

УДК 62-634.8**С.И. ЭПШТЕЙН**, канд. техн. наук, с.н.с., ведущий научный сотрудник

Государственное предприятие «Украинский научно-технический центр металлургической промышленности «Энергосталь» (ГП «УкрНТЦ «Энергосталь»), г. Харьков

С.Е. НИКУЛИН, канд. техн. наук, доцент, **Н.Г. ОНИЩЕНКО**, ассистент

Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова (ХНУГХ им. А.Н. Бекетова), г. Харьков

Е.А. МИЛЛЕР, научный сотрудник

Государственное предприятие «Украинский научно-технический центр металлургической промышленности «Энергосталь» (ГП «УкрНТЦ «Энергосталь»), г. Харьков

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА УКРУПНЕНИЯ КАПЕЛЬ МАСЛА И НЕФТЕПРОДУКТОВ В КОАЛЕСЦИРУЮЩЕЙ ЗАГРУЗКЕ

Предложена гипотеза о механизме укрупнения частиц нестабилизационной эмульсии при пропускании ее через коалесцирующие фильтры. Согласно этой гипотезе основную роль в укрупнении частиц играет градиентная коагуляция. Рассмотрена и решена численным методом система уравнений, описывающих изменение суммарного объема капель отдельных фракций с течением времени. Получено выражение для градиентной скорости в объеме пар коалесцирующей загрузки. Показано, как определить средние значения диаметра и скорости всплывания капель эмульсии, а также увеличение степени очистки при отстаивании после прохождения эмульсии через коалесцирующую загрузку.

Ключевые слова: эмульсия, коалесцирующая загрузка, градиентная скорость, градиентная коагуляция, зернистая загрузка.

В настоящее время в практике очистки сточных вод от неэмульгированных масел широко используются коалесцирующие зернистые фильтры [1]. При пропускании через такой фильтр очищаемой воды капельки масла, находящиеся в воде, укрупняются, после чего их с достаточно высокой эффективностью можно выделить с помощью отстаивания или фильтрования.

В работе [1] приведен пример использования коалесцирующего фильтра для очистки нефтесодержащих вод и представлена математическая модель процесса, которая, однако, не вскрывает его физической сущности.

Следует отметить, что физическая картина данного процесса не вполне ясна, что затрудняет построение такой математической модели, которая позволила бы прогнозировать процесс очистки. Можно предложить несколько гипотез касательно физических процессов, происходящих в коалесцирующей фильтрующей загрузке. Не исключено, что в реальности все они протекают одновременно.

В данной работе рассматривается один из возможных физических процессов укрупнения капель в коалесцирующем фильтре – градиентная коагуляция. Этот



процесс происходит при сближении частиц в потоке жидкости и газа за счет градиента скорости [2–4].

При течении жидкости через зернистую загрузку имеют место потери давления по ходу движения жидкости, т.е. потери энергии. Известно, что давление, под которым находится жидкость, можно рассматривать как запас потенциальной энергии единицы объема жидкости.

Рассмотрим элемент объема коалесцирующей загрузки, имеющий форму кубика со стороной, равной единице. Объем пор в этом кубике (обозначим его ε) называется порозностью загрузки. Пусть через кубик пропускается жидкость и при этом происходят потери давления ΔP_1 . Тогда потери энергии E_1 единицы объема протекающей жидкости, обусловленные действующими в ней силами трения и отнесенные к единице свободного объема этого кубика, можно определить из соотношения

$$E_1 = \frac{\Delta P_1}{\varepsilon}. \quad (1)$$

Если средняя скорость прохождения жидкости через кубик равна W , расход жидкости определяется выражением $Q = W \cdot S$, где S – поверхность грани, через которую входит жидкость. Так как для данного кубика $S = 1$, отсюда следует, что $Q = W$. Таким образом, полная потеря энергии в единицу времени при протекании жидкости через кубик, отнесенная к единице свободного объема (т.е. объема пор), равна

$$E = \frac{\Delta P_1 \cdot W}{\varepsilon}. \quad (2)$$

Величина E называется диссипацией механической энергии [5]. Эта энергия расходуется на преодоление сил трения при деформации элементов объема жидкости, которая почти всегда имеет место при ее движении.

В упрощенном виде это можно представить следующим образом. Рассмотрим элементарный объем жидкости (для большей наглядности – в форме кубика со сторонами, равными h) (рис. 1). Предположим, что по его верхней грани действует касательное напряжение τ , вызывающее деформацию кубика.

Согласно закону трения Ньютона [5]

$$\tau = \mu \cdot \frac{\Delta W}{h} = \mu \cdot G, \quad (3)$$

где G – градиент скорости ($G = \Delta W/h$); μ – динамический коэффициент вязкости.

Умножим обе части равенства (3) на $\Delta W/h$:

$$\tau \cdot \frac{\Delta W}{h} = \mu \cdot \left(\frac{\Delta W}{h} \right)^2 = \mu \cdot G^2. \quad (4)$$

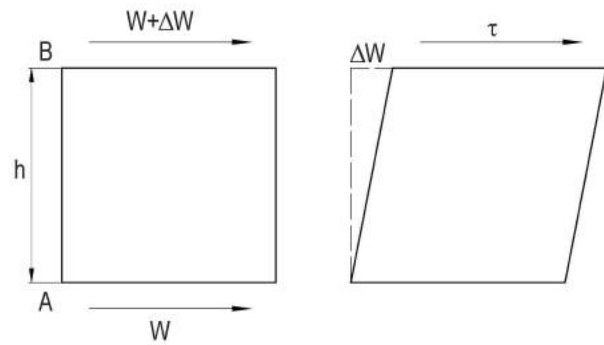


Рисунок 1 – Деформация элементарного объема жидкости в потоке со сдвигом

Если h – величина, равная единице длины в принятой системе единиц ($h = 1$), градиент скорости численно равен скорости точки В относительно точки А, т.е. скорости ΔW перемещения верхней грани относительно нижней; τ – сила, действующая вдоль верхней грани. Произведение силы τ на скорость ΔW – это мощность, т.е. расход энергии в единицу времени. Поскольку в данном случае рассматривался элемент единичного объема, то это – потери энергии на трение в единицу времени в единице объема, т.е. E_1 .

Итак,

$$E_1 = \mu \cdot G^2. \quad (5)$$

Отсюда следует, что градиент скорости равен

$$G = \sqrt{\frac{E_1}{\mu}} = \sqrt{\frac{E}{\mu \cdot V}}, \quad (6)$$

где V – рассматриваемый объем (это может быть объем сооружения или часть объема фильтрующей загрузки и т.п.); E – энергия, теряемая в данном объеме.

Внимание, которое выше было уделено понятию и вычислению градиента скорости, обусловлено нашим предположением, что в модели коалесценции основную роль играет градиентная коагуляция.

Рассмотрим совокупность частиц (в данном случае – капелек жидкости) в потоке со сдвигом (рис. 2).

В точке, где находится капля А, скорость жидкости больше, чем в точке, где находится капля В. Поскольку капли перемещаются со скоростью окружающей жидкости, капля А имеет большую скорость, чем капля В. Вследствие этого капля А через некоторое время догонит каплю В, соприкоснется с ней и соединится, в результате чего образуется капля объемом $V_A + V_B$, где V_A и V_B – первоначальные объемы капель А и В. Если в единице объема воды имеется n_1 частиц А, радиус которых равен r_1 , и n_2 частиц В, радиус которых равен r_2 , то в соответ-

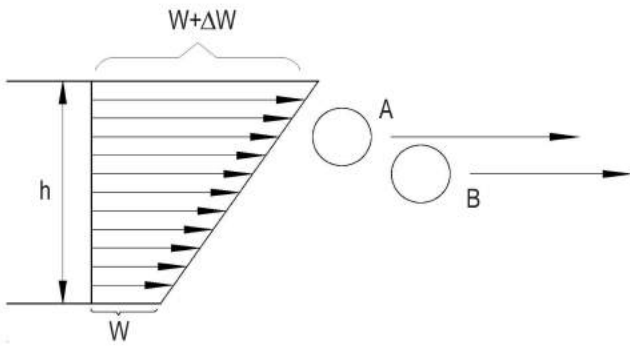


Рисунок 2 – Иллюстрация механизма столкновения частиц при градиентной коагуляции (градиент скорости $G = \frac{\Delta W}{h}$)

ствии с [2] число столкновений частиц A и B в вакууме в единицу времени равно

$$N_{ст1,2} = \frac{4}{3} \cdot (r_1 + r_2)^3 \cdot G \cdot n_1 \cdot n_2. \quad (7)$$

Так как в жидкости при сближении частиц их траектории отклоняются от прямолинейных, в формулу (7) необходимо ввести так называемый коэффициент захвата α , с учетом которого эта формула примет вид

$$N_{1,2} = \frac{4}{3} \cdot (r_1 + r_2)^3 \cdot G \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot \alpha. \quad (8)$$

Коэффициент захвата α близок к единице, когда $V_1 \approx V_2$, и мал, если V_1 много меньше или много больше V_2 . Поэтому, как это принято в работе [7], будем считать, что столкновения происходят только между частицами равных размеров. Следовательно, для частиц радиуса r_i число столкновений $N_{стi}$ равно

$$N_{стi} = \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot (2r_i)^3 \cdot G \cdot n_i^2 = \frac{4}{\pi} \cdot V_i \cdot G \cdot n_i^2, \quad (9)$$

где V_i – объем частиц с радиусом r_i .

Если в начальный момент времени в воде имеются только частицы объемом V_1 в количестве n_1 , то уравнение, описывающее изменение числа частиц с течением времени, имеет следующий вид:

$$\frac{dn_1}{dt} = -2N_{ст1} = -2 \cdot \frac{4}{\pi} \cdot V_1 \cdot G \cdot n_1^2 = -\frac{8}{\pi} \cdot V_1 \cdot G \cdot n_1^2. \quad (10)$$

Коэффициент 2 введен в эту формулу потому, что в результате каждого столкновения «исчезают» две частицы объема V_1 , образуя одну частицу объема V_2 . Учитывая, что произведение $V_i \cdot n_i$ представляет собой суммарный объем n_i частиц объемом V_i каждая в единице объема жидкости (т.е. это – объемная концентрация C_i), и умножив уравнение (10) на V_1 , получим

$$\frac{dC_1}{dt} = -\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_1^2. \quad (11)$$

Изменение в единицу времени числа частиц объемом V_2 описывается уравнением

$$\begin{aligned} \frac{dC_2}{dt} &= -\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_2^2 + N_{ст1} \cdot V_2 = \\ &= -\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_2^2 + \frac{4}{\pi} \cdot V_1 \cdot G \cdot n_1^2 \cdot V_2. \end{aligned} \quad (12)$$

Последнее слагаемое в правой части – это приращение общего объема частиц, имеющих объем V_2 , за счет их образования из частиц объемом V_1 .

Поскольку $V_2 = 2V_1$,

$$\frac{dC_2}{dt} = -\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_2^2 + \frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_1^2. \quad (13)$$

Аналогично для любого i

$$\frac{dC_i}{dt} = -\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_i^2 + \frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_{i-1}^2. \quad (14)$$

Разделим обе части уравнений (11) и (14) на $\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_0^2$,

где C_0 – общая объемная концентрация частиц, которая в процессе коагуляции (коалесценции) остается неизменной:

$$\frac{1}{\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_0^2} \cdot \frac{dC_1}{dt} = -\left(\frac{C_1}{C_0}\right)^2, \quad (15)$$

$$\frac{dC_i}{\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_0^2 \cdot dt} = -\left(\frac{C_i}{C_0}\right)^2 + \left(\frac{C_{i-1}}{C_0}\right)^2. \quad (16)$$

Обозначим $\frac{C_i}{C_0} = \bar{C}_i$ и запишем левую часть уравне-

ния (15) в следующем виде:

$$\frac{1}{\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_0^2} \cdot \frac{dC_i}{dt} = \frac{d\left(\frac{C_i}{C_0}\right)}{\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_0 \cdot dt} = \frac{d\left(\frac{dC_i}{dC_0}\right)}{d\left(\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_0 \cdot t\right)}. \quad (17)$$

Введем обозначение $\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_0 \cdot t = \bar{t}$. Тогда система

уравнений примет безразмерный вид

$$\frac{d\bar{C}_1}{d\bar{t}} = -\bar{C}_1^2, \quad (18)$$

$$\frac{d\bar{C}_2}{d\bar{t}} = -\bar{C}_2^2 + \bar{C}_1^2,$$

.....



$$\frac{d\bar{C}_i}{dt} = -\bar{C}_i^2 + \bar{C}_{i-1}^2 \quad (19)$$

Ее начальные условия

$$\bar{C}_{0,i} = \frac{C_{0,i}}{C_0},$$

где $C_{0,i}$ – начальная концентрация частиц, объем каждой из которых равен V_i .

Решение уравнения (18) имеет вид

$$\bar{C}_i = \frac{\bar{C}_{0,1}}{1 + \bar{C}_{0,1} \cdot \bar{t}}, \quad (20)$$

где $\bar{C}_{0,1} = \frac{C_{0,1}}{C_0}$; $C_{0,1}$ – начальная концентрация частиц,

объем каждой из которых равен V_1 .

Система уравнений (18–19) представляет собой уравнения Риккати, которые в общем виде не имеют аналитического решения [7]. В связи с этим их лучше решать численными методами, например методом Эйлера (или более точными методами – Адамса либо Рунге – Кутта) [8].

Результаты численного решения системы уравнений методом Рунге – Кутта в графическом виде приведены на рис. 3. По оси абсцисс отложены значения относительного времени \bar{t} , а по оси ординат – относительной объемной концентрации $\bar{C}(\bar{t}) = \bar{C}_0$. Кривая y_1 показывает изменение во времени относительной объемной концентрации первичных капелек масла, имеющих объем V_1 , а кривые y_2 и y_3 отражают изменения относительных объемных концентраций капелек второй и третьей фрак-

ций, причем вторую фракцию образуют капли объемом $V_2 = 2V_1$ каждая, а третью фракцию – капли, имеющие объем $V_3 = 2V_2 = 2^2 \cdot V_1$. Аналогично i -ю фракцию образуют капли, объем каждой из которых равен $V_i = 2V_{i-1} = 2^{i-1}V_1$.

Используя полученные решения, можно определить уровень эффективности процесса коалесценции. Скорость всплывания достаточно мелких капель масла, которые можно считать твердыми шариками, определяется по формуле Стокса:

$$W_i = \frac{(\rho_B - \rho_M) \cdot g \cdot d_i^2}{18 \cdot \mu}, \quad (21)$$

где ρ_B, ρ_M – плотности соответственно воды и масла; g – ускорение свободного падения; d_i – диаметр капель i -й фракции.

Отношение объемов двух капель $V_j : V_k$ равно

$$\frac{\pi \cdot d_j^3}{6} : \frac{\pi \cdot d_k^3}{6}.$$

Тогда отношение их диаметров равно $\left(\frac{V_j}{V_k}\right)^{\frac{1}{3}}$. Поэтому если $V_i = 2^{i-1} \cdot V_1$, то $d_i = (2^{i-1})^{\frac{1}{3}} \cdot d_1$.

Следовательно, скорость всплывания капель i -й фракции

$$W_i = \frac{(\rho_B - \rho_M) \cdot g \cdot d_i^2}{18 \cdot \mu} = \frac{(\rho_B - \rho_M) \cdot g \cdot d_1^2}{18 \cdot \mu} \cdot (2^{i-1})^{\frac{2}{3}} = W_1 \cdot (2^{i-1})^{\frac{2}{3}}.$$

Средняя (по массе) скорость всплывания частиц равна

$$W_{\text{ф}} = \frac{\bar{C}_1 \cdot W_1 + \bar{C}_2 \cdot W_2 + \dots + \bar{C}_i \cdot W_i + \dots}{\bar{C}_1 + \bar{C}_2 + \dots + \bar{C}_i + \dots} = \frac{W_1 \cdot (\bar{C}_1 + \bar{C}_2 \cdot 2^{\frac{2}{3}} + \dots + \bar{C}_i \cdot (2^{i-1})^{\frac{2}{3}} + \dots)}{1}.$$

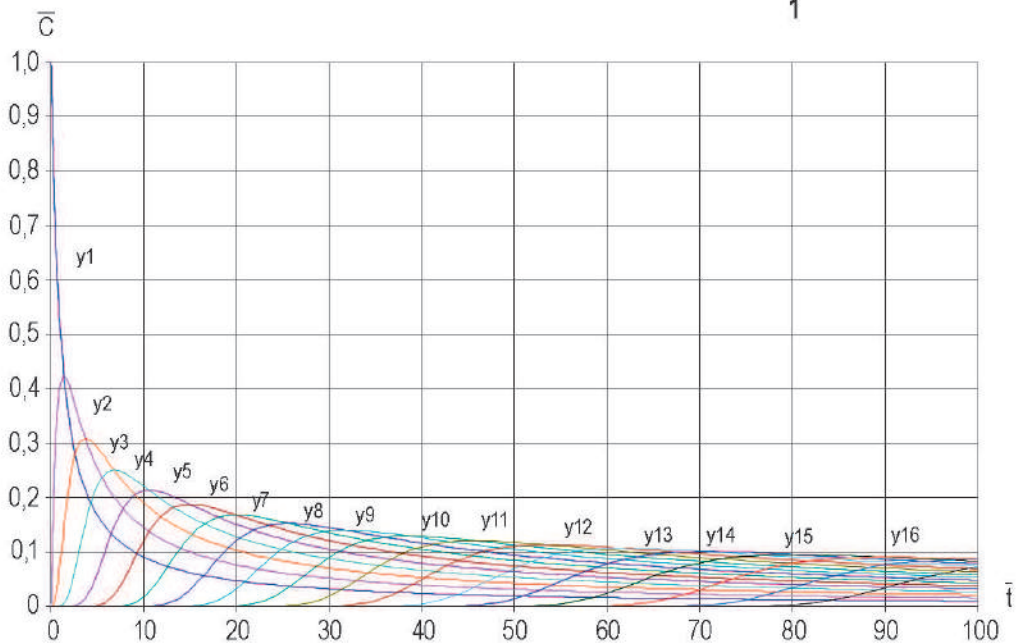


Рисунок 3 – Графики зависимости общего относительного объема капелек C_i/C_0 различных фракций от времени

Следовательно,

$$\frac{W_{\text{эф}}}{W_1} = \sum (2^{i-1})^{\frac{2}{3}} \cdot \bar{C}_i \quad (22)$$

Далее необходимо определить величину G и время пребывания t жидкости в объеме пор при ее течении через зернистую загрузку.

Потери давления при движении через пористую среду (зернистый слой) можно определить по формуле Козени – Кармана [9]

$$\Delta P = K \cdot \frac{\mu \cdot W_0}{\varphi^2 \cdot d^2} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot L, \quad (23)$$

где K – константа Козени ($K \approx 180$ [10]);

W_0 – скорость потока в расчете на поперечное сечение пустого аппарата, т.е. аппарата без зернистой загрузки;

d – средний размер частиц фильтрующего материала;

φ – коэффициент формы;

ε – порозность зернистого слоя;

L – толщина зернистого слоя.

В данной формуле для частиц загрузки можно принять $\varphi \approx 0,7$; $\varepsilon \approx 0,25$. Потери давления (при неизменной скорости) – это потери энергии единицы объема жидкости при протекании через зернистый слой. Полные потери энергии при протекании через слой с единичным поперечным сечением равны $\Delta E = \Delta P \cdot W_0$.

Объем, в котором происходит потеря энергии, равен $\varepsilon \cdot L$. Следовательно, по формуле (6) имеем

$$G = \sqrt{\frac{\Delta P \cdot W_0}{\mu \cdot \varepsilon \cdot L}} \quad (24)$$

Время пребывания воды в этом объеме равно

$$t = \frac{\varepsilon \cdot L}{Q} = \frac{\varepsilon \cdot L}{W_0}, \quad (25)$$

так как расход через единичное поперечное сечение составляет W_0 .

Рассмотрим, как изменится объем исходных мелких частиц масла в монодисперсной эмульсии после того, как она протекла через коалесцирующую загрузку. Примем средний размер зерен материала, через который протекает жидкость, $d \approx 1$ мм = 0,001 м; $\mu \approx 0,001$ Па · с; $L \approx 0,5$ м; $W_0 = 7,2$ м/час = 0,002 м/с, концентрацию нефтепродуктов в воде – 100 мг/дм³ = 100 г/м³ = 0,1 кг/м³,

плотность масел $\rho \approx 900$ кг/м³ ($C_1 = \frac{0,1}{900} = 0,00011 = C_0$).

По формуле (23) определим потери давления при движении через зернистый слой

$$\Delta P = 180 \cdot \frac{0,001 \cdot 0,002 \cdot (1-0,25)^2}{0,7^2 \cdot 0,001^2 \cdot 0,25^3} \cdot 0,5 = 17349 \text{ Па.}$$

По формуле (24) вычислим градиент скорости

$$G = \sqrt{\frac{17349 \cdot 0,002}{0,001 \cdot 0,25 \cdot 0,5}} = 497.$$

Время протекания воды через слой

$$t = \frac{0,25 \cdot 0,5}{0,002} = 70 \text{ с.}$$

Относительное время

$$\bar{t} = \frac{8}{\pi} \cdot C_0 \cdot G \cdot t = 0,00011 \cdot 497 \cdot 70 = 9,75.$$

Поскольку рассматриваемая эмульсия монодисперсна, в начальный момент времени все частицы имеют равные размеры, тогда начальная объемная концентрация этих первичных капель $C_{1,0}$ – это и есть общая объемная концентрация капель C_0 , т.е. $C_{1,0} = C_0$ и

$$\bar{C}_{1,0} = \frac{C_{1,0}}{C_0} = 1.$$

К моменту $t = 70$ с (т.е. $\bar{t} = 9,75$)

$$\bar{C}_1 = \frac{1}{1+\bar{t}} = \frac{1}{1+9,75} = 0,093, \quad \frac{C_0}{C_1} = \frac{1}{0,093} \approx 10,75.$$

Следовательно, за счет коалесценции содержание первичных мелких частиц уменьшится в 10,75 раза (они перейдут в категорию более крупных частиц, которые легче будет выделить из воды).

С помощью зависимостей, представленных на рис. 3, можно найти значения \bar{C}_i для $\bar{t} = 9,75$: $\bar{C}_2 \approx 0,15$, $\bar{C}_3 \approx 0,18$, $\bar{C}_4 \approx 0,22$, $\bar{C}_5 \approx 0,20$, $C_6 \approx 0,13$, $\bar{C}_7 \approx 0,02$.

Среднюю скорость всплывания капель определим по формуле (22):

$$\frac{W_{\text{эф}}}{W_1} = 0,093 + 0,15 \cdot 2^{\frac{2}{3}} + 0,18 \cdot 2^{\frac{2}{3}} + 0,22 \cdot 2^{\frac{2}{3}} + 0,20 \cdot 2^{\frac{4}{3}} + 0,13 \cdot 2^{\frac{5}{3}} + 0,02 \cdot 2^{\frac{6}{3}} = 4,5,$$

при этом увеличение среднего (по массе) диаметра капель можно определить следующим образом:

$$\frac{d_{\text{эф}}}{d_1} = 0,093 + 0,15 \cdot 2^{\frac{1}{3}} + 0,18 \cdot 2^{\frac{2}{3}} + 0,22 \cdot 2^{\frac{3}{3}} + 0,20 \cdot 2^{\frac{4}{3}} + 0,13 \cdot 2^{\frac{5}{3}} + 0,02 \cdot 2^{\frac{6}{3}} = 2,0.$$

Итак, в результате коалесценции средний диаметр капли увеличился вдвое, а средняя скорость всплывания капель масла выросла в 4,5 раза. В действительности средняя скорость увеличится еще больше, так как укрупнение капель происходит не только в результате соединения капель одинакового размера, но также



и после столкновения (хотя и с меньшей эффективностью) капель разного диаметра.

Определим эффективность удаления масла, если эмульсию, пропущенную через коалесцирующую загрузку, отстаивать в течение времени $t_{\text{отст}}$ удовлетворяющего соотношению $H_{\text{отст}}/t_{\text{отст}} = W_{\text{ср}}$.

Средней скорости $W_{\text{ср}} = 4,5 \cdot W_1$ соответствует выражение $(2^{i-1})^{\frac{2}{3}} = 4,5$.

$$\text{Отсюда } (i-1)_{\text{ср}} = \left(\frac{\lg 4,5}{\lg 2} \right)^{\frac{3}{2}} = 3,2, \text{ т.е. } i_{\text{ср}} = 4,2. \text{ Конечно,}$$

эта величина – условная, так как i не может быть дробным числом, но в данном случае это не имеет значения. Важен тот факт, что если $i > 4,2$, то $W_i > W_{\text{ср}}$ и капли, для которых $i > i_{\text{ср}}$, в заданных условиях (т.е. при $H_{\text{отст}}/t_{\text{отст}} = W_{\text{ср}}$) полностью всплывут на поверхность. Если же $i < i_{\text{ср}}$, т.е. $W_i < W_{\text{ср}}$, то за время $t_{\text{отст}}$ капли, скорость всплывания которых равна W_i , не успеют полностью выделиться из воды. Толщина слоя воды, который капли покинули, равна $W_i \cdot t_{\text{отст}}$, а толщина слоя воды, из которого капли не успели выделиться, составляет

$$H_{\text{отст}} - W_i \cdot t_{\text{отст}} = (W_{\text{ср}} - W_i) \cdot t_{\text{отст}}. \quad (26)$$

Таким образом, доля капель, оставшихся в воде, равна

$$\bar{C}_{\text{ост}} = \frac{(W_{\text{ср}} - W_i) \cdot t_{\text{отст}}}{H_{\text{отст}}} = \frac{(W_{\text{ср}} - W_i)}{W_{\text{ср}}} = 1 - \frac{W_i}{W_{\text{ср}}}. \quad (27)$$

В рассматриваемом примере после отстаивания в течение времени $t_{\text{отст}}$ в воде еще останутся частицы 1–4-й фракций, причем их доля составит

$$\bar{C}_{1\text{ост}} = 1 - \frac{W_1}{4,5 \cdot W_1} = 0,78,$$

$$\bar{C}_{2\text{ост}} = 1 - \frac{W_2}{4,5 \cdot W_1} = 1 - \frac{W_1 \cdot (2^{2-1})^{\frac{2}{3}}}{4,5 \cdot W_1} = 0,65,$$

$$\bar{C}_{3\text{ост}} = 1 - \frac{W_3}{4,5 \cdot W_1} = 1 - \frac{W_1 \cdot (2^{3-1})^{\frac{2}{3}}}{4,5 \cdot W_1} = 0,44,$$

$$\bar{C}_{4\text{ост}} = 1 - \frac{W_4}{4,5 \cdot W_1} = 1 - \frac{W_1 \cdot (2^{4-1})^{\frac{2}{3}}}{4,5 \cdot W_1} = 0,11.$$

Но после выхода из коалесцирующей загрузки содержание капель первой фракции составляло 0,093 от исходной, а капель 2–4-й фракций соответственно 0,15; 0,18; 0,22. Следовательно, полная относительная остаточная концентрация капель масла после отстаивания равна

$$\bar{C}_{\text{ост}} = 0,093 \cdot 0,78 + 0,15 \cdot 0,65 + 0,18 \cdot 0,44 + 0,22 \cdot 0,11 = 0,27.$$

Если эмульсию отстаивать, не пропуская предварительно через коалесцирующую загрузку, то скорость всплывания всех капель W_i , а их доля \bar{C}_i от общей массы равна единице, тогда по формуле (27) имеем

$$\bar{C}_{\text{ост}} = \bar{C}_{1\text{ост}} = 1 \cdot \left(1 - \frac{W_1}{4,5 \cdot W_1} \right) = 0,78.$$

Таким образом, в данном примере использование коалесцирующей загрузки позволило снизить остаточную концентрацию масел после отстаивания почти в три раза ($0,78/0,27 = 2,9$).

ВЫВОДЫ

1. Выдвинута гипотеза о том, что при пропускании нестабилизированной эмульсии через коалесцирующую загрузку основную роль в укрупнении капель играет градиентная коалесценция.

2. Рассмотрена система уравнений, описывающая изменение общего суммарного объема капель различных фракций с течением времени. Получено численное решение системы уравнений в графическом виде.

3. Получено выражение для градиента скорости, определяющее скорость коагуляции в объеме пор коалесцирующей загрузки.

4. Получены выражения для средних (по объему) размера и скорости всплывания капель эмульсии, пропущенной через коалесцирующую загрузку. На численном примере показано, что при пропускании эмульсии через коалесцирующую загрузку средний диаметр капель $d_{\text{ср}}$ увеличился вдвое, а средняя скорость всплывания капель $W_{\text{ср}}$ выросла в 4,5 раза. Остаточное содержание масел (при отстаивании с охватывающей скоростью $W_{\text{ср}}$) уменьшилось примерно втрое.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Истомин М. В.** Математическая модель процесса очистки нефтесодержащих вод энергетических установок в фильтроэлементах с кварцевым песком / М. В. Истомин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 7 (54). – С. 192–194.
2. **Левич В. Г.** Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич. – М.: Физматгиз, 1959. – 700 с.
3. **Бабенков Е. Д.** Очистка воды коагулянтами / Е. Д. Бабенков. – М.: Наука, 1977. – 356 с.

4. **Клячко В. А.** Подготовка воды для промышленного и городского водоснабжения / В. А. Клячко, И. Э. Апельцин. – М. : Стройиздат, 1962. – 820 с.
5. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М. : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1969. – 744 с.
6. **Эпштейн С. И.** Определение оптимального объема камеры флокуляции / С. И. Эпштейн // Журнал прикладной химии. – 1986. – № 4. – С. 812–816.
7. **Фильчаков П. Ф.** Численные и графические методы прикладной математики / П. Ф. Фильчаков. – К. : Наукова думка, 1970. – 800 с.
8. **Михлин С. Г.** Приближенные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений / С. Г. Михлин, Х. Л. Смолицкий. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1965. – 384 с.
9. **Романков П. Г.** Гидромеханические процессы химической технологии / П. Г. Романков, М. И. Курочкина. – Л. : Химия, 1974. – 288 с.

Поступила в редакцию 03.04.2014

Запропоновано гіпотезу щодо механізму укрупнення часток нестабілізаційної емульсії під час пропущення її через коалесцируюче завантаження. Відповідно до цієї гіпотези основну роль в укрупненні частинок відіграє градієнтна коагуляція. Розглянуто та розв'язано чисельним методом систему рівнянь, що описують зміну сумарного обсягу крапель окремих фракцій протягом часу. Отримано вираз для градієнтної швидкості в обсязі пір коалесцируючого завантаження. Показано, як визначити середні значення діаметра і швидкості спливання крапель емульсії, а також збільшення ступеня очистки при відстоюванні після проходження емульсії через коалесцируюче завантаження.

One be proposed hypothesis about method of enlargement of non-stabilized emulsion particles during its passing through coalescing loading. According to this hypothesis, gradient coagulation performs main role for particle enlargement. One be examined and accomplished by numerical method the equations set describing change of total volume of drops of separate fractions in time. One be obtained expression for gradient speed in pore volumes of coalescing loading. One be shown how to determine average value of diameter and emulsion speed of emulsion drops as well as rise of cleaning level during settling after emulsion passed through coalescing loading.