

УДК 532.5:62.665

К ТЕОРИИ ВЫМЫВАНИЯ СОЛЕЙ ИЗ ВОДОНЕФТЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ ПРЕСНОЙ ВОДОЙ

В. Ш. Шагапов, Э. В. Галиакбарова*, И. К. Гималтдинов*

Институт механики им. Р. Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН,
450054 Уфа, Россия

* Уфимский государственный нефтяной технический университет, 450062 Уфа, Россия
E-mails: Shagapov@rambler.ru, emi.galiakbar@yandex.ru, iljas_g@mail.ru

Для решения задачи очистки нефти от солей разработана модель, описывающая движения частиц минерализованной воды в нефти, обтекающих более крупную каплю пресной воды. Представлены результаты расчетов влияния радиуса и начальной скорости капли пресной воды на коагуляцию капель пресной и минерализованной воды.

Ключевые слова: технология обессоливания, струйный смеситель, движение капель.

DOI: 10.15372/PMTF20190410

Введение. В настоящее время проблема повышения эффективности процесса обессоливания нефти является актуальной, в силу того что основные нефтяные месторождения находятся на завершающей стадии эксплуатации [1]. Добываемая из таких месторождений нефть характеризуется высокой степенью обводненности. Пластовая вода — сильноминерализованная среда (до 300 г/л), содержащая хлориды натрия, магния и кальция, а также сульфаты и щелочи. Первичное обезвоживание, при котором удаляется основная доля пластовой воды, осуществляется обычно путем гравитационного отстоя. Оставшаяся часть воды и нефть образуют мелкодисперсную эмульсию с размером капель (частиц) минерализованной воды $0,1 \div 1,0$ мкм и концентрацией солей до 2 г/л [2]. Дальнейшее обессоливание нефти проводится в электрообессоливающих установках [3].

Процесс обессоливания в установках подготовки нефти предполагает наличие инжестирующей промывную воду элемента [4–10], расположенного перед сепарирующим узлом. В этом элементе инжестируемая струя воды распадается на капли, которые, двигаясь в потоке нефти, улавливают содержащиеся в ней частицы минерализованной воды. Коагулированные таким образом капли воды легче отделяются от нефти, поскольку они значительно крупнее, чем минерализованные частицы.

В работе [11] представлены результаты исследований процесса каплеобразования и описаны наиболее эффективные режимы работы установок промышленной подготовки нефти. Возможность оптимизации процесса обессоливания нефти с помощью электрической

Работа В. Ш. Шагапова выполнена при финансовой поддержке государственного бюджета в рамках госзадания на 2019–2021 гг. (код проекта 0246-2019-0052). Работа Э. В. Галиакбаровой и И. К. Гималтдинова выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-41-020244).

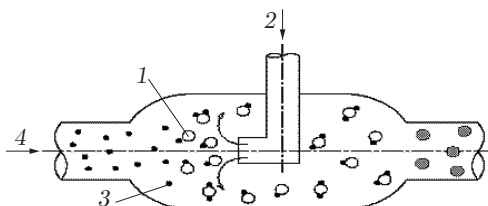


Рис. 1. Схема зоны смешения, в которой капли (1) впрыскиваемой пресной воды (2) улавливают частицы минерализованной воды (3), поступающей из нефти (4)

пульверизации рассмотрена в работе [12], в которой приведены характерные размеры капель соленой и пресной воды, получено распределение капель по размерам, когда достигается максимальный эффект обессоливания. Модель установки для обессоливания нефти на основе нейронных сетей представлена в работе [13]. Влияние нагрева нефти на процесс ее обессоливания промывной водой с использованием элементов имитационного моделирования исследуется в работе [14], где показано, что существует оптимальная температура нефти, при которой наблюдается максимальный эффект.

Образование капель при инъекции одной жидкости в другую в основном изучается экспериментально. В работе [15] экспериментально изучен механизм дробления струи воды в потоке несмешиваемой жидкости. Показано, что длина цельной части струи до начала дробления существенно зависит от вязкости инжектируемой жидкости. Обзор работ, посвященных исследованию дробления струи, инжектируемой в поток жидкости, и механизма дробления капель представлен в [16].

В настоящей работе предложена теоретическая модель, описывающая встречнонаправленное движение частиц минерализованной воды при обтекании более крупной капли пресной воды и определяющая возможность их слияния с учетом замедления относительного движения капель пресной воды.

1. Основные допущения. Рассматривается движение в рабочей камере струйного гидравлического смесителя нефти и воды (рис. 1). Нефть, поступающая во входной патрубок смесителя, содержит примеси в виде минерализованных частиц. Чистая вода вводится в зону смешения струями, которые в дальнейшем распадаются на капли. При такой организации встречного движения капель пресной воды и минерализованных частиц происходит их слияние. Далее нефть с каплями воды, коагулированными с минерализованными частицами, поступает в узлы сепарации, например в электродегидраторы.

Будем полагать, что капли пресной воды и минерализованные частицы имеют шарообразную форму, а нефть представляет собой несжимаемую вязкую ньютоновскую жидкость.

Введем следующие обозначения: R , \mathbf{v}_w — радиус и вектор скорости капли пресной воды; a , \mathbf{v}_p — радиус и вектор скорости минерализованной частицы; индекс w соответствует пресной воде, индекс p — минерализованным частицам, индекс o — нефти.

Значения физических параметров нефти и промывной воды для рассматриваемых задач приняты на основе анализа данных испытаний струйного гидравлического смесителя на Ново-Суксинской установке подготовки высокосернистой нефти в ПАО «Татнефть» [17]: насыщенность нефти минерализованными частицами (водонасыщенность) $\alpha_p = 1\%$; плотность нефти $\rho_o = 890$ кг/м³; динамическая вязкость нефти и воды $\mu_o = 14 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $\mu_w = 10^{-3}$ Па·с; поверхностное натяжение на границе нефть — вода $\sigma = 29 \cdot 10^{-3}$ Н/м; температура нефти $T_o = 333$ К; объемные расходы нефти и воды $Q_o \approx 10^{-2}$ м³/с, $Q_w \approx 10^{-3}$ м³/с; объем зоны смешения $V \approx 0,06$ м³. Опытные данные также показывают, что в зоне смешения капли пресной воды движутся со скоростью $v_w = 3 \div 6$ м/с навстре-

чу потоку нефти, содержащему минерализованные частицы размером $a = 10^{-7} \div 10^{-6}$ м. Скорость течения нефти в этой зоне равна $v_o = 0,5 \div 2,0$ м/с.

Максимальный размер устойчивых к дроблению капель пресной воды, который может быть реализован в потоке нефти, зависит от многих факторов: скорости потока, величины поверхностного натяжения на границе раздела фаз, вязкости воды и нефти и т. д. Для определения максимального радиуса капель пресной воды $R^{(w)}$ обычно используется выражение [18]

$$R^{(w)}/R_j = C \operatorname{Re}_o^m \operatorname{We}_o^t, \quad (1)$$

где Re_o , We_o — числа Рейнольдса и Вебера:

$$\operatorname{Re}_o = \rho_o u_o^r R^{(w)} / \mu_o, \quad \operatorname{We}_o = \rho_o (u_o^r)^2 R^{(w)} / \sigma,$$

$C = 38$, $m = 0,5$, $t = -1,5$ — эмпирические параметры; $R_j = 2$ мм — радиус струи инжектируемой пресной воды; u_o^r — скорость капель пресной воды относительно нефти.

Из выражения (1) следует, что максимальный радиус капель пресной воды может достигать $R^{(w)} \approx 0,07$ мм.

Оценим значение коэффициента диффузии в зоне смешения по формуле Стокса — Эйнштейна [19]

$$D = kT_o / (6\pi\mu_w R^{(w)}) \approx 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с} \quad (2)$$

($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана). Тогда характерное время, за которое минерализованные частицы и капли пресной воды могут коагулировать (сливаться) вследствие диффузии, можно определить из выражения

$$\tau = a^2 / (\sqrt[3]{\alpha_p^2 D}) \approx 10^5 \text{ с.}$$

Из (2) следует, что значение коэффициента диффузии очень мало (как в случае твердых тел), поэтому характерное время диффузии имеет большое значение. Вследствие этого практически исключается вклад броуновского движения частиц в процесс коагуляции в зоне смешения. Таким образом, основным механизмом “вымывания” минерализованных частиц из нефти является налипание этих частиц на поверхность капель инжектируемой пресной воды при встречном движении этих капель и последующее удаление из смеси коагулированных капель пресной воды с минерализованными частицами.

Определим число Рейнольдса при обтекании капли пресной воды потоком нефти:

$$\operatorname{Re} = 2\rho_o R^{(w)} u_o^r / \mu_o \approx 50.$$

Таким образом, $\operatorname{Re} \gg 1$, следовательно, поле скоростей нефти в лобовой зоне капли пресной воды близко к потенциальному [19].

Заметим, что объемная доля капель пресной воды при известных параметрах камеры и расходах нефти и воды составляет приблизительно 10 %. Используя ячеистую схему [20], можно показать, что для технологических параметров, приведенных выше, расстояния между каплями пресной воды более чем в три раза превышают диаметр этих капель, поэтому их взаимным влиянием можно пренебречь.

2. Математическая модель. Рассмотрим нестационарное движение капли пресной воды в нефти. Уравнение движения этой капли радиусом R , которую будем называть центральной каплей, в системе отсчета, связанной с потоком нефти, которую считаем инерциальной, запишем в виде [21]

$$m_w \frac{dv_w}{dt} = -\xi\pi R^2 \frac{\rho_o}{2} v_w^2 - \frac{V_w}{2} \rho_o \frac{dv_w}{dt}, \quad \frac{dl_w}{dt} = v_w, \quad (3)$$

где $m_w = V_w \rho_w$; $V_w = 4\pi R^3/3$; $\xi = 12(1 + 0,0811 \text{Re}^{0,879})/\text{Re}$; $\text{Re} = 2Rv_w \rho_o/\mu_o$; l_w — перемещение центральной капли в потоке нефти.

С использованием уравнения (3) можно определить характерное перемещение, при котором относительная скорость капель пресной воды уменьшается до нуля, т. е. приобретает скорость, равную скорости потока нефти. В течение этого периода происходит захват минерализованных частиц центральными каплями пресной воды.

Для описания течения нефти относительно капли пресной воды, а также для определения траектории минерализованных частиц выберем прямоугольную систему координат, в которой направление оси Ox совпадает с направлением вектора скорости капли пресной воды \mathbf{v}_w , оси Oy и Oz перпендикулярны оси Ox . Кроме того, положим, что начало координат совпадает с центром капли пресной воды. Полагая картину течения относительно этой капли осесимметричной, достаточно рассмотреть ее на плоскости, проходящей через оси Ox и Oy .

Примем, что минерализованные частицы улавливаются каплями пресной воды, когда расстояние между центром частицы и поверхностью капли пресной воды становится меньше ее радиуса ($r_{(wp)} < a$). Для более точного описания процесса захвата минерализованных частиц каплями пресной воды необходимо корректное описание поля течения нефти вблизи лобовой зоны центральной капли.

Будем полагать, что захват минерализованных частиц происходит на этапе движения пресной капли в потоке нефти при больших числах Рейнольдса. Поэтому поле скоростей в лобовой зоне описывается потенциальным течением, соответствующим обтеканию капли пресной воды потоком идеальной жидкости. Следовательно, для потенциала скорости нефти при нестационарном движении центральной капли можно записать [22]

$$\varphi_o = -v_w \left(r + \frac{R^3}{2r^2} \right) \cos \theta, \quad (4)$$

где v_w определяется из уравнения (3); $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; $\cos \theta = x/r$ ($r \geq R$).

Для поля скорости нефти, инициирующего движение центральной капли, имеем [21, 22]

$$\mathbf{v}_o = \text{grad } \varphi_o. \quad (5)$$

Подставляя вместо φ_o выражение (4) для составляющих скорости, получаем

$$v_{ox} = -v_w \left(1 + \frac{R^3}{2r^3} (1 - 3 \sin^2 \theta) \right), \quad v_{oy} = \frac{3}{2} v_w \frac{R^3}{r^3} \cos \theta \sin \theta. \quad (6)$$

Траектории частиц несущей фазы (нефти) относительно центральной капли описываются системой обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{dx_o}{dt} = v_{ox}, \quad \frac{dy_o}{dt} = v_{oy},$$

где правые части определяются выражениями (5), (6) при соответствующей подстановке $x = x_o$, $y = y_o$.

Поле давления в окрестности центральной капли определяется с помощью интеграла Коши — Лагранжа [22], который с учетом переменной скорости имеет вид

$$p = p_\infty - \rho_o \frac{\partial \varphi_o}{\partial t} - \rho_o \frac{dv_w}{dt} x - \rho_o \frac{(\text{grad } \varphi_o)^2}{2} \quad (7)$$

(p_∞ — давление вдали от капли).

Уравнение движения минерализованной частицы в несжимаемой вязкой жидкости при обтекании капли пресной воды в системе отсчета, связанной с каплей пресной воды, с учетом ее неинерциальности записывается в виде [21]

$$m_p \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = -V_p \text{grad } p + 6\pi\mu_o a(\mathbf{v}_o - \mathbf{v}_p) + \frac{V_p\rho_o}{2} \left(\frac{d\mathbf{v}_o}{dt} - \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} \right) - m_p \frac{d\mathbf{v}_w}{dt},$$

$$\frac{d\mathbf{v}_o}{dt} = \frac{\partial\mathbf{v}_o}{\partial t} + v_{ox} \frac{\partial\mathbf{v}_o}{\partial x} + v_{oy} \frac{\partial\mathbf{v}_o}{\partial y}, \quad \frac{d\mathbf{r}_p}{dt} = \mathbf{v}_p,$$

где $V_p = 4\pi a^3/3$; $m_p = V_p\rho_w$; $\mathbf{v}_p = v_{px}\mathbf{i} + v_{py}\mathbf{j}$; $\mathbf{r}_p = x_p\mathbf{i} + y_p\mathbf{j}$.

Таким образом, для решения задачи о движении частиц минерализованной воды при обтекании более крупной капли пресной воды и захвата каплей пресной воды движущихся в нефти минерализованных частиц необходимо определить законы движения частиц в потоке нефти в зависимости от их начального положения относительно капли пресной воды. При этом область возможных начальных положений минерализованных частиц, когда траектории, исходящие из точек, соответствующих этим положениям, приближаются к поверхности центральной капли на расстояния, не превышающие радиуса частиц, определяет зону в потоке нефти, которая может быть очищена одной каплей пресной воды. Эта зона представляет собой осесимметричный объем, протяженность которого составляет величину порядка l_w , являющуюся характерным перемещением капли пресной воды в потоке нефти.

Таким образом, рассматриваемая задача определения объема нефти, очищаемой одной каплей пресной воды, сводится к решению серии задач Коши для уравнения (7) совместно с уравнением (2) при следующих начальных условиях ($t = 0$):

$$v_w = v_{w(0)}, \quad l_w = 0, \quad x_p = x(0), \quad y_p = y(0),$$

$$v_{px} = v_{ox}(0, x(0), y(0)), \quad v_{py} = v_{oy}(0, x(0), y(0)).$$

Определяемый объем является объемом тела вращения, образованного вращением вокруг оси Ox кривой, представляющей собой границу области начальных положений $(x(0), y(0))$, для которых траектории частиц приближаются к поверхности капли на расстояние, не превышающее их радиуса. Основанием этого тела вращения является полусфера радиусом $R + a$.

3. Результаты расчетов. На рис. 2 представлены закон движения капли пресной воды $l_w = l_w(t)$ и закон изменения ее скорости в зависимости от относительного перемещения при различных значениях начальной скорости $v_{w(0)}$. Из рис. 2, а следует, что время, за

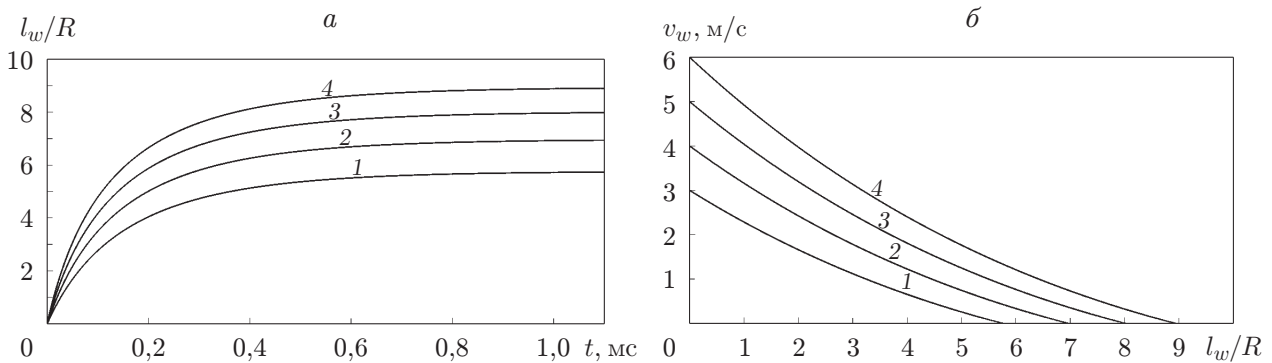


Рис. 2. Законы движения капли пресной воды радиусом $R = 0,07$ мм (а) и изменения ее скорости (б) при различных значениях начальной скорости капли: 1 — $v_{w(0)} = 3$ м/с, 2 — $v_{w(0)} = 4$ м/с, 3 — $v_{w(0)} = 5$ м/с, 4 — $v_{w(0)} = 6$ м/с

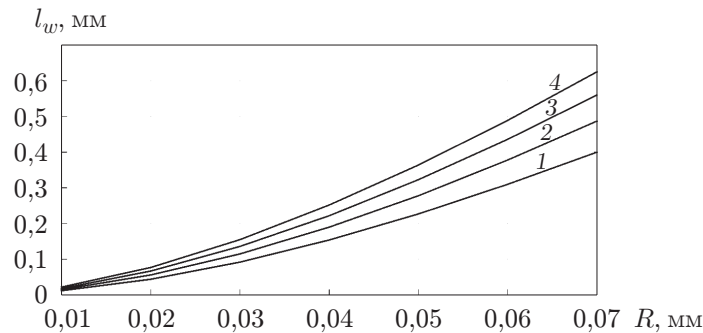


Рис. 3. Зависимость длины пробега пресной капли от ее радиуса при различных значениях начальной скорости:

1 — $v_{w(0)} = 3$ м/с, 2 — $v_{w(0)} = 4$ м/с, 3 — $v_{w(0)} = 5$ м/с, 4 — $v_{w(0)} = 6$ м/с

которое происходит максимальное перемещение капли пресной воды относительно нефти (длина пробега), практически не зависит от ее начальной скорости $v_{w(0)}$. Для параметров, соответствующих рис. 2, а, это время составляет приблизительно 1 мс.

Из рис. 2 также следует, что увеличение начальной скорости приводит к увеличению длины пробега капли l_w по нелинейному закону. При $v_{w(0)} = 3$ м/с величина пробега составляет $l_w = 0,4$ мм, что приблизительно в шесть раз больше радиуса капли пресной воды. При $v_{w(0)} = 6$ м/с величина пробега увеличивается до значения $l_w = 0,65$ мм, т. е. перемещение капли пресной воды относительно нефти составляет порядка девяти радиусов этой капли.

На рис. 3 показана зависимость длины пробега пресной капли $l_w^{(m)}$ от ее радиуса при различных значениях начальной скорости $v_{w(0)}$ этой капли. Видно, что с увеличением радиуса капли величина $l_w^{(m)}$ также увеличивается, причем нелинейно. При увеличении радиуса капли в два раза длина пробега увеличивается более чем в два раза. Так, при одинаковой начальной скорости $v_{w(0)} = 5$ м/с капля радиусом $R = 0,01$ мм перемещается относительно нефти на расстояние, приблизительно равное ее радиусу, а для капли радиусом $R = 0,06$ мм с такой же начальной скоростью перемещение увеличивается в семь раз.

На рис. 4 представлены траектории частиц и нефти относительно капли пресной воды, исходящие из точек, соответствующих различным положениям. Жирная линия $y = f(x)$ представляет собой огибающую начальных положений частиц, приближающихся к поверхности капли на расстояния, не превышающие их радиуса a .

Определим объем нефти $V_o^{(w)}$, очищаемой одной каплей пресной воды. Этот объем равен объему тела вращения вокруг оси Ox , образованного огибающей линией, показанной на рис. 4:

$$V_o^{(w)} = \pi \int_0^{x'} f^2(x) dx - \pi \frac{(R+a)^3}{2} \quad (x' \geq l_w^{(m)}).$$

Соответствующая безразмерная величина характерного объема нефти $\bar{V}_o^{(w)}$, очищаемой одной каплей, равна

$$\bar{V}_o^{(w)} = \frac{V_o^{(w)}}{V_w} = \frac{3}{4R^3} \left(\int_0^{x'} f^2(x) dx - \frac{(R+a)^3}{2} \right).$$

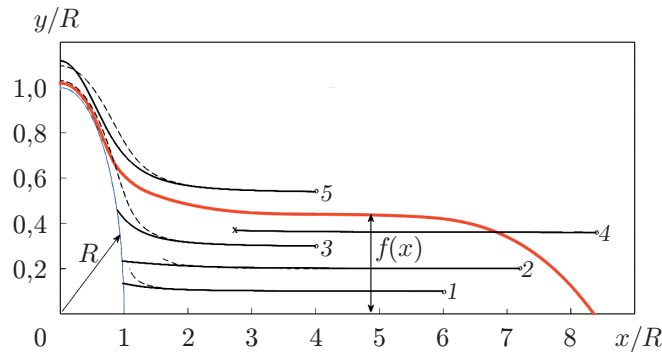


Рис. 4. Траектории минерализованных частиц (сплошные линии) и нефти (штриховые линии) в окрестности пресной капли радиусом $R = 0,05$ мм при начальной скорости $v_{w(0)} = 4$ м/с:

1–3 — траектории достигающих границы пресной капли частиц, исходящие из точек, соответствующих различным начальным положениям, 4 — траектории частиц, не достигших границы пресной капли, 5 — траектории частиц, обтекающих пресную каплю, жирная линия — огибающая семейства предельных траекторий минерализованных частиц, улавливаемых каплями пресной воды, тонкая линия — граница пресной капли

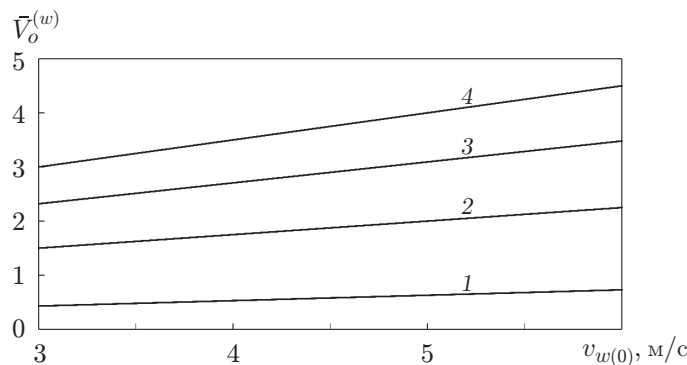


Рис. 5. Зависимость характерного объема нефти $\bar{V}_o^{(w)}$ от начальной скорости $v_{w(0)}$ пресной капли при различных значениях ее радиуса:

1 — $R = 0,01$ мм, 2 — $R = 0,03$ мм, 3 — $R = 0,05$ мм, 4 — $R = 0,07$ мм

На рис. 5 представлена зависимость безразмерного объема нефти $\bar{V}_o^{(w)}$, очищаемой одной каплей пресной воды, от начальной скорости движения $v_{w(0)}$. Из рис. 5 следует, что параметр $\bar{V}_o^{(w)}$ увеличивается с увеличением начальной скорости и радиуса капли пресной воды. Также видно, что при одинаковых начальных скоростях $v_{w(0)}$ увеличение радиуса капли пресной воды (w) в семь раз (от 0,01 до 0,07 мм) приводит к увеличению объема очищаемой нефти также приблизительно в семь раз. Кроме того, из рис. 5 следует, что для рассматриваемых размеров капель пресной воды при увеличении начальной скорости капли в два раза происходит увеличение объема очищаемой нефти в 1,5 раза. Например, капля пресной воды радиусом $R = 0,05$ мм при $v_{w(0)} = 3$ м/с очищает 2,3 своего объема, а при скорости $v_{w(0)} = 6$ м/с эта величина составляет приблизительно 3,5.

Заключение. Разработана математическая модель движения капель минерализованной воды в нефти при обтекании более крупной капли пресной воды и рассмотрена воз-

возможность их коагуляции (слияния) с учетом нестационарности движения капли пресной воды. Установлена прямая линейная зависимость объема нефти, очищаемой одной каплей пресной воды, от размера этой капли.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Юшков И. Р.** Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений: Учеб.-метод. пособие / И. Р. Юшков, Г. П. Хижняк, П. Ю. Илюшин. Пермь: Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, 2013.
2. **Волков А. А., Балашова В. Д., Коновальчук О. Ю.** К вопросу разрушения стабильных водонефтяных эмульсий // Нефтепромысловое дело. 2013. № 5. С. 40–42.
3. **Дытнерский Ю. И.** Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Альянс, 2010.
4. **Галиакбарова Э. В., Бахтизин Р. Н., Галиакбаров В. Ф.** Использование струйных гидравлических смесителей для интенсификации процессов подготовки нефти к переработке // Нефтегазовое дело. 2016. № 14-1. С. 145–149.
5. **Пат. 2178449 РФ, МПК С 10 G 33/04, С 10 G 33/06.** Состав для обезвоживания и обессоливания нефти и способ его применения в устройстве для разрушения водонефтяных эмульсий / В. Ф. Галиакбаров, М. Ф. Галиакбаров, И. Ф. Лопатин, А. Ю. Хмельник, В. С. Безмельницын, А. Ю. Шильников, Л. П. Максимчик. Заявл. 07.08.2000; Оpubл. 20.01.2002, Бюл. № 2.
6. **Пат. 2600998 РФ, МПК В 01 F 5/00.** Струйный гидравлический смеситель / В. Ф. Галиакбаров, Э. В. Галиакбарова, Б. А. Яхин. Заявл. 25.08.2015; Оpubл. 27.10.2016, Бюл. № 30.
7. **Пат. 159236 РФ, МПК В 01 F 5/00 3/08.** Струйный гидравлический смеситель / В. Ф. Галиакбаров, Э. В. Галиакбарова, Б. А. Яхин. Заявл. 25.08.2015; Оpubл. 10.02.2016, Бюл. № 4.
8. **Пат. 169527 РФ, МПК В 01 F 3/08 5/06.** Струйный гидравлический смеситель / В. Ф. Галиакбаров, Э. В. Галиакбарова, К. М. Мустафин. Заявл. 4.10.2016; Оpubл. 22.03.2017, Бюл. № 9.
9. **Пат. 171985 РФ, МПК В 01 F 5/00.** Поточный струйный смеситель / В. Ф. Галиакбаров, Э. В. Галиакбарова, К. М. Мустафин. Заявл. 15.11.2016; Оpubл. 23.06.2017, Бюл. № 18.
10. **Пат. 176187 РФ, МПК В 01 F 5/00.** Струйный гидравлический смеситель / Э. В. Галиакбарова, В. Ф. Галиакбаров. Заявл. 6.04.2017; Оpubл. 11.01.2018, Бюл. № 1.
11. **Ушева Н. В., Кравцов А. В., Мойзес О. Е., Кузьменко Е. А.** Моделирование технологии промышленной подготовки нефти // Изв. Том. политехн. ун-та. 2005. Т. 308, № 4. С. 127–130.
12. **Швецов В. Н., Кабиров И. И.** Обессоливание нефти с электрической пульверизацией промывочной воды // Химия и технология топлив и масел. 1992. № 6. С. 16–18.
13. **Kiani H., Moradi S., Soltani Soulgani B., Mousavian S.** Study of a crude oil desalting plant of the national Iranian south oil company in gachsaran by using artificial neural networks // Intern. J. Environment. Ecol. Engng. 2013. V. 7, N 12. P. 1015–1018.
14. **Pruneda E. F., Escobedo E. R. B., Vázquez F. J. G.** Optimum temperature in the electrostatic desalting of Maya crude oil // J. Mex. Chem. Soc. 2005. V. 49, N 1. P. 14–19.
15. **Eastwood C. D., Armi L., Lasheras J. C.** The breakup of immiscible fluids in turbulent flows // J. Fluid Mech. 2004. V. 502. P. 309–333.
16. **Eggers J., Villermaux E.** Physics of liquid jets // Rep. Progr. Phys. 2008. V. 71. 036601.
17. **Сидоров Г. М., Яхин Б. А., Ахметов Р. Ф.** Моделирование работы статического смесителя (нефть — вода) для обессоливания нефти и опытно-промышленное испытание // Успехи соврем. естествознания. 2017. № 2. С. 152–156.

18. **Тарасевич С. Э., Яковлев А. Б.** Средний диаметр капель, образующихся при распаде жидких струй и пленок (обзор) // Изв. вузов. Авиационная техника. 2004. № 4. С. 52–57.
19. **Левич В. Г.** Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959.
20. **Нигматулин Р. И.** Механика сплошной среды. Кинематика. Динамика. Термодинамика. Статистическая динамика. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2014.
21. **Нигматулин Р. И.** Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Ч. 1.
22. **Седов Л. И.** Механика сплошной среды. М.: Наука, 1970. Т. 2.

*Поступила в редакцию 24/X 2018 г.,
после доработки — 11/III 2019 г.
Принята к публикации 25/III 2019 г.*
