



УДК 628.334.5.336.43

**Урмитова Н.С.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [urmitova@mail.ru](mailto:urmitova@mail.ru)

**Абитов Р.Н.** – кандидат педагогических наук, доцент

E-mail: [a\\_runar@mail.ru](mailto:a_runar@mail.ru)

**Хисамеева Л.Р.** – доцент

E-mail: [KhisameevaLiliya@mail.ru](mailto:KhisameevaLiliya@mail.ru)

**Низамова А.Х.** – старший преподаватель

E-mail: [Anizamova@mail.ru](mailto:Anizamova@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

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

## Оценка сил, способствующих разрушению частиц нефти в коалесцирующей насадке

### Аннотация

При различных режимах фильтрации через коалесцирующую насадку одновременно могут происходить процессы дробления и коалесценции частиц нефти. Структура поверхностных слоев на границе раздела фаз «нефть – вода» многообразна по своему компонентному составу и очень сложно его оценить.

В статье представлена оценка сил, способствующая разрушению частиц нефти в коалесцирующей насадке. Оценка сил действующих на частицы нефти в фильтрационном потоке, показывает, что при турбулентном режиме фильтрации в коалесцирующей насадке работают силы, способствующие процессу дробления и коалесценции нефтяных частиц при гидродинамическом режиме.

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

В установках очистки нефтесодержащих сточных вод (НСВ) коалесцирующие насадки применяются для интенсификации процессов очистки НСВ, как ступень обработки перед отстаиванием (в том числе в комбинации с полочным блоком), флотацией, фильтрованием, гидроциклонами, жидкостной контактной массой, воздействием ультразвукового и электрического полей.

В коалесцирующей насадке при разных режимах фильтрации одновременно могут происходить процессы дробления и коалесценции частиц нефти, интенсивность которых различна в разных точках загрузки. Силы, противодействующие разрушению частиц нефти, обусловлены структурно-механической прочностью поверхностных адсорбционных слоев дисперсной фазы, т.е. бронирующих оболочек на частицах нефти. Структура поверхностных слоев на границе «нефть-вода» сложна и многообразна по компонентному составу. Поверхностные слои бронирующих оболочек обладают аномальной вязкостью, возрастающей во времени в сотни и тысячи раз, что приводит к увеличению стойкости («старению») эмульсии [1, 2, 3, 4].

Результаты количественной оценки прочности бронирующих оболочек на границе раздела фаз «нефть-вода», приведены в работах [3, 4], которые показывают, что критическое давление, вызывающее разрыв пленки, находится в пределах  $P_{кр} = 600-1100$  дин/см<sup>2</sup>.

Силы, способствующие разрушению частиц нефти в коалесцирующей насадке действуют в пространстве между гранулами, в вихревых зонах перед и за гранулами и на поверхности гранул. Воздействие сил на бронирующую оболочку будем оценивать через давление, ими оказываемое.

На нефтяную частицу набегающий поток жидкости воздействует с силой [3, 4]:

$$F_{ин} = \frac{K_{\phi} \rho_c (V_c - V_q)^2 S}{2}, \quad (1)$$

где  $K_{\phi}$  – коэффициент формы частиц нефти;  $V_c$  и  $V_q$  – скорость движения среды и частиц нефти;  $S$  – площадь поперечного сечения частицы;  $\rho_c$  – плотность среды. При  $\rho_c = 1,1$  г/см<sup>3</sup>,  $(V_c - V_q)$  – см/с, получаем, что на единицу поверхности частицы сила  $F_{ин}$  оказывает

давление 111 дин/см<sup>2</sup>, что недостаточно для разрушения бронирующей оболочки. В восходящем потоке  $F_{\text{нп}}$  направлена вверх, параллельно оси аппарата.

Величина силы взаимного столкновения частиц нефти оценивается из выражения [3, 4]:

$$F_c = K_p \rho_n \frac{\pi d^3 (V_j - V_i)}{6 \Delta t} C_i, \quad (2)$$

где  $K_p$  – коэффициент вероятности столкновения частиц;  $\rho_n$  – плотность частиц нефти;  $V_j$ ,  $V_i$  – скорость движения частиц  $j$ -й и  $i$ -й фракций, соответственно;  $C_i$  – относительная концентрация  $i$ -й фракции;  $\Delta t$  – время взаимодействия частиц между собой.

Продолжительность времени взаимодействия частиц  $\Delta t$  должна превышать  $\Delta t_{\text{кр}}$ , при котором может происходить разрушение частиц. Критическое время взаимодействия определяется по формуле [3, 4]:

$$\Delta t_{\text{кр}} = \frac{2d}{V_c} \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_c}}, \quad (3)$$

При  $\rho_n = 0,87$  г/см<sup>3</sup>,  $V_c = 2,8$  см/с ( $V_c$  – скорость фильтрации),  $d = 2 \cdot 10^{-3}$  см получаем  $\Delta t_{\text{кр}} = 1,26 \cdot 10^{-3}$  с, при  $d = 2 \cdot 10^{-1}$  см,  $\Delta t_{\text{кр}} = 1,26 \cdot 10^{-1}$  с.

Принимаем  $K_p = 0,5$ ,  $C_i = 0,1\%$ : [3, 4]. Подстановка в формулу (2) дает для силы  $F_{\text{ст}}$ , приходящейся на единицу поверхности частицы значение  $P_{\text{ст}} \sim 10^{-1}$  дин/см<sup>2</sup>, что явно недостаточно для разрушения бронирующих оболочек.

На частицы нефти при турбулентном режиме фильтрации действуют силы, обусловленные турбулентными пульсациями скорости. Полагая, что турбулентность в коалесцирующей насадке однородная и изотропная, изменение пульсации скорости на расстоянии порядка диаметра частицы можно оценить из соотношения [3, 4, 5]:

$$V_{\text{пульс}} \sim (d \cdot \varepsilon_0)^{1/3}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_0$  – удельная диссипация кинетической энергии жидкости в тепло.

Разность динамических напоров, действующих на противоположные стороны капли диаметром  $d$ , равна [3, 4]:

$$Q_m = k_f \rho_c \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \sim \frac{k_f \rho_c}{2} (d \varepsilon_0)^{2/3}. \quad (5)$$

При оценке видно, что эта величина может достигать значений  $Q_m \sim 10^2$  дин/см<sup>2</sup>, т.е. мелкомасштабные пульсации турбулентности вносят весомый вклад в деформирование и разрушение бронирующих оболочек.

Турбулентный поток вблизи поверхности гранул и стенок фильтра существенно неоднороден. Дробление частиц у стенок аппарата и вблизи поверхности гранул обусловлен, в основном, резким изменением средней скорости течения в погранслое. Вблизи поверхности разность динамических напоров действующих на противоположные стороны капли, равна:

$$Q_{\text{нс}} = 6 \rho_c V_{\text{пульс}}^2 \left\{ \left[ \ln \frac{y+d}{\delta_0} \right]^2 \left[ \ln \frac{y}{\delta_0} \right]^2 \right\}, \quad (6)$$

где  $\delta_0 = v/V_{\text{пульс}}$ ,  $y$  – расстояние от поверхности (стенки) до центра капли. При  $y \gg d$  получается выражение:

$$Q_{\text{нс}} \approx 25 \rho_c V_{\text{пульс}}^2 \frac{d}{2y} \ln \frac{y}{\delta_0}, \quad (7)$$

которое для  $V_{\text{пульс}} \sim 111$  см/с и  $y = 5 \cdot 10^{-2}$  см дает  $Q_{\text{нс}} \sim 10$  дин/см<sup>2</sup>, что недостаточно для дробления частиц. Этот механизм является существенным и даже доминирующим для дробления частиц нефти в трубопроводах и гидроциклонах. В фильтрах же он приводит к деформации бронирующих оболочек.

Силу, с которой частицы нефти прижимаются к поверхности гранул восходящим потоком жидкости, можно оценить по аналогии с силой давления струи на плоскую стенку [3, 4]:

$$F_{\text{нк}} = r_c V_c Q, \quad (8)$$

где  $Q$  – расход жидкости,  $V_c$  – скорость фильтрации. Для коалесцирующей насадки при  $\rho_c = 1,1$  г/см<sup>3</sup>,  $V_c = 2,8$  см/с,  $Q = 9,4 \cdot 10^2$  см<sup>3</sup>/с получаем  $F_{\text{нк}} = 2,89 \cdot 10^3$  дин.

На единицу поверхности гранулы поток оказывает давление  $\sim 10^2$  дин/см<sup>2</sup>, что вносит существенный вклад в дробление и последующую коалесценцию капель нефти. Такого же порядка силы возникают при повороте потока после соударения с гранулами насадки, а также при косом ударе частиц жидкости о поверхность гранул.

Оценим также другие силы, действующие на частицу. Сила Архимеда действует на всю частицу в целом, не приводя к деформации ее поверхности. Она способствует выносу частицы из фильтра и оценивается выражением [3, 4]:

$$F_A = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_c - \rho_l) g, \quad (9)$$

Гидродинамические силы. При движении относительно жидкости частицы нефти вызывают в ней течения, в которые вовлекаются другие частицы. Величина и направление гидродинамической силы зависят от характера вызываемого течения. В частности, при вязком режиме течения (в вязком подслое вблизи стенок фильтра и поверхности шариков насадки) при движении частиц в одном направлении сопротивление среды уменьшается.

Теория гидродинамического взаимодействия при больших  $r$  была разработана Кирхгофом [3, 4], который показал, что капелька радиусом  $r_1$ , движущаяся со скоростью  $U$  относительно среды, действует на другую капельку радиусом  $r_2$  с силой, не зависящей от движения последней. Если расстояние между капельками  $r \gg r_1, r_2$ , то составляющие силы  $F_2$  вдоль линии центров и перпендикулярная к ней имеют вид:

$$F_{rr} = \frac{3\pi\rho_c r_1^3 r_2^3 U^2}{r^4} \left( \frac{3}{2} \cos 2\theta + \frac{1}{2} \right); F_{rt} = \frac{3\pi\rho_c r_1^3 r_2^3 U^2}{r^4} \sin 2\theta, \quad (10)$$

где  $\theta$  – угол между линией центров и направлением движения. При  $r = 5 \cdot 10^{-2}$  см,  $r_1 = r_2 = 5 \cdot 10^{-3}$  см,  $U = 10 \frac{\text{см}}{\text{с}}$  получаем  $F_r \sim 2,5 \cdot 10^{-6}$  дин. Несмотря на малую величину, эта сила способствует сближению частиц.

В сильно турбулированном потоке при движении, тангенциальном к стенке аппарата или к поверхности гранул насадки, капелька нефти притягивается к стенке (или к грануле) с силой [3, 4, 6, 7]:

$$F_{np} = \frac{3\pi\rho_c r_1^6 V_1^2}{16y^4}, \quad (11)$$

где  $y$  – расстояние от центра капельки до стенки (поверхности гранулы). Если положить  $y = 10^{-2}$  см,  $V_1 = 10$  см/с, получим  $F_{np} \sim 10^{-4}$  дин. Эта сила является одной из причин ускорения коалесценции на поверхности гранул насадки.

Когда воздействуем на эмульсию переменным электрическим полем или ультразвуком частицы начинают осциллировать с частотой возмущающего поля. Амплитуда вынужденных колебаний сферических капелек максимальна при совпадении частоты возмущающего поля с собственной частотой колебаний сферической капельки. При осцилляции относительно дисперсной среды частицы вызывают течения, которые воздействуют на другие частицы. Между осциллирующими частицами возникает сила Бьеркнесса, которая дается соотношением [3, 4]:

$$F_B = 6\pi\rho_n \frac{r_1^3 r_1^3 w^2}{r^2} \cos\varphi, \quad (12)$$

где  $w$  – частота колебаний,  $r$  – расстояние между центрами капель,  $\varphi$  – сдвиг фаз между колебаниями поверхностей капель.

При  $r = 10^{-1}$  см,  $r_1 = r_2 = 5 \times 10^{-3}$  см получаем  $F_B = 3 \times 10^{-11} \omega^2 \cos\varphi$  (дин), т.е. при  $w \sim 10^5$  рад/с сила Бьеркнесса достигает значительной величины. Эта сила способствует ускорению коалесценции в высокочастотных электрических и ультразвуковых полях.

Далее оценим также силу сопротивления  $F_c$ , возникающую при движении нефтяных частиц относительно дисперсной среды.

Рыбчинским было получено выражение для  $F_c$  при установившемся движении вязкого шарика относительно среды со скоростью  $U$  в виде [3, 4]:

$$F_c = 2\pi\eta r_1 \frac{2\eta + 3\eta'}{\eta + \eta'} U, \quad (13)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость дисперсионной среды;  $\eta'$  – динамическая вязкость шарообразной капельки. При  $U \sim 10$  см/с получается  $F_c \sim 10^{-2}$  дин, т. е. является весьма значительным.

Силы давления. При потенциальном течении жидкости вокруг нефтяной частицы радиусом  $r_1$  распределение давления на его поверхности дается формулой [3, 4, 8]:

$$p = p_0 + \frac{pU^2}{8} (9\cos^2\theta - 5) + \frac{p}{2} r_1 n \frac{dU}{dt}, \quad (14)$$

где  $\theta$  – угол между единичным вектором  $n$ , проведенным из центра частицы к данной точке ее поверхности, и скоростью ее движения относительно дисперсионной среды. При  $U = 10$  см/с перепад давлений в разных точках поверхности частицы может достигать величины  $\sim 50$  дин/см<sup>2</sup> и будет способствовать ослаблению бронированных оболочек частиц нефти.

Проведенная оценка сил действующих на частицы нефти в фильтрационном потоке, показывает, что при турбулентном режиме фильтрации в коалесцирующей насадке работают силы, способствующие процессу дробления и коалесценции нефтяных частиц. Эти силы действуют в пространстве между гранулами в вихревых зонах за гранулами, на поверхности гранул и стенок аппарата.

Основными факторами, способствующими ослаблению бронирующих оболочек частиц нефти, их дроблению с последующей коалесценцией являются: мелкомасштабные турбулентные пульсации; градиент средней скорости течения у стенок и у поверхности гранул; сила давления набегающего потока жидкости на поверхность гранул насадки; неоднородность распределения давления дисперсионной среды на поверхности частицы при их относительном движении.

Роль сил гидродинамического взаимодействия частиц нефти между собой и с поверхностью гранул насадки заключается в притяжении частиц друг к другу и к гидрофобной поверхности гранул, что ускоряет процесс коалесценции.

### Список библиографических ссылок

1. 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.
2. Позднышев Г.Н. Стабилизация и разрушение нефтяных эмульсий. – М.: Недра, 1982. – 221 с.
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. Урмитова Н.С. Интенсификация процессов очистки нефтесодержащих сточных вод на основе применения гранулированных коалесцирующих материалов. Дис...канд. техн. наук. – Казань: КИСИ, 1993. – 252 с.
5. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теоретическая физика. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988, Т. 4.
6. Седлухо Ю.П., Липкевич Т.П. Моделирование гидродинамических условий процесса коалесценции эмульгированных в воде нефтепродуктов в слое зернистой загрузки коалесцирующих фильтров // Строительство и архитектура. Сер. Изв. вузов. 1989, № 10. – С. 88-90.
7. Урмитова Н.С., Фаткуллин Р.Г., Адельшин А.Б. Движение вязкой жидкости в порах гранулированной коалесцирующей насадки. Исследования сетей, аппаратов и сооружений водоснабжения и канализации // Межвуз. сб. тр. – Казань: КИСИ, 1990. – С. 25-32.
8. Рулев Н.Н., Седлухо Ю.П. Роль гидродинамического и гравитационного механизмов в работе коалесцирующего фильтра // Химия и технология воды, 1990, т. 12, № 5. – С. 393-397.

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

E-mail: [urmitova@mail.ru](mailto:urmitova@mail.ru)

**Abitov R.N.** – candidate of pedagogical sciences, associate professor

E-mail: [a\\_runar@mail.ru](mailto:a_runar@mail.ru)

**Khisameeva L.R.** – associate professor

E-mail: [Khisameeva.Liliya@mail.ru](mailto:Khisameeva.Liliya@mail.ru)

**Nizamova A.Kh.** – senior lecturer

E-mail: [Anizamova@mail.ru](mailto:Anizamova@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

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

### Evaluation of the forces contributing to the oil particles destruction in the coalescing nozzle

#### Resume

Coalescing nozzles are used for the intensification of the oily wastewaters treatment processes as a step prior to sedimentation, flotation, filtration, hydrocyclones, liquid contact mass, effects of the sound and electric fields in the oily wastewaters treatment plants.

Processes of fragmentation and coalescence of the oil particles whose intensity is different in different parts of a stock can occur simultaneously in coalescing nozzle at different filtration modes.

Evaluation of the forces acting on the particles in the filtering flow shows that the forces contributing the processes of fragmentation and coalescence of the oil particles in a hydrodynamic filtration mode work in a turbulent mode.

**Keywords:** coalescing nozzle, armoring shells, oil particles, evaluation of the forces, incident flow of fluid, fragmentation and coalescence, adsorption layers, granules, turbulent mode.

#### Reference list

1. Adelshin A.A., Adelshin A.B., Urmitova N.S. Hydrodynamic cleaning of oilfield wastewater by applying swirling flows. Monograph. – Kazan: KSUAE, 2011. – 245 p.
2. Pozdnyshv G.N. Oil emulsion stabilization and destruction. – M.: Nedra Pub., 1982. – 221 p.
3. Adelshin A.B., Urmitova N.S. Using of a hydrodynamic nozzle with a coarse load for oily wastewater treatment intensification. Monograph. – Kazan: KSUAE, 1997. – 249 p.
4. Urmitova N.S. Intensification of oily wastewater treatment by applying granular coalescing materials. Candidate of Engineering Sciences Thesis. – Kazan: KIEC, 1993. – 252 p.
5. Landau L.D., Lifshitz E.M. The Course of Theoretical Physics. Hydrodynamics. – M.: Nauka Pub, 1988, Vol. 4.
6. Sedlukho Yu.P., Lipkevich T.P. Modeling of the oil products emulsified in water coalescence processes' hydrodynamic conditions in the layer of the coalescing filters' granular stock // Engineering and Architecture. Proceedings of Higher Education series. 1989, № 10. – P. 88-90.
7. Urmitova N.S., Fatkullin R.G., Adelshin A.B. Motion of a viscous fluid in the pores of the granular coalescing nozzle. Networks, devices and structures of water supply and sanitation research // Interuniversity proc. – Kazan: KIEC, 1990. – P. 25-32.
8. Rulev N.N., Sedlukho Yu.P. The role of the hydrodynamic and gravitational mechanisms in the coalescing filter operation // Water chemistry and technology, 1990, Vol. 12, № 5. – P. 393-397.