

УДК 628.3.622.5

А.А. Адельшин – аспирант, инженер
А.Б. Адельшин – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
Кафедра водоснабжения и водоотведения
Р.И. Ибятов – доктор технических наук, профессор
Кафедра прикладной математики
Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОАЛЕСЦЕНЦИИ В ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ УСТАНОВКИ БГКО

АННОТАЦИЯ

В исследовании разработана установка типа БГКО (блок гидроциклон-цилиндрические камеры нижнего и верхнего сливов гидроциклона – отстойник) для очистки нефтепромысловых сточных вод. Получены дифференциальные функции распределения капель нефти по крупности на выходах из камер нижнего и верхнего сливов, а также на выходе из отстойника БГКО.

A.A. Adelshin – post-graduate student, engineer
A.B. Adelshin – doctor of technical sciences, professor, head of the department
Water Supply and Water-Drainage department
R.I. Ibjatov – doctor of technical sciences, professor
Applied Mathematic department
Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)

THE MODELING OF COALESCENCE PROCESSES IN INVOLUTES STREAMS OF BGKO PLANT

ABSTRACT

The BGKO-type plant (hydrocyclone-cylindrical chambers of lower and upper discharges hydrocyclonesedimentation tank) for oil-field wastewater purification is developed. The differential functions of oil drops distribution by size at exits of the lower and upper discharges as well as at the sedimentation tank output are obtained.

Анализ процессов очистки нефтепромысловых сточных вод (НСВ), осуществляемых на установках типа БГКО (блок гидроциклон-цилиндрические камеры нижнего и верхнего слива гидроциклона-отстойник), показывает, что в основе их лежит явление коалесценции капель нефти в турбулентном потоке [1, 2]. В теоретическом плане и в экспериментальных исследованиях не имеется конкретных, законченных решений и выводов, позволяющих расчетным путем количественные характеристики получить распределения капель нефти по крупности на выходе из каплеобразователей, в которых для интенсификации процессов коалесценции используется энергия закрученных потоков с учетом их гидродинамических свойств. Это объясняется сложностью и не изученностью всего многообразия гидродинамических явлений, происходящих в каплеобразователях такого плана. Вместе с тем имеющиеся данные по этим

вопросам могут быть использованы как основополагающие при составлении математических моделей процессов межкапельной коалесценции в условиях турбулентного течения эмульсии с учетом некоторых упрощений и допущений, не искажающих физической сущности рассматриваемых явлений [3-10].

На основе проведенных исследований нами разработаны различные конструктивные решения устройств (установок) типа БГКО для очистки НСВ, защищенные патентами РФ: №№ 2189360 от 20.09.2002 г., 2227791 от 23.04.2004 г., 2248327 от 20.03.2005 г., 2253623 от 10.06.2005 г., 2255903 от 10.07.2005 г., 2257352 от 27.07.2005 г., 2303002 от 20.07.2007 г.

Принципиальная схема конструкции БГКО представлена на рисунке.

Установка работает следующим образом. Исходная НСВ по трубопроводу 1 поступает в высокотурбулентном



Рис. Принципиальная схема конструкции БГКО

режиме (Re>10⁵) в гидроциклон 2, где осуществляется гидродинамическая обработка НСВ в поле центробежных сил, в результате чего разрушаются бронирующие оболочки; происходит дробление, укрупнение (коалесценция), уменьшение полидисперсности частиц нефти; разделение НСВ на два потока: поток, обогащенный нефтью из верхнего слива З' поступает в цилиндрическую камеру 3, поток из нижнего слива 4' поступает в цилиндрическую камеру 4. Потоки поступают в камеры 3 и 4 в виде закрученных струй, энергия которых используется для дальнейшей гидродинамической обработки HCB. Движение жидкости в камерах осуществляется в развитом, но более мягком турбулентном режиме $(\text{Re} = 1 \cdot 10^4 \div 1 \cdot 10^4)$, происходит дальнейшее укрупнение - коалесценция капель нефти. Объем отстойника 5 разделен перегородками на секции 9 и 10. Далее НСВ из камер 3 и 4 через распределители 6 и 7 поступают в верхнюю зону 16, секция 9 отстойника 5 в слой высококонцентрированной по нефти с умеренным перемешиванием содержимого. В зоне 16 происходит укрупнение капель нефти и ее отстаивание – расслоение НСВ на нефть и воду. Отстоявшаяся нефть поступает в нефтесборники 11 и 11', из которых удаляется по трубопроводам 12 и 12' для утилизации. Очищенная вода удаляется из секции 10 отстойника 5 через устройства 13 и 14. Нефтешлам накапливается на дне отстойника 5 и отводится через устройства 15.

Исследованиями для составления математического описания процесса коалесценции капель нефти в БГКО выделены в качестве физических моделей следующие [11]:

- гидроциклон-цилиндрическая камера нижнего слива гидроциклона;

 гидроциклон-цилиндрическая камера верхнего слива гидроциклона;

- гидроциклон-цилиндрические камеры нижнего и верхнего сливов гидроциклон-отстойник (БГКО) (см. рис.).

Целью математического моделирования является

получение дифференциальных функций распределения капель нефти по крупности на выходах из камер нижнего и верхнего сливов гидроциклона, а также на выходе из отстойника БГКО.

Эта цель достигается поэтапным решением двух задач:

1. Составление математических моделей процесса гидродинамики вышеуказанных физических моделей, что подробно изложено в [11].

2. Составление модели процесса коалесценции капель нефти в турбулентном потоке.

В соответствии с технологией процесса очистки НСВ описанного выше, жидкость в элементах БГКО движется в развитом турбулентном режиме течения при Re >> 10000. Такие течения жидкости характеризуются наложением на осредненный направленный поток случайных пульсаций скорости с переменным направлением и амплитудой.

Параметрами, определяющими пульсационное движение, являются пульсационная скорость 0, и масштаб пульсаций λ. Минимальным значениям пульсационных скоростей в потоке отвечает и максимальный масштаб пульсаций $\lambda = \mathbf{l}$, определяемый размерами области, в которой происходит течение. Так как диаметр исходных капель эмульгированной нефти, большая часть, не более d_к =10 мкм [12], а внутренний масштаб турбулентности при интенсивном перемешивании жидкости (Re > 10000) λ_0 имеет порядок 10÷ 100 мкм, следовательно, процесс коалесценции капель будет происходить в области малых масштабов ($\lambda_0 < \lambda < \mathbf{l}$), для которых в потоках с градиентом скорости соблюдаются условия однородности и изотропности [8, 10], и величина пульсационной составляющей скорости и, определяется из соотношения [8]:

$$\upsilon_{\lambda} \approx (\varepsilon_0 \cdot \lambda)^{1/3},$$
 (1)

где ε_0 – величина удельной диссипации энергии в турбулентном потоке.

Для качественной оценки процесса коалесценции капель нефти в вышеуказанных физических моделях рассматривается теоретическая модель столкновения капель в турбулентном потоке с учетом следующих предположений [13]:

 Имеет место полное увлечение капель нефти турбулентными пульсациями того масштаба, который играет основную роль в механизме столкновения капель;

2. Вокруг каждой капли существует сферическая поверхность $R_c = 1,5d_{\kappa}$, при попадании в которую всякая другая капля обязательно столкнется и сольется с выделенной каплей;

3. Радиус сферы $R_{_c}$ весьма мал по сравнению с масштабом турбулентности $\lambda.$

При наличии поглощающей сферы, концентрация



капель на поверхности которой равна нулю, вблизи неё возникает градиент концентрации капель и соответствующий ему диффузионный поток, равный среднему числу капель п, пересекающих эту поверхность вследствие турбулентного движения. Интенсивность потока описывается дифференциальным уравнением турбулентной диффузии, который носит название второго закона Фика [13]:

$$\frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\boldsymbol{\Pi}_{\mathrm{ryp6}} \cdot \operatorname{grad} \mathbf{n}), \qquad (2)$$

где Д_{турб} – коэффициент турбулентной диффузии, зависящий от масштаба пульсаций и изменяющийся от точки к точке;

n – число капель в единице объема.

Для установившегося процесса диффузии:

$$\frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \tau} = 0$$

Тогда в сферической системе координат (r, α , β), уравнение (2) записывается в виде:

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \left(\mathcal{A}_{\text{турб.}} \mathbf{r}^2 \sin \alpha \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \mathbf{r}} \right) + \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\mathcal{A}_{\text{турб.}} \mathbf{r} \sin \alpha \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \alpha} \right) + \frac{d}{d\beta} \left(\mathcal{A}_{\text{турб.}} \mathbf{r} \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \beta} \right) = 0$$

Диффузионный поток, направленный к поглощающей сфере, имеет симметрично относительно угловых координат α и β, поэтому

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} = 0, \ \frac{\partial}{\partial \beta} = 0$$

Тогда последнее уравнение упрощается

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\mathcal{I}_{\text{турб.}} r^2 \sin \alpha \, \frac{\partial n}{\partial r} \right) = 0 \qquad (3)$$

Уравнение (2) решается при следующих граничных условиях

при
$$\mathbf{r} = \mathbf{R}_{c}$$
: $\mathbf{n} = \mathbf{0}$, (4)
при $\mathbf{r} \to \infty$: $\mathbf{n} = \mathbf{n}_{o}$.

Однократное интегрирование уравнения (3) дает

$$\mathcal{I}_{\text{турб.}} \cdot r^2 \frac{\mathrm{dn}}{\mathrm{dr}} = \mathbf{A}_1 \tag{5}$$

Выражение коэффициента турбулентной диффузии для случая однородной изотропной турбулентности исходим из теории размерности при $\lambda > \lambda_0$ [3, 14]:

$$\boldsymbol{\boldsymbol{\boldsymbol{\mathcal{I}}}}_{\text{турб}} \approx \boldsymbol{\boldsymbol{\upsilon}}_{\boldsymbol{\lambda}}' \cdot \boldsymbol{\boldsymbol{\lambda}} \approx \left(\boldsymbol{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0} \cdot \boldsymbol{\boldsymbol{\lambda}}\right)^{1/3} \cdot \boldsymbol{\boldsymbol{\lambda}}$$

Полагая, что перенос дисперсной фазы к фиксированной капле осуществляется пульсациями,

масштаб которых сопоставим с расстоянием между сталкивающимися каплями г, можно записать:

$$\boldsymbol{\Pi}_{\text{турб}} \approx \left(\boldsymbol{\varepsilon}_0 \cdot \mathbf{r}\right)^{1/3} \cdot \mathbf{r} \,. \tag{6}$$

Преобразуем уравнение (5) с учетом (6)

$$\frac{\mathrm{dn}}{\mathrm{dr}} = \mathrm{A}_1 \, \varepsilon_0^{-1/3} \, \mathrm{r}^{-10/3}$$

Проинтегрируем последнее уравнение

$$\mathbf{n} = -\frac{3\mathbf{A}_1}{7\,\varepsilon_0^{1/3}\,\mathbf{r}^{7/3}} + \mathbf{A}_2. \tag{7}$$

Постоянные интегрирования A_1 и A_2 определяются из граничных условий (4). При бесконечном удалении от поглощающей сферы искомая концентрация равняется исходной концентрации, следовательно, $A_2 = n_0$. На поверхности сферы n = 0. Отсюда

$$\mathbf{A}_1 = \frac{7}{3} \mathbf{n}_0 \, \boldsymbol{\epsilon}_0^{1/3} \, \mathbf{R}_c^{7/3}.$$

Тогда

или

$$n = -n_0 R_c^{7/3} \cdot r^{-7/3} + n_0$$

$$n = n_0 \left[1 - \left(\frac{R_c}{r}\right)^{7/3} \right].$$
 (8)

Удельный поток вещества, переносимого турбулентной диффузией через единицу поверхности в единицу времени, составляет

$$\mathbf{j} = \boldsymbol{\Pi}_{\mathrm{TYP6.}} \frac{\mathrm{d}\mathbf{n}}{\mathrm{d}\mathbf{r}}$$

На поверхности поглощающей сферы
г $= R_{_{\rm C}}$ этот поток равен

$$j = \mathcal{A}_{\text{турб.}} \left(\frac{dn}{dr} \right)_{r \to R_c} = \frac{7}{3} \varepsilon_0^{1/3} n_0 R_c^{1/3} .$$
(9)

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

$$N = S_{m} j n \theta$$
,

где θ – коэффициент эффективности столкновений капель; S_m – площадь поверхности шара.

С учетом (9) и формулы для площади поверхности

шара
$$S_{\mu\nu} = 4\pi R_c^2$$
 получим

$$N = \frac{28}{3} \pi \varepsilon_0^{1/3} n^2 R_c^{7/3} \theta.$$
 (10)

Скорость коалесценции или уменьшение числа



капель во времени определяется из соотношения:

$$\frac{\mathrm{dn}}{\mathrm{d\tau}} = -\mathrm{N} = -\frac{28}{3}\pi\varepsilon_0^{1/3}\cdot\mathrm{n}^2\cdot\mathrm{R}_{\mathrm{c}}^{7/3}\cdot\theta. \tag{11}$$

Уравнение (11) решается при следующем граничном условии

при
$$\tau = 0$$
: $n = n_0$. (12)

Несмотря на изменение количества капель во времени, объемная доля дисперсной фазы не меняется ($\phi = \text{const}$). Объемное содержание дисперсной фазы равно произведению объема капель на их количество в единице объема. Для мелкодисперсной эмульсии капель нефти под действием поверхностной силы натяжения стремятся принимать сферическую форму. Тогда объем отдельных капель можно вычислить по

формуле
$$\frac{4}{3}\pi r_{\kappa}^3 = \frac{\pi d_{\kappa}^3}{6}$$
. Следовательно, между

числом капель в единице объема и объемным содержанием дисперсной фазы имеет место зависимость

$$\varphi = \frac{\pi d_{\kappa}^3}{6} n = \frac{\pi (d_{\kappa}^0)^3}{6} n_0 = \text{const.}$$
 (13)

В уравнении (11) радиус поглощающей сферы выразим через объемную концентрацию капель. С учетом (13) и соотношения $R_c = 1,5d_{\kappa}$ уравнение (11) можно записать в виде:

$$\frac{\mathrm{dn}}{\mathrm{d\tau}} = -\mathrm{Bn}^{11/9},\tag{14}$$

где

$$\mathbf{B} = 124,92 \ \varphi^{7/9} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_0^{1/3} \cdot \boldsymbol{\theta}.$$

После интегрирования уравнения (14) имеем:

$$-\frac{9}{2}n^{-2/9} = -B\tau + A_3.$$
(15)

Постоянная интегрирования A₃ определяется из граничного условия (12):

$$A_3 = -\frac{9}{2}n_0^{-2/9}$$

Тогда (15) примет вид

$$\left(n^{-2/9} - n_0^{-2/9}\right) = \frac{B}{4,5}\tau$$
 (16)

Полученная формула является функциональной зависимостью между значениями изменения числа капель и промежутка времени. С учетом (13) несложно перейти к диаметрам капель дисперсной фазы. Тогда для определения времени коалесценции капель получим

$$\tau = 0,068 \frac{d_{\kappa}^{2/3} - (d_{\kappa}^{0})^{2/3}}{\varphi^{5/9} \cdot \varepsilon_{0}^{1/3} \cdot \theta}.$$
 (17)

Соотношение (17) можно записать в виде зависимости диаметра капель от времени:

$$\mathbf{d}_{\kappa} = \sqrt[3]{\left[17,7\,\phi^{5/9}\cdot\boldsymbol{\varepsilon}_{0}^{1/3}\cdot\boldsymbol{\tau}\cdot\boldsymbol{\theta} + (\mathbf{d}_{\kappa}^{0})^{2/3}\right]^{2}}\,,\quad(18)$$

где d^0_{κ} – диаметр исходных капель. Полученная

формула позволяет рассчитывать рост диаметра капель под действием турбулентных пульсаций при попарном слиянии капель и при одинаковом времени пребывания капель в потоке. Интенсивность (скорость) изменения диаметра определяется через значения производной d(d_)/dt.

Для процессов коалесценции капель и полноты их завершения необходимо знать распределение частиц потока в вышеуказанных физических моделях во времени. Для этого составлены дифференциальные функции распределения времени пребывания жидкости в этих моделях [11]: дифференциальная функция С(т) по схеме: гидроциклона; дифференциальная функция С(т) по схеме: гидроциклона; дифференциальная функция С(т) по схеме гидроциклона; дифференциальная функция С(т) по схеме установки БГКО.

Дифференциальная функция распределения пребывания среды $C(\tau)$ имеет размерность сек⁻¹ (1/сек), а время пребывания в конкретном аппарате определяется как 1/ $C(\tau)$. Для вычисления изменения диаметра дисперсной фазы за время ее пребывания в рассматриваемом устройстве необходимо умножить интенсивность изменения диаметра на величину данного промежутка времени

$$\frac{1}{\mathrm{C}(\mathsf{d}_{\kappa})} = \frac{\mathrm{d}(\mathsf{d}_{\kappa})}{\mathrm{d}\tau} \cdot \frac{1}{\mathrm{C}(\tau)}.$$

Отсюда находим дифференциальную функцию распределения капель нефти по крупности для полидисперсных систем на выходе из камер нижнего слива, верхнего слива и на выходе из отстойника

$$C(d_{\kappa}) = C(\tau) \frac{d\tau}{d(d_{\kappa})}.$$
 (19)

С учетом уравнений (17) и по [11] получим: – для камеры нижнего слива:

$$C(d_{\kappa}) = \frac{0,0455 \cdot K \cdot d_{\kappa}^{-1/3} \cdot \lambda_{1}^{2}}{A_{1} \cdot A_{2} \cdot A_{3} \cdot \varphi^{5/9} \cdot \varepsilon_{0}^{1/3} \cdot \theta} \left[\frac{1}{(a-b)(a-c)} e^{a\tau} + \frac{1}{(b-a)(b-c)} e^{b\tau} + \frac{1}{(c-a)(c-b)} e^{c\tau} \right];$$
(20)

– для камеры верхнего слива:

$$C(d_{\kappa}) = \frac{0.0455 \cdot K \cdot d_{\kappa}^{-1/3} \cdot \lambda_{2}^{2}}{A_{1} \cdot A_{2} \cdot A_{3} \cdot \varphi^{5/9} \cdot \varepsilon_{0}^{1/3} \cdot \theta} \left[\frac{1}{(a-b)(a-c)} e^{a\tau} + \frac{1}{(b-a)(b-c)} e^{b\tau} + \frac{1}{(c-a)(c-b)} e^{c\tau} \right];$$
(21)

– для установки БГКО:

Известия КазГАСУ, 2007, №2 (8)



$$C(d_{\kappa}) = \frac{0,0455 \cdot K \cdot d_{\kappa}^{-1/3}}{A_{1} \cdot A_{3} \cdot \phi^{5/9} \cdot \varepsilon_{0}^{1/3} \cdot \theta} \left\{ \frac{\overline{A}}{\frac{1}{A_{4}} + a} e^{a\tau} + \frac{\overline{B}}{\frac{1}{A_{4}} + b} e^{b\tau} + \frac{\overline{C}}{\frac{1}{A_{4}} + c} e^{c\tau} - \left[\frac{\overline{A}}{\frac{1}{A_{4}} + a} + \frac{\overline{B}}{\frac{1}{A_{4}} + b} + \frac{\overline{C}}{\frac{1}{A_{4}} + c} \right] e^{-\tau \frac{1}{A_{4}}} \right\}. (22)$$

В уравнениях (20, 21, 22) t определяется из уравнения (17).

Уравнения (20, 21, 22) являются основой для решения задач укрупнения (коалесценции) капель нефти при инженерных расчетах установок типа БГКО.

Литература

- 1. Адельшин А.Б., Бусарев А.В., Потехин Н.И., Селюгин А.С., Адельшин А.А. К проблеме интенсификации процессов гидродинамической очистки нефтесодержащих сточных вод. Изв. КГАСА. – Казань, 2003, №21. – С.91-96.
- Адельшин А.А., Адельшин А.Б., Хисамеева Л.Р., Шешегова И.Г. К основным положениям разработки блочных установок очистки нефтепромысловых сточных вод с использованием закрученных потоков. – М.: Технология нефти и газа, 2007. – 12 с.
- Гунта А., Лилли Ф., Сайред Н. Закрученные потоки. – М.: Мир, 1987. – 588 с.

- Жизняков В.В. Исследование гидродинамики закрученного потока в трубопроводах технологических аппаратов систем очистки воды/ Дис. канд. техн. наук. – Горький, 1980. – 195 с.
- 5. Берджоу П. Введение в турбулентность и ее измерение. М.: Мир, 1974. 277 с.
- 6. Фортье А. Механика суспензий. –М.: Мир, 1971. 264 с.
- 7. Медников Е.П. Поперечная миграция частиц, взвешенных в турбулентном потоке. // Докл. АН СССР, 1971, №23. – С. 543-547.
- 8. Колмогоров А.Н. О дроблении капель в турбулентном потоке // Докл. АН СССР, 1949, №5. С. 825-828.
- 9. Смирнов Ю.А., Белопольский А.Д. Теория и практика перемешивания в жидких средах. – М.: НИИТЭХИМ, 1976. – 256 с.
- Турбулентное смещение газовых струй. / Под ред. Г.Н. Абрамовича. – М.: Наука, 1974. – 272 с.
- Адельшин А.А. Дифференциальная функция распределения времени пребывания жидкости установки БГКО / Труды Международного форума по проблемам науки, техники и образования. Том 2. – М.: Академия наук о Земле, 2004. – 170 с.
- 12. Тронов В.П., Тронов А.В. Очистка вод различных типов для использования в системе ППД. Казань: Фэн, 2001. 560 с.
- Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959. – 698 с.
- Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепломассообмена. – М.: Высшая школа, 1967. – 303 с.