

УДК 628.334.5.336.43

Урмитова Н.С. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: urmitova@mail.ru

Абитов Р.Н. – кандидат педагогических наук, доцент

E-mail: a_runar@mail.ru

Хисамеева Л.Р. – доцент

E-mail: KhisameevaLiliya@mail.ru

Низамова А.Х. – старший преподаватель

E-mail: Anizamova@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Математическое моделирование процессов коалесценции капель нефти в коалесцирующих насадках с крупнозернистой загрузкой

Аннотация

В данной статье математически поставлены и решены задачи по моделированию процесса коалесценции капель нефти в крупнозернистых коалесцирующих загрузках.

При движении нефтесодержащих сточных вод через крупнозернистую коалесцирующую загрузку снизу вверх в нижних слоях загрузки происходит разрушение бронирующих оболочек на глобулах эмульгированной нефти и дробление капель. Для количественной оценки процесса коалесценции капель нефти в крупнозернистой загрузке рассматривается теоретическая модель столкновения капель нефти в турбулентном потоке.

В коалесцирующем фильтре с крупнозернистой загрузкой некоторые доли потока могут задерживаться в аппарате, а другие наоборот проскакивать, что непосредственно связано со временем контакта капель нефти и, следовательно, с процессом их укрупнения.

На выходе из загрузки имеет место полидисперсная система. В результате обработки опытных данных были построены гистограммы дифференциальных функций распределения капель нефти по крупности в эмульсии до загрузки и после загрузки.

Оптимальные значения коэффициента эффективности столкновений и числа ячеек идеального перемешивания в дифференциальной функции распределения капель нефти по крупности для полидисперсной системы на выходе из загрузки фильтра, определялись по величине суммы квадратов, разницей между теоретической и экспериментальной кривых.

Ключевые слова: моделирование, коалесцирующая насадка, бронирующие оболочки, нефтяные частицы, оценка сил, набегающий поток жидкости, дробление и коалесценция, адсорбционные слои, гранулы, турбулентный режим, полидисперсная система.

При фильтрации нефтесодержащей сточной воды (НСВ) через коалесцирующую насадку из гранулированной крупнозернистой загрузки в фильтрационном потоке наблюдаются различного рода деформации поля скоростей, образование проточных и непроточных зон завихрения и вторичных течений, диссипативные процессы, а действия сил инерции приводят к дополнительным потерям энергии [1]. В случае создания благоприятного режима фильтрации указанные обстоятельства могут быть реализованы в процессах укрупнения нефтяных частиц, эмульгированных в НСВ. В гидродинамических насадках частицы нефти под действием энергии турбулентных пульсаций фильтрационного потока контактируют друг с другом, сливаются и из насадки выходят более крупными [2, 3].

При движении НСВ через крупнозернистую коалесцирующую загрузку снизу вверх в нижних слоях загрузки происходит разрушение бронирующих оболочек на глобулах эмульгированной нефти и дробление капель. Эти процессы являются следствием лобового соударения глобулы нефти с гранулой загрузки, а также наличием сдвиговых напряжений, обусловленных градиентами скорости. Укрупнение образовавшихся капель с так называемой «свежей поверхностью» происходит в поровых каналах и вихревых зонах под действием турбулентных пульсаций скорости. В турбулентном потоке величины пульсационных скоростей и масштабы турбулентных пульсаций изменяются в

широких пределах от макро- до микромасштабных. Максимальным значением пульсационных скоростей в потоке отвечает и максимальный масштаб пульсаций $\lambda=l$, определяемый размером области, в которой происходит течение. Они являются носителями основной части кинетической энергии турбулентного потока в процессах укрупнения капель нефти участия не принимают, а только переносят капли из одного положения в другое, как как диаметры исходных капель эмульгированной нефти составляют $d_k^0 \approx 10$ мкм [3, 4].

Внутренний масштаб турбулентности λ_0 [2] при интенсивном перемешивании жидкости ($Re > 1000$) имеет порядок $10 \div 100$ мкм, следовательно, процесс коалесценции капель будет происходить в области малых масштабов ($\lambda_0 < \lambda < l$), для которых в потоках с градиентом скорости соблюдаются условия однородности и изотропности [3] и величина пульсационной составляющей скорости v'_λ определяется из соотношения:

$$v'_\lambda \approx (\varepsilon_0 \lambda)^{1/3}, \quad (1)$$

где ε_0 – удельная величина диссипации энергии в турбулентном потоке.

Для количественной оценки процесса коалесценции капель нефти в крупнозернистой загрузке рассматривается теоретическая модель столкновения капель в турбулентном потоке с учетом следующих предположений [2, 3]:

- имеет место полное увлечение капель нефти турбулентными пульсациями того масштаба, который играет основную роль в механизме столкновения капель;
- вокруг каждой капли существует сферическая поверхность $R_c = 1,5d_k$, при попадании в которую всякая другая капля обязательно столкнется и сольется с выделенной каплей;
- радиус сферы R_c весьма мал по сравнению с масштабом турбулентности λ .

Если имеется поглощающая сфера, концентрация капель на которой равна нулю, вблизи ее возникает градиент концентрации капель и соответствующий ему диффузионный поток, равный среднему числу капель n , пересекающих эту поверхность вследствие турбулентного движения, распределение которых характеризуется диффузионным уравнением [2, 3]:

$$\text{div} (D_{\text{турб}} \cdot \text{grad } n) = 0, \quad (2)$$

где $D_{\text{турб}}$ – коэффициент турбулентной диффузии, зависящий от масштаба пульсаций и изменяющийся от точки к точке; n – число капель в единице объема. Граничные условия для уравнения (2) следующие:

$$\text{при } r = R_c \ n = 0; \quad \text{а при } r \rightarrow \infty \ n = n_0. \quad (3)$$

Коэффициент турбулентной диффузии для случая однородной изотропной турбулентности находится из теории размерности [3] при $\lambda > \lambda_0$:

$$D_{\text{турб}} \approx v'_\lambda \cdot \lambda \approx (\varepsilon_0 \lambda)^{1/3} \lambda. \quad (4)$$

Полагая, что перенос дисперсной фазы к фиксированной капле осуществляется пульсациями, масштаб которых сопоставим с расстоянием между сталкивающимися каплями r , можно записать:

$$D_{\text{турб}} \approx (\varepsilon_0 r)^{1/3} r. \quad (5)$$

В результате решения уравнения (2) с учетом (5) и граничных условий (3) получим:

$$n = n_0 \left[1 - \left(\frac{R_c}{r} \right)^{7/3} \right]. \quad (6)$$

Поток j капель на 1 см^2 поверхности сферы $r = R_c$ определится из соотношения:

$$j = D_{\text{турб}} \cdot \left(\frac{dn}{dr} \right) \cdot r \rightarrow R_c. \quad (7)$$

Полное число актов эффективной коалесценции в единицу времени, обусловленных турбулентным перемешиванием, или скорость коалесценции будет равна:

$$N = j \cdot \pi \cdot R_c^2 \cdot \theta \cdot n_0, \quad (8)$$

где θ – коэффициент эффективности столкновения капель.

Связь между числом капель в единице объема и объемным содержанием дисперсной фазы определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{\pi d_k^3}{6} \cdot n = \frac{\pi (d_k^0)^2}{6} n_0. \quad (9)$$

Тогда учитывая эту связь скорость коалесценции или уменьшение числа капель во времени определяется из соотношения:

$$\frac{dn}{dr} = -125 \varphi^{\frac{7}{9}} \cdot \varepsilon_0^{\frac{1}{3}} \cdot \theta. \quad (10)$$

Решая уравнение (10) с учетом (9) и граничных условий: при $\tau = 0$; $n = n_0$, определяется время τ , необходимое для укрупнения капель нефти от d_k^0 до d_k :

$$\tau = 0,068 \frac{d_k^{\frac{2}{3}} - (d_k^0)^{\frac{2}{3}}}{\varphi^{\frac{5}{9}} \cdot \varepsilon_0^{\frac{1}{3}} \cdot \theta}. \quad (11)$$

Соотношение (11) справедливо для процесса укрупнения капель при одинаковом времени пребывания их в потоке.

На практике в фильтре с крупнозернистой загрузкой некоторые доли потока могут задерживаться в аппарате, а другие наоборот проскакивать, что непосредственно связано со временем контакта капель нефти и, следовательно, с процессом их укрупнения. Учитывая это обстоятельство, на выходе из загрузки фильтра будет иметь место полидисперсная система, распределение по крупности капель в которой будет зависеть от гидродинамических свойств фильтра [5].

Основываясь на физическом представлении движения жидкости в загрузке фильтра, можно представить объем загрузки как некоторое количество m ячеек идеального перемешивания. Дифференциальная функция распределения времени пребывания жидкости в этом объеме $c(\tau)$ запишется в виде [6]:

$$c(\tau) = \frac{Q_0}{W} \cdot \frac{m^m}{(m-1)!} \cdot \left(\frac{Q_0}{W}\tau\right)^{m-1} \cdot e^{-\frac{mQ_0}{W}\tau}, \quad (12)$$

где Q_0 – начальный расход жидкости, W – объем одной ячейки, m – количество ячеек, τ – время пребывания жидкости в объеме загрузки фильтра.

Дифференциальная функция $c(d_k)$ распределения капель нефти по крупности для полидисперсной системы на выходе из загрузки фильтра имеет вид [7]:

$$c(d_k) = c[\tau = f(d_k)] \cdot \frac{d\tau}{d(d_k)}. \quad (13)$$

С учетом (11) и (12) уравнение (13) имеет вид:

$$c(d_k) = \frac{0,045}{\varphi^{\frac{5}{9}} \cdot \varepsilon_0^{\frac{1}{3}} \cdot d_0^{\frac{1}{3}} \cdot \theta} \cdot \frac{Q_0}{W} \cdot \frac{m^m}{(m-1)!} \cdot \left(\frac{Q_0}{W} \cdot \tau\right)^{m-1} \cdot e^{-\frac{mQ_0}{W}\tau}, \quad (14)$$

где τ – определяется из уравнения (11).

Проверка и подтверждение результатов теоретического исследования процесса коалесценции капель нефти в загрузке фильтра проводилась на экспериментальной установке, которая состояла из фильтра с коалесцирующей загрузкой слоем 0,8 м, фракции 10-15 мм, узла подготовки и подачи НСВ, узла анализа дисперсного состава нефти в воде [3, 8].

Исследования проводились для следующих исходных данных: плотность исходной воды $\rho = 0,998$ г/см³; концентрация эмульгированной нефти в исходной воде $\varphi = 209$ и 512 мг/л, скорость фильтрования $U = 100$ м/ч.

В результате количественной обработки данных опытов были построены гистограммы дифференциальных функций распределения капель нефти по крупности в эмульсии до загрузки (кривая 1) и после загрузки (кривая 2), представленные на рис. 1-2 [3, 8].

На рис. 1-2 пунктирными линиями нанесены гистограммы распределения по крупности капель нефти, построенные по уравнению (14).

Оптимальные значения коэффициента эффективности столкновений и числа ячеек m идеального перемешивания в уравнении (14) определялись по величине суммы квадратов, разностей между теоретической кривой и экспериментальной. Расчеты показали, что для данных условий работы фильтра оптимальными являются $\theta = 0,0003$ и $m = 4$.

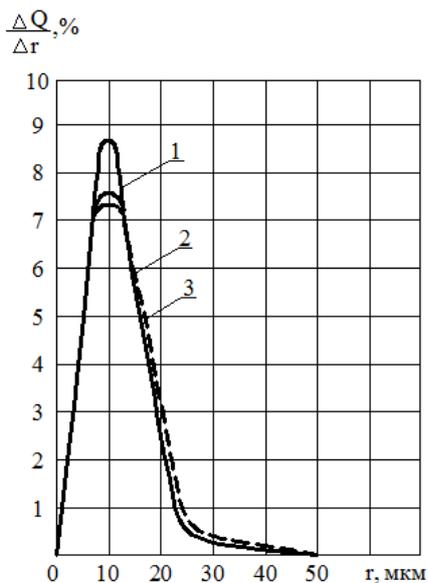


Рис. 1

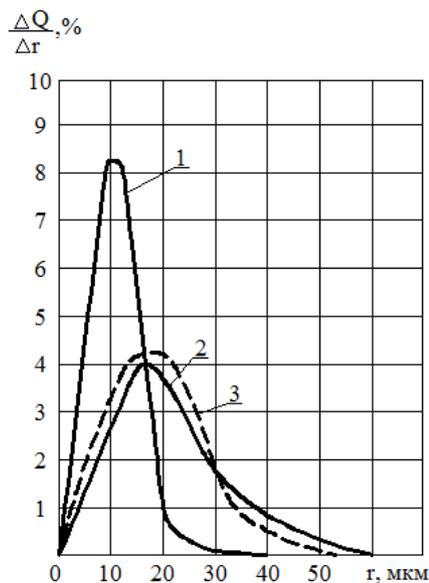


Рис. 2

Полученную математическую модель, очевидно, можно применить для проведения качественных расчетов или же для изучения модельных задач, то есть в случае небольшого количества типа частиц (и, следовательно, уравнений) путем вычислительного эксперимента можно выявить закономерности взаимовлияния различных технологических параметров. Далее с учетом полученных результатов, но на основе более простых математических моделей, разрабатывается методика инженерного расчета коалесцирующих насадок.

Список библиографических ссылок

1. Адельшин А.Б., Потехин Н.И. Математическое моделирование процессов коалесценции капель нефти в насадках с крупнозернистой загрузкой. Гидромеханика отопительно-вентиляционных устройств: Межвуз. сб. науч. трудов. – Казань. 1993. – С. 51-56.
2. Урмитова Н.С., Абитов Р.Н., Хисамеева Л.Р., Низамова А.Х. Оценка сил, способствующих разрушению частиц нефти в коалесцирующей насадке // Известия КГАСУ, 2015, № 2 (32). – С. 226-230.
3. Адельшин А.Б., Урмитова Н.С. Использование гидродинамических насадок с крупнозернистой загрузкой для интенсификации очистки нефтесодержащих сточных вод. Монография. – Казань: КГАСУ, 1997. – 249 с.
4. Адельшин А.А., Адельшин А.Б., Урмитова Н.С. Гидродинамическая очистка нефтепромысловых сточных вод на основе применения закрученных потоков: Монография. – Казань: КГАСУ, 2011. – 245 с.
5. Адельшин А.А., Адельшин А.Б., Урмитова Н.С. установки очисток нефтепромысловых сточных вод на основе применении закрученных потоков. Учебное пособие. – Казань: КГАСУ, 2010. – 92 с.
6. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химической технологии. – М.: Химия, 1985. – 448 с.
7. Корн Г. и Корн Т. Справочник по математике. – М. Наука, 1987. – 832 с.
8. Урмитова Н.С. Интенсификация процессов очистки нефтесодержащих сточных вод на основе применения гранулированных коалесцирующих материалов. Дис...канд. техн. наук. – Казань: КИСИ, 1993. – 252 с.

Urmitova N.S. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: urmitova@mail.ru

Abitov R.N. – candidate of pedagogic sciences, associate professor

E-mail: a_runar@mail.ru

Khisameeva L.R. – associate professor

E-mail: KhisameevaLiliya@mail.ru

Nizamova A.Kh. – senior teacher

E-mail: Anizamova@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Mathematical modeling of coalescence of oil drops coalescing into a nozzle with a coarse-grained load

Resume

In this article problems of modeling the process of oil droplets coalescence in coarse-grained coalescing loads are mathematically posed and solved.

When moving upwards oily wastewater through a coarse coalescing load the armoring shells destruction on the globules of emulsified oil and drops fragmentation are taking place in the lower layers of the load. To quantify the coalescence of oil droplets in the coarse-grained load a theoretical model of the oil droplets collision in a turbulent flow is considered.

In the coalescing filter with the coarse-grained load some flow fractions may be retained in the machine, while others conversely slip, which is directly related to the time of contact of oil droplets and, hence, the process of their enlargement.

There is polydisperse system on the outlet of the load. The processing of the experimental data resulted in plotting histograms of the differential distribution functions of the oil droplets size in the emulsion before and after the load.

Optimal values of the collision efficiency coefficient, and the number of ideal mixing cells in the differential distribution function of the oil droplets size for a polydisperse system at the outlet of the filter's load were determined from the sum of squares of the difference between the theoretical and experimental curves.

Keywords: modeling, coalescing nozzle, armoring shells, oil particles, evaluation of forces, the incoming flow of liquid, fragmentation and coalescence, adsorption layers, granules, turbulent regime, polydisperse system.

Reference list

1. Adelshin A.B., Potekhin N.I. Mathematical modeling of the oil droplets coalescence processes in the nozzles with a coarse load. Hydromechanics of the heating and ventilation systems: Interuniversity proc. – Kazan, 1993. – P. 51-56.
2. Urmitova N.S., Abitov R.N., Khisameeva L.R., Nizamova A.Kh. Evaluation of the forces contributing to the oil particles destruction in a coalescing nozzle // Izvestiya KGASU, 2015, № 2 (32). – P. 226-230.
3. Adelshin A.B., Urmitova N.S. Using of a hydrodynamic nozzle with a coarse load for oily wastewater treatment intensification. Monograph. – Kazan: KGASU, 1997. – 249 p.
4. Adelshin A.A., Adelshin A.B., Urmitova N.S. Hydrodynamic cleaning of oilfield wastewater by applying swirling flows. Monograph. – Kazan: KGASU, 2011. – 245 p.
5. Adelshin A.A., Adelshin A.B., Urmitova N.S. Oilfield wastewater treatment facilities based on the swirling flows' application. Study guide. – Kazan: KGASU, 2010. – 92 p.
6. Kafarov V.V. Cybernetics methods in a chemical technology. – M.: Chemistry, 1985. – 448 p.
7. Korn G., Korn T. Mathematical handbook. – M.: Nauka, 1987. – 832 p.
8. Urmitova N.S. Intensification of oily wastewater treatment by applying granular coalescing materials. Candidate of Engineering Sciences Thesis. – Kazan: KIEC, 1993. – 252 p.