

## Добыча, транспорт и переработка нефти и газа

УДК 665.6

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ОТСТОЯ

**Ю.П. Борисевич, Н.Ю. Хохлова**

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Разработано четыре варианта алгоритма для моделирования процесса разрушения обратных водонефтяных эмульсий методом холодного отстоя в горизонтальном отстойнике при подаче исходной эмульсии под водяную подушку. Моделирование сделано с учетом: векторной сущности скорости оседания дисперсных частиц в движущейся жидкости; модульных значений слагаемых векторов скоростей; режима оседания дисперсных частиц; замены дисперсной фазы на реальную эмульсию. Подобный подход позволяет более обоснованно выбирать типоразмеры отстойного оборудования.*

**Ключевые слова:** эмульсия, алгоритм расчета, сферическая частица, отстойник, дисперсная фаза.

Наиболее распространенными в нефтяной промышленности полидисперсными системами, подвергающимися разделению отстоем при стесненных условиях в режиме непрерывного поступления исходной смеси и отвода отделившихся составляющих, являются обратные водонефтяные эмульсии.

Мы рассмотрели в качестве отстойника массовый горизонтальный аппарат с подачей сырья под стационарную водяную подушку. За время прохождения эмульсии от входа до выхода отстойника ее линейная скорость изменяется как вдоль аппарата, так и по его высоте. По горизонтали она уменьшается от входного значения

$$w_{\text{вх}} = \frac{Q_{\text{э}}}{S_{\text{н}}}$$

до выходного значения

$$w_{\text{вых}} = \frac{Q_{\text{н}}}{S_{\text{н}}},$$

где  $Q_{\text{э}}$  – объемный расход исходной эмульсии;

$Q_{\text{н}}$  – объемный расход отводимой нефти с оставшейся обводненностью;

$S_{\text{н}}$  – площадь сечения аппарата, занятая эмульсией.

---

*Юрий Павлович Борисевич (к.х.н., доц.), доцент кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений».*

*Наталья Юрьевна Хохлова (к.б.н., доц.), доцент кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений».*

Пренебрежем толщиной входного слоя, который образуется между нефтью и водяной подушкой.

Будем вести расчет, используя понятие  $d_{min}$ , под которым понимают минимальным диаметр частиц дисперсной фазы, подлежащих удалению в отстойнике. Величину  $d_{min}$  для обратных водонефтяных эмульсий определяют на основании таблицы, зная начальную ( $\varphi_n$ ) и конечную ( $\varphi_k$ ) концентрацию дисперсной фазы в эмульсии. Для этого вычисляют  $\Delta\varphi$  как разницу  $\varphi_n$  и  $\varphi_k$  и, двигаясь справа налево по нижней строке таблицы, суммируют указанные в ячейках величины  $\varphi$  до тех пор, пока найденное слагаемое не станет равным (или минимально не превысит)  $\Delta\varphi$ . Соответствующее значение  $d$  и будет искомым  $d_{min}$ .

Данные для расчета  $d_{min}$

$d, \text{ м} \cdot 10^{-6}$	3	4	5	10	20	30	40	50	60	80	100	$\geq 200$
$\varphi$	0,05	0,15	0,20	0,18	0,15	0,08	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02	0,04

### Усредненное распределение дисперсной фазы по диаметрам для водонефтяных эмульсий

Будем считать время отстоя равным среднему времени движения эмульсии вдоль зоны отстоя. Сам отстой происходит в интервале между водяной подушкой ( $h_1$ ) и высотой жидкости в аппарате ( $D_6 - h_1 - h_2$ ). Тогда

$$\frac{D_6 - h_1}{w_{d_{min}}'''} = \frac{L}{w_{cp}},$$

откуда:

$$w_{cp} = w_{d_{min}}''' \frac{L}{(D_6 - h_1 - h_2)}, \quad (1)$$

где  $w_{cp}$  – средняя скорость движения эмульсии вдоль зоны отстоя;

$w_{d_{min}}'''$  – средняя скорость осаждения сферической частицы дисперсной фазы диаметром  $d_{min}$  в неподвижной дисперсионной среде в стесненных условиях в двигающейся жидкости;

$L$  – длина отстойника;

$D_6$  – внутренний диаметр отстойника;

$h_1$  – высота водяной подушки;

$h_2$  – расстояние от верхней образующей отстойника до оси патрубка, отводящего отстоявшуюся нефть (см. рисунок).

Рассчитаем объемную пропускную способность отстойника по исходной эмульсии  $Q_{\text{э}}$ .

Для горизонтального отстойника, если эмульсия подается под водяную подушку,

$$Q_{\text{э}} = w_{\text{вх}} \cdot S_n,$$

но

$$w_{cp} = \frac{w_{\text{вх}} + w_{\text{вых}}}{2}.$$

Отсюда

$$w_{\text{вх}} = 2w_{cp} - w_{\text{вых}},$$

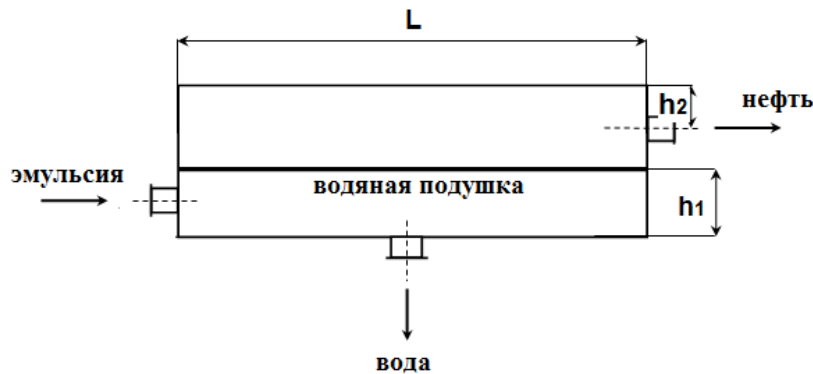


Схема горизонтального отстойника

или

$$w_{ax} = 2w_{cp} - \frac{Q_H}{S_H}.$$

Получим:

$$Q_{\mathcal{E}} = 2w_{cp} \cdot S_H - Q_H. \quad (2)$$

Из материального баланса работы отстойника [1], пренебрегая захватом нефти дренажной водой, можно записать:

$$Q_H = Q_{\mathcal{E}} \frac{1 - \varphi_H}{1 - \varphi_K}. \quad (3)$$

Подставим выражение (3) в уравнение (2) и выразим из полученного равенства  $Q_{\mathcal{E}}$ :

$$Q_{\mathcal{E}} = w_{cp} \cdot S_H \cdot \frac{1 - \varphi_K}{1 - 0,5(\varphi_H + \varphi_K)}. \quad (4)$$

Подставим в уравнение (4) значение  $w_{cp}$  из уравнения (1) и получим выражение

$$Q_{\mathcal{E}} = w_{d_{\min}}''' \frac{L}{(D_e - h_1 - h_2)} \cdot S_H \cdot \frac{1 - \varphi_K}{1 - 0,5(\varphi_H + \varphi_K)}. \quad (5)$$

Дальнейшие преобразования возможны по нескольким направлениям [1, 2].

Будем считать, что за время отстоя слияния каплей дисперсионной фазы вследствие их столкновения не происходит, а также не меняются вязкость и плотность дисперсионной среды.

1. Если частица оседает в двигающейся жидкости, то приходится обращаться к векторной сущности ее скорости оседания и можно записать:

$$w_{d_{\min}}''' = \left| \vec{w}_{d_{\min}}''' + \vec{w}_{d.c} \right|, \quad (6)$$

где  $\vec{w}_{d.c}$  – скорость дисперсной среды.

Первый слагаемый вектор направлен вертикально вниз, а его модуль, пригодный для всех режимов осаждения, приобретает вид [3]

$$\left| w_{d_{\min}}''' \right| = \frac{(\rho_{\partial.\phi} - \rho_{\partial.c}) \cdot d_{\min}^2 \cdot \Phi_{cp}^{4,75} \cdot g}{18\mu_{\partial.c} + \sqrt{(\rho_{\partial.\phi} - \rho_{\partial.c}) \cdot \rho_{\partial.c} \cdot g \cdot d_{\min}^3 \cdot \Phi_{cp}^{4,75}}}, \quad (7)$$

где  $\rho_{\partial.\phi}$  – плотность дисперсной фазы (воды);

$\rho_{\partial.c}$  – плотность дисперсионной среды (нефти);

$\mu_{\partial.c}$  – динамическая вязкость дисперсионной среды;

$\Phi_{cp}$  – относительная доля дисперсионной среды в исходной смеси.

Второй слагаемый вектор направлен горизонтально, а его модуль может быть определен по уравнению

$$\begin{aligned} |\bar{w}_{\partial.c}| = w_{cp} = w_{d_{\min}}''' \frac{L}{(D_6 - h_1 - h_2)} = \\ = \frac{(\rho_{\partial.\phi} - \rho_{\partial.c}) \cdot d_{\min}^2 \cdot \Phi_{cp}^{4,75} \cdot g}{18\mu_{\partial.c} + \sqrt{(\rho_{\partial.\phi} - \rho_{\partial.c}) \cdot \rho_{\partial.c} \cdot g \cdot d_{\min}^3 \cdot \Phi_{cp}^{4,75}}} \cdot \frac{L}{(D_6 - h_1 - h_2)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Подставим уравнения (7) и (8) в выражение (5) с учетом (6) и получим итоговое выражение:

$$\begin{aligned} Q_3 = & \left\{ \frac{(\rho_{\partial.\phi} - \rho_{\partial.c}) \cdot d_{\min}^2 \cdot \Phi_{cp}^{4,75} \cdot g}{18\mu_{\partial.c} + \sqrt{(\rho_{\partial.\phi} - \rho_{\partial.c}) \cdot \rho_{\partial.c} \cdot g \cdot d_{\min}^3 \cdot \Phi_{cp}^{4,75}}} + \right. \\ & \left. + \frac{(\rho_{\partial.\phi} - \rho_{\partial.c}) \cdot d_{\min}^2 \cdot \Phi_{cp}^{4,75} \cdot g}{18\mu_{\partial.c} + \sqrt{(\rho_{\partial.\phi} - \rho_{\partial.c}) \cdot \rho_{\partial.c} \cdot g \cdot d_{\min}^3 \cdot \Phi_{cp}^{4,75}}} \cdot \frac{L}{(D_6 - h_1 - h_2)} \right\} \times \\ & \times \frac{L}{(D_6 - h_1 - h_2)} \cdot S_H \cdot \frac{1 - \Phi_k}{1 - 0,5(\Phi_H + \Phi_k)}. \end{aligned} \quad (9)$$

2. В выражении (6) будем использовать при нахождении модульных значений слагаемых векторов одно из нижеперечисленных [1]:

$$w''' = w_{oc} \cdot \Phi_{cp}^n;$$

$$w''' = w_{oc} \cdot \Phi_{cp}^2 \cdot 10^{-1,82(1-\Phi_{cp})};$$

$$w_{oc}''' = w_{oc} \cdot \frac{0,123}{1 - \Phi_{cp}} \cdot \Phi_{cp}^3,$$

где  $w_{oc}$  – средняя скорость осаждения сферической частицы дисперсной фазы  $d_{\min}$  в неподвижной дисперсионной среде в свободных условиях при любых режимах движения;

$n$  – показатель степени, определяемый опытным путем; мы принимаем  $n = 4,7$ .

Допустим, что было выбрано самое общее выражение (9), тогда модуль первого слагаемого можно найти по выражению

$$\left| w_{d_{\min}}''' \right| = w_{oc} \cdot \Phi_{cp}^{4,7}. \quad (10)$$

Модуль второго слагаемого можно выразить следующим образом:

$$|\bar{w}_{\partial.c}| = w_{oc} \cdot \varphi_{cp}^{4,7} \cdot \frac{L}{(D_6 - h_1 - h_2)}. \quad (11)$$

В зависимости от режима скорость оседания может быть определена либо по уравнению (12), либо по (13).

В зависимости от численного значения критерия Архимеда рассчитывают скорость свободного осаждения одиночной частицы дисперсной фазы в покоящейся жидкости по одной из формул.

Критерий Архимеда:

$$Ar = \frac{(\rho_{\partial.\phi} - \rho_{\partial.c}) \cdot \rho_{\partial.c} \cdot d_{\min} \cdot g}{\mu_{\partial.c}^2}.$$

При ламинарном режиме частиц дисперсной фазы ( $Ar < 36$ ):

$$w_{oc} = \frac{(\rho_{\partial.\phi} - \rho_{\partial.c}) \cdot g}{18\mu_{\partial.c}} d_{\min}^2. \quad (12)$$

При переходном режиме ( $36 < Ar < 82500$ ):

$$w_{oc} = 0,153 \frac{(\rho_{\partial.\phi} - \rho_{\partial.c})^{0,714} \cdot d_{\min}^{1,142} \cdot g^{0,714}}{\rho_{\partial.c}^{0,286} \cdot \mu_{\partial.c}^{0,428}}. \quad (13)$$

Допустим, оседание происходит в ламинарных условиях, тогда подставив выражение (12) в формулу (11), а затем подставив полученное выражение в формулу (5), получим итоговое соотношение для ламинарных условий оседания:

$$Q_{\text{э}} = \left[ \frac{(\rho_{\partial.\phi} - \rho_{\partial.c}) \cdot g}{18\mu_{\partial.c}} \cdot d_{\min}^2 \cdot \varphi_{cp}^{4,7} + \frac{(\rho_{\partial.\phi} - \rho_{\partial.c}) \cdot g}{18\mu_{\partial.c}} \cdot d_{\min}^2 \cdot \varphi_{cp}^{4,7} \frac{L}{(D_6 - h_1 - h_2)} \right] \times \\ \times \frac{L}{(D_6 - h_1 - h_2)} \cdot S_H \cdot \frac{1 - \varphi_{\kappa}}{1 - 0,5(\varphi_{\text{н}} + \varphi_{\kappa})}.$$

При переходном режиме аналогично получаем:

$$Q_{\text{э}} = \left[ 0,153 \frac{(\rho_{\partial.\phi} - \rho_{\partial.c})^{0,714} \cdot d_{\min}^{1,142} \cdot g^{0,714}}{\rho_{\partial.c}^{0,286} \cdot \mu_{\partial.c}^{0,428}} \cdot \varphi_{cp}^{4,7} + 0,153 \frac{L}{(D_6 - h_1 - h_2)} \right] \times \\ \times \frac{(\rho_{\partial.\phi} - \rho_{\partial.c})^{0,714} \cdot d_{\min}^{1,142} \cdot g^{0,714}}{\rho_{\partial.c}^{0,286} \cdot \mu_{\partial.c}^{0,428}} \cdot \varphi_{cp}^{4,7} \left] \frac{L}{(D_6 - h_1 - h_2)} \cdot S_H \cdot \frac{1 - \varphi_{\kappa}}{1 - 0,5(\varphi_{\text{н}} + \varphi_{\kappa})}.\right.$$

3. Данный подход основан на выражении [3]:

$$w_{d_{\min}}''' = w_{oc} \left[ \frac{1 - \varphi_{cp}}{1 - \varphi_{cp} \sqrt{1 - d_{\min}^2}} \right]^{4,7}.$$

Тогда по аналогии итоговое уравнение для ламинарных условий оседания примет вид

$$Q_{\mathcal{O}} = \left\{ \frac{(\rho_{\partial.\phi} - \rho_{\partial.c}) \cdot g}{18\mu_{\partial.c}} d_{\min}^2 \left[ \frac{1 - \varphi_{cp}}{1 - \varphi_{cp} \sqrt{1 - d_{\min}^2}} \right]^{4,7} + \frac{(\rho_{\partial.\phi} - \rho_{\partial.c}) g}{18\mu_{\partial.c}} \left[ \frac{1 - \varphi_{cp}}{1 - \varphi_{cp} \sqrt{1 - d_{\min}^2}} \right]^{4,7} \times \right. \\ \left. \times \frac{L}{(D_{\epsilon} - h_1 - h_2)} \right\} \frac{L}{(D_{\epsilon} - h_1 - h_2)} \cdot S_H \cdot \frac{1 - \varphi_{\kappa}}{1 - 0,5(\varphi_{\eta} + \varphi_{\kappa})}. \quad (14)$$

При переходном режиме:

$$Q_{\mathcal{O}} = \left\{ 0,153 \frac{(\rho_{\partial.\phi} - \rho_{\partial.c})^{0,714} \cdot d_{\min}^{1,142} \cdot g^{0,714}}{\rho_{\partial.c}^{0,286} \cdot \mu_{\partial.c}^{0,428}} \left[ \frac{1 - \varphi_{cp}}{1 - \varphi_{cp} \sqrt{1 - d_{\min}^2}} \right]^{4,7} + \right. \\ \left. + 0,153 \frac{(\rho_{\partial.\phi} - \rho_{\partial.c})^{0,714} \cdot d_{\min}^{1,142} \cdot g^{0,714}}{\rho_{\partial.c}^{0,286} \cdot \mu_{\partial.c}^{0,428}} \left[ \frac{1 - \varphi_{cp}}{1 - \varphi_{cp} \sqrt{1 - d_{\min}^2}} \right]^{4,7} \frac{L}{(D_{\epsilon} - h_1 - h_2)} \right\} \times \\ \times \frac{L}{(D_{\epsilon} - h_1 - h_2)} \cdot S_H \cdot \frac{1 - \varphi_{\kappa}}{1 - 0,5(\varphi_{\eta} + \varphi_{\kappa})}. \quad (15)$$

4. Данный подход основан на том, что оседающие капли движутся не через слой дисперсионной среды, а через слой водонефтяной эмульсии, свойства которой весьма отличаются от характеристик чистой дисперсионной среды и зависят прежде всего от концентрации дисперсионной фазы, а она является величиной переменной.

Вязкость эмульсии ( $\mu_{\mathcal{O}}$ ) в основном определяется вязкостью дисперсионной среды, температурой, концентрацией дисперсной фазы ( $\varphi_{\partial.\phi}$ ) и степенью ее дисперсности и не является аддитивной величиной.

Существует множество формул для расчета вязкости эмульсий, взятых при определенной температуре [4, 5]. Например:

– формула Эйнштейна:

$$\mu_{\mathcal{O}} = \mu_{\partial.c} (1 + 2,5 \cdot \varphi_{\partial.\phi}),$$

которая справедлива при  $\varphi_{\partial.\phi} \leq 15$  % об.;

– формула Броутона – Сквайрса:

$$\mu_{\mathcal{O}} = \mu_{\partial.c} \cdot e^{K \cdot \varphi_{\partial.\phi} + c},$$

где  $K$  и  $c$  – константы, устанавливаемые опытным путем, формула справедлива при  $\varphi_{\partial.\phi} \leq 50$  % об.

Неплохие результаты дает формула Монсона:

$$\mu_{\mathcal{O}} = \mu_{\partial.c} (1 + 2,5 \cdot \varphi_{\partial.\phi} + 9,3 \cdot \varphi_{\partial.\phi}^2 + 50 \cdot \varphi_{\partial.\phi}^3), \quad (16)$$

которая справедлива при  $\varphi_{\partial.\phi} \leq 70$  % об.

Для обратных эмульсий вязкость в диапазоне концентраций дисперсной фазы от 0 до 40 % об. увеличивается приблизительно в 3 раза, зависимость вязкости от температуры обратно пропорциональна. В районе концентраций дисперсной фазы порядка 74,6 % об. происходит самопроизвольное превращение обратной эмульсии в прямую [2].

Плотность эмульсии ( $\rho_{\text{э}}$ ) подчиняется правилу аддитивности и может быть рассчитана по формуле

$$\rho_{\text{э}} = \rho_{\text{д.с}}(1 - \varphi_{\text{д.ф}}) + \rho_{\text{д.ф}} \cdot \varphi_{\text{д.ф}}. \quad (17)$$

Теперь выберем наиболее универсальную формулу Монсона (16) и формулу плотности эмульсии (17). Формулы (14–15) примут вид для ламинарных условий оседания:

$$Q_{\text{э}} = \left\{ \frac{(\rho_{\text{д.ф}} - \rho_{\text{э}}) \cdot g}{18\mu_{\text{э}}} d_{\text{min}}^2 \left[ \frac{1 - \varphi_{\text{ср}}}{1 - \varphi_{\text{ср}} \sqrt{1 - d_{\text{min}}^2}} \right]^{4,7} + \frac{(\rho_{\text{д.ф}} - \rho_{\text{э}}) \cdot g}{18\mu_{\text{э}}} d_{\text{min}}^2 \times \right. \\ \left. \times \left[ \frac{1 - \varphi_{\text{ср}}}{1 - \varphi_{\text{ср}} \sqrt{1 - d_{\text{min}}^2}} \right]^{4,7} \frac{L}{(D_{\text{е}} - h_1 - h_2)} \right\} \frac{L}{(D_{\text{е}} - h_1 - h_2)} \cdot S_{\text{H}} \cdot \frac{1 - \varphi_{\text{к}}}{1 - 0,5(\varphi_{\text{н}} + \varphi_{\text{к}})},$$

и при переходном режиме:

$$Q_{\text{э}} = \left\{ 0,153 \frac{(\rho_{\text{д.ф}} - \rho_{\text{э}})^{0,714} \cdot d_{\text{min}}^{1,142} \cdot g^{0,714}}{\rho_{\text{э}}^{0,286} \cdot \mu_{\text{э}}^{0,428}} \left[ \frac{1 - \varphi_{\text{ср}}}{1 - \varphi_{\text{ср}} \sqrt{1 - d_{\text{min}}^2}} \right]^{4,7} + \right. \\ \left. + 0,153 \frac{(\rho_{\text{д.ф}} - \rho_{\text{э}})^{0,714} \cdot d_{\text{min}}^{1,142} \cdot g^{0,714}}{\rho_{\text{э}}^{0,286} \cdot \mu_{\text{э}}^{0,428}} \left[ \frac{1 - \varphi_{\text{ср}}}{1 - \varphi_{\text{ср}} \sqrt{1 - d_{\text{min}}^2}} \right]^{4,7} \frac{L}{(D_{\text{е}} - h_1 - h_2)} \right\} \times \\ \times \frac{L}{(D_{\text{е}} - h_1 - h_2)} \cdot S_{\text{H}} \cdot \frac{1 - \varphi_{\text{к}}}{1 - 0,5(\varphi_{\text{н}} + \varphi_{\text{к}})}.$$

Таким образом, разработан алгоритм расчета основополагающих процессов при подготовке продукции скважин, который позволит более обосновано выбрать типоразмеры отстойного оборудования, что не только обеспечит значительную экономию материальных и денежных ресурсов, но и повысит качество отстоя водонефтяных эмульсий. Авторы рекомендуют применение первого варианта как наиболее глубоко проработанного и проверенного на практике.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Борисевич Ю.П., Краснова Г.З.* Технологический расчет отстойной аппаратуры. – Самара: СамГТУ, 2009. – 87 с.
2. *Борисевич Ю.П., Хохлова Н.Ю.* Процесс гравитационного отстоя полидисперсных частиц в движущейся жидкости // *Естественные и технические науки.* – М.: Спутник, 2015. – № 2. – С. 80–85.  
Проблемы нефти и газа - это название спецвыпуска? Тогда по-другому надо оформлять.
3. *Борисевич Ю.П.* Моделирование процесса гравитационного отстоя полидисперсных частиц в движущейся жидкости // *Известия Самарского научного центра РАН. Спец. вып. Проблемы нефти и газа: Сб. науч. тр.* – Самара, 2006. – С. 124.
4. *Лутюшкин Г.С., Дунюшкин И.И.* Сборник задач по сбору и подготовке нефти, газа и воды на промыслах. – М.: Недра, 1985. – 135 с.
5. *Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А.* Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1981. – 560 с.

*Статья поступила в редакцию 13 февраля 2015 г.*

## THE MODELING OF REVERS-WATER-OIL EMULSIONS BREAKING BY COLD STACK

***Y.P. Borisevich, N.Y. Khokhlova***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*In this work, we developed four options of the algorithm for modeling the process for reverse water-oil emulsions destruction by cold stack incoming to a horizontal settler under a water pad. We made a model considering property of vector velocity sedimentation of dispersed particles in a moving fluid; with considering the summands of velocity vectors modular values; with considering the regime sedimentation of dispersed particles; with considering the replacement of the disperse phase on real emulsion/ This approach allows you to choose a reasonably standard sizes settling equipment.*

**Keywords:** *emulsion, the algorithm of calculation, globule, settling vessel, the disperse phase.*