование процесса в смесителе для параметров потоков, характерных для смесителей, устанавливаемых на ЭЛОУ НПЗ. Результаты моделирования поля скорости течения жидкости, распределение давления и электрическое поле в электрогидродинамических эжекторных смесителях показаны на рис. 6.

Модель позволяет визуализировать распределение давления, электрическое поле, поле скоростей в корпусе смесителя при варьировании размеров и формы рабочей зоны, а также при изменении других параметров, входящих в модель.

В качестве основного критерия интенсивности процесса было выбрано время слияния капля воды в нефтепродуктах, так как именно оно позволяет комплексно оценить протекающие процессы и эффективность работы оборудования.

Согласно результатам численного моделирования процесса электрокоалесценции капля воды в нефти, протекающей по каналу постоянного сечения, после создания постоянного электрического поля с разностью потенциалов 7 кВ этот процесс наблюдается на 0,04 секунды, но при

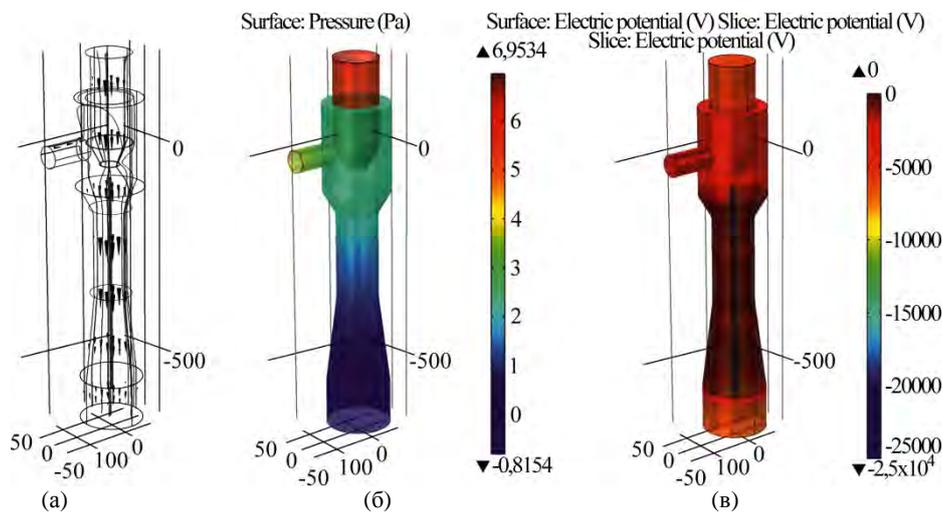


Рис. 6. Результаты моделирования электрогидродинамических эжекторных смесителей: (а) – поле скорости течения жидкости; (б) – распределение давления; (в) – электрическое поле.

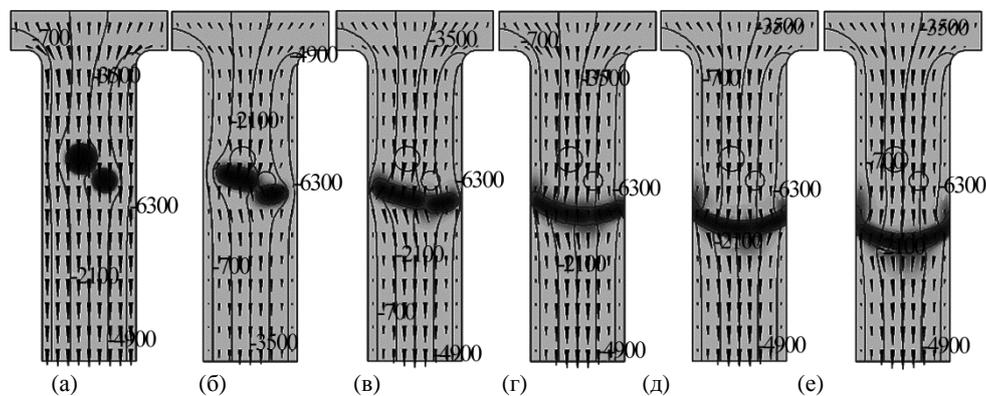


Рис. 7. Результаты численного моделирования процесса электрокоалесценции капель воды в нефти, протекающей в системе электродов плоскость–плоскость; разность потенциалов между электродами 7 кВ, электрическое поле постоянное, интервал между кадрами 0,04 с.

этом явно присутствует образование структуры между электродами, что на физической модели приведет к замыканию электродов. После создания переменного электрического поля с разностью потенциалов 7 кВ и частотой 100 Гц этот процесс наблюдается на 0,04 секунды, но при этом образование структуры между электродами отсутствует, что на физической модели позволит избежать замыкания электродов.

На рис. 7 представлены результаты численного моделирования процесса электрокоалесценции капель воды в нефти, протекающей по каналу постоянного сечения. Моделирование проведено для двух капель воды диаметром 3,2 и 2,4 мм, перемещающихся между электродами, расположенными на расстоянии 10 мм. Через верхнюю границу поступает нефть со скоростью 20 мм/с.

Дальнейшее увеличение напряжения приводит к увеличению электростатических сил, которые могут вызвать диспергирование капель. Поэтому прикладываемое напряжение должно быть выше уровня напряжения разрыва капелек, но ниже начала диспергирования. Этот диапазон

напряжения можно считать рабочим для процесса слияния в электрическом поле.

В результате исследований были получены зависимости интенсивности разрушения эмульсий от напряженности и частоты электрического поля, скорости течения слабопроводящей жидкости, а также угла раскрытия, формы и размеров электродов.

На рис. 8 представлено влияние напряженности электрического поля и формы канала на среднее время до касания капель.

Выявлено, что в постоянном электрическом поле при напряженности последнего до 4 кВ/см^2 процесс идет медленнее, чем в его отсутствие. Лишь при превышении определенного критического значения порядка 5 кВ/см^2 наблюдается ускорение процесса слияния капель. Это объясняется тем, что разрушение адсорбционных слоев на поверхности капель требует превышения некоторой критической величины энергии.

Результаты моделирования показывают, что при напряженности переменного электрического поля до 4 кВ/см^2 в диффузоре процесс слияния капель протекает медленнее, чем в его отсут-

ствие, а в конфузоре и в канале постоянного сечения увеличения времени слияния капель не наблюдается, а происходит монотонное, постоянное ускорение процесса слияния капель по мере роста напряженности электрического поля. Это указывает на преимущество в случае применения переменного электрического поля каналов постоянного сечения и сужающихся каналов.

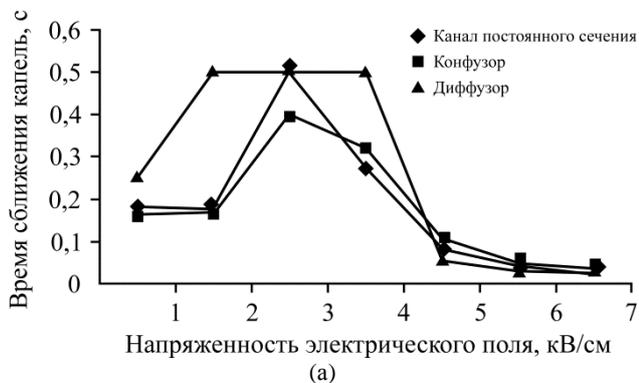


Рис. 8. Влияние напряженности электрического поля и формы канала на среднее время до касания капель: (а) – постоянное электрическое поле; (б) – переменное электрическое поле.

На рис. 9 показано влияние угла раскрытия электродов на среднее время сближения капель. Видно, что при напряженности электрического поля 5 кВ/см с увеличением угла раскрытия рабочей зоны электродегидратора (от конфузора с углом раскрытия 20° до диффузора с углом сужения 10°) время на слияние капель сокращается.

Влияние скорости течения эмульсии на среднее время сближения капель в конфузоре показано на рис. 10а. Из представленных данных видно, что в постоянном электрическом поле для сужающейся рабочей зоны электродегидратора с увеличением скорости протекания эмульсии в рабочей зоне выше 5 кВ/см время монотонно увеличивается, то есть обычно применяемая в электродегидраторах скорость течения 5 мм/с является оптимальной.

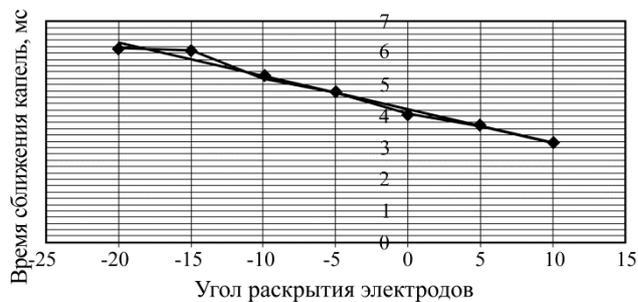


Рис. 9. Влияние угла раскрытия электродов на среднее время сближения капель.

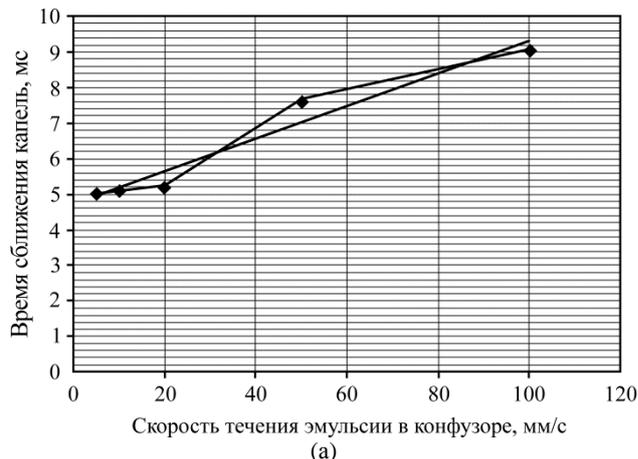


Рис. 10. Влияние скорости течения эмульсии на среднее время сближения капель: (а) – конфузор; (б) – диффузор.

Влияние скорости течения эмульсии на среднее время сближения капель в диффузоре представлено на рис. 10б, из которого видно, что в постоянном электрическом поле в расширяющейся рабочей зоне электродегидратора с увеличением скорости протекания эмульсии до 18 мм/с наблюдается уменьшение времени, необходимого для слияния капель. При скорости протекания эмульсии, большей 18 мм/с, время для слияния капель больше, то есть процесс протекает менее эффективно. То есть в случае прохождения эмульсии по конфузору оптимальной является скорость протекания порядка 18 мм/с.

Процесс разрушения водонефтяных эмульсий происходит в аппаратах, называемых электродегидраторами. В настоящее время наиболее ши-

роко применяются электродегидраторы с горизонтальным цилиндрическим корпусом. Электроды выполняют в виде стержневой конструкции. На рис. 11 показана модель для типового электродегидратора объемом 63 куб. м. Водонефтяная эмульсия подается через форсунки, расположенные под границей раздела отстоявшейся воды. Первичное отделение нефти происходит в слое воды. Далее капли проходят первую зону между зеркалом воды и нижним электродом, затем – обработка между электродами и далее осушенная нефть уходит из аппарата через коллектор.

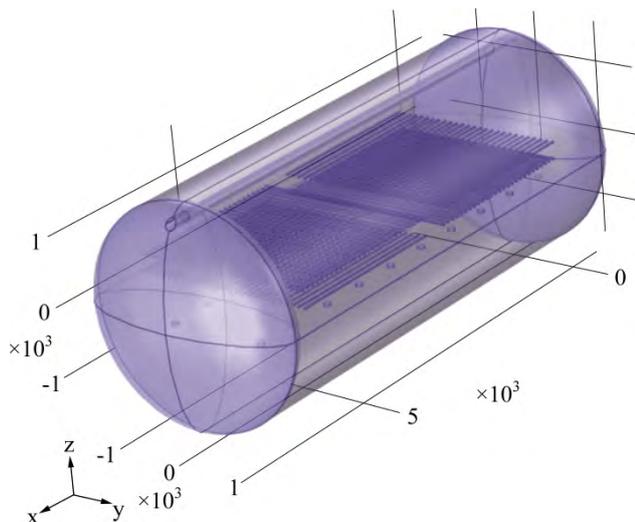


Рис. 11. Геометрия электродов в существующих горизонтальных электродегидраторах.

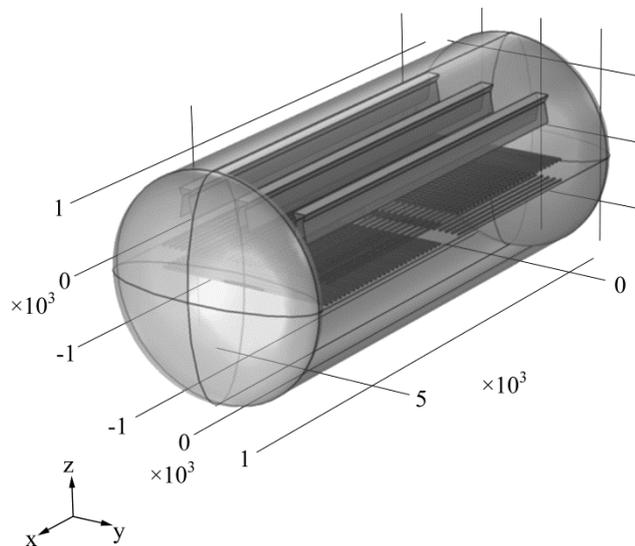


Рис. 12. Электродегидратор с дополнительной системой электродов в виде конфузора и диффузора.

Анализ используемых в мировой практике для разделения водонефтяных эмульсий форм и размеров электродов позволил выбрать для конструктивного воплощения электрокоалесценторы с системой электродов, подобной трубе Вентури. Для повышения степени обезвоживания водо-

нефтяной эмульсии рекомендовано существующие конструкции электродегидраторов, в зависимости от степени обводненности нефтепродукта, оснастить дополнительной 3-ступенчатой рабочей зоной, состоящей из: 1 – конфузора; 2 – зоны постоянного сечения; 3 – диффузора (рис. 12). Это позволит добиться обезвоживания нефтепродуктов без существенных дополнительных затрат. Такая конструкция дает возможность в одном рабочем объеме аппарата организовать две ступени контакта эмульсии с электрическим полем, что приводит практически к полному обезвоживанию обрабатываемого нефтепродукта. На эту конструкцию был получен патент [14].

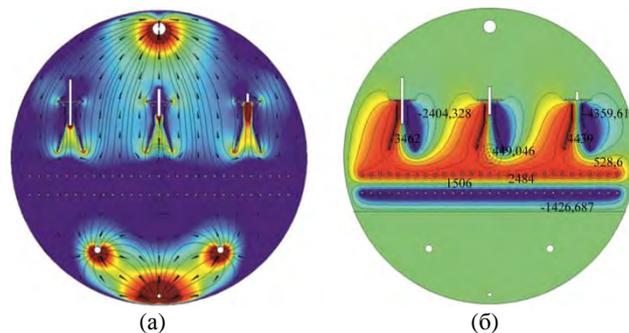


Рис. 13. Поле скорости течения жидкости (а) и электрическое поле (б), рассчитанные для модернизированного варианта при разных условиях ввода «сухого» нефтепродукта в верхнюю часть диффузора с полным перекрытием вторичного потока на вход дополнительного коалесцентора.

На основе произведенных расчетов предложено в существующих электродегидраторах в дополнение к плоской системе электродов установить электроды, образующие каналы для прохождения нефти вначале через конфузор, затем через зону постоянного сечения и на последнем этапе – через диффузор, и организовать процесс с возвратом части выходящего потока сухого нефтепродукта. Это позволило изменить структуру потоков в электродегидраторе и увеличить степень обезвоживания нефтепродукта. Результаты проведенных расчетов для модернизированной конструкции электродегидратора представлены на рис. 13.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование электрического поля существенно интенсифицирует процесс разрушения и слияния капель воды только при оптимальных значениях напряженности электрического поля. Предложена модель, которая дает возможность проанализировать происходящие процессы и выбрать форму, размеры, режимы работы электрогидродинамических устройств с учетом особенностей разрушения и слияния капель.

Учет описанных эффектов позволит: 1) добиться мелкого диспергирования в электродис-

пергаторах и быстрого слияния капель в электрокоагуляторах; 2) избежать электрического замыкания электродов в рабочей зоне электродиспергаторов и электрокоагуляторов; 3) выбирать конструкцию, размеры, режимы работы электрогидродинамических устройств на основе моделирования процессов с учетом особенностей разрушения и слияния капель в данных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tarantsev K.V., Tarantseva K.R. Algorithm for Analysis of Electrohydrodynamic Emulsifiers. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2001, **37**(11–12), 556–558.
2. Tarantsev K.V., Tarantseva K.R. Designs of Electrohydrodynamic Emulsifiers. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2002, **38**(7–8), 444–446.
3. Tarantsev K.V., Tarantseva K.R. Optimization of Parameters for Electrohydrodynamic Emulsifiers. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2002, **38**(9–10), 576–578.
4. Tarantsev K.V. Electrohydrodynamic Flows of Media Along the Interface between Gas–liquid Phases. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2009, **45**(11–12), 681–685.
5. Tarantsev K.V. Study of Electrohydrodynamic Flows at a Liquid-liquid Phase Interface. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2010, **46**(1–2), 64–68.
6. Tarantsev K.V. Electrohydrodynamic Effects at a Liquid-liquid Interface Using Glass Screens between Electrodes. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2010, **46**(3–4), 130–136.
7. Torza S., Cox R.G., and Mason S.G. Electrohydrodynamic Deformation and Burst of Liquid Drops. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*. 1971, **269**, 295–319.
8. Taylor G.I. Disintegration of Water Drops in an Electric Field. *Proc. R. Soc. Lond. A*. 1964, **291**, 159–166.
9. Беньковский, В.Г. Диспергирование воды в электрическом поле. *Коллоидный журнал*. 1953, (1), 3–5.
10. Панченков Г.М., Цабек Л. К. *Поведение эмульсий во внешнем электрическом поле*. М.: Химия, 1969. С. 181.
11. Jong-Wook Ha and Seung-Man Yang. Electrohydrodynamics and Electrorotation of a Drop with Fluid Less Conductive than that of the Ambient Fluid. *Phys. Fluids*. 1999, **12**(4), 764–772.
12. Jong-Wook Ha and Seung-Man Yang, Effect of Nonionic Surfactant on the Deformation and Breakup of a Drop in an Electric Field. *J. Fluid Mech.* 2000, **405**, 131–156.
13. Etienne Lac and G. M. Homsy. Axisymmetric Deformation and Stability of a Viscous Drop in a Steady Electric Field. *J. Fluid Mech.* 2007, **590**, 239–264.
14. RU 24525513 C1 2010.11.09. Таранцев К.В. (RU) *Устройство для разделения водонефтяных эмульсий в электрическом поле*.

Поступила 24.07.12

После доработки 15.10.12

Summary

The paper considers the results of physical and mathematical modeling of production and destruction of oil-water emulsions in COMSOL Multiphysics. The outcomes are presented of the simulation of electric fields, as well as of the velocity and pressure fields, all in the boundary conditions corresponding to the developed apparatus. Certain embodiments of electric dispensers and elektro-dehydrators are suggested, based on the analysis of the data obtained.

Keywords: electric dispenser, design, modernization, physico-chemical characteristics of emulsion, modeling environments, diameter of a drop, intensity of a field.