



DOI 10.22363/2313-2310-2017-25-4-548-561

УДК 628.54

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ НЕФТЕПРОДУКТОВ ВО ФЛОТАЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ С ЭЖЕКЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ АЭРАЦИИ С ДИСПЕРГАТОРОМ

Е.С. Антонова

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)  
2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, Москва, Россия, 105005

В работе рассмотрена проблема очистки сточных вод от нефтепродуктов. Показаны основные преимущества и недостатки эжекционной системы аэрации, используемой при флотационной очистке воды. Отмечена важность применения математического моделирования для определения продолжительности процесса флотации. Для интенсификации флотационной очистки нефтесодержащей сточной воды предложено использование флотатора с эжекционной системой аэрации с диспергатором. Предложена математическая модель флотации нефтепродуктов, учитывающая особенности дисперсного состава пузырьков, генерируемых предлагаемой системой аэрации, и проведена экспериментальная проверка ее адекватности. На лабораторной флотационной установке проведены эксперименты по определению дисперсного состава пузырьков и извлекаемых частиц нефтепродуктов, а также исследованию кинетики процесса очистки. При отсутствии диспергатора средний размер пузырьков составил около 500 мкм, при использовании диспергатора получено 2 группы со средними размерами 55 мкм и 105 мкм. Подтверждено, что применение предлагаемой математической модели возможно для описания процесса очистки воды от нефтепродуктов. Представлено сравнение эффективностей очистки воды от нефтепродуктов при использовании диспергатора и без него. Установлено, что применение диспергатора наиболее эффективно для извлечения частиц размером 15–35 мкм и позволяет повысить эффективность очистки с 75% до 90% по сравнению с обычной эжекционной системой аэрации.

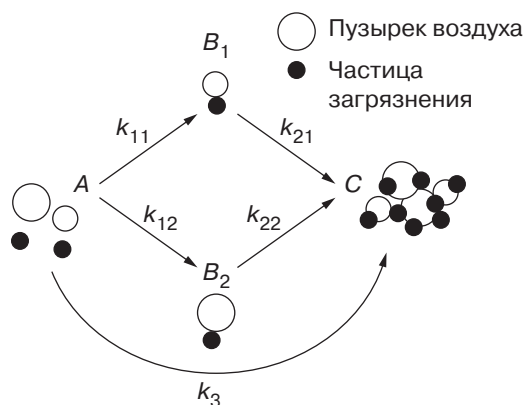
**Ключевые слова:** флотация, эжектор, диспергатор, очистка сточных вод, нефтепродукты, математическое моделирование

### Введение

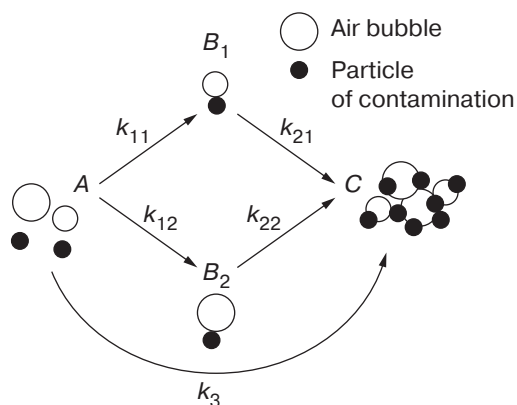
Проблема очистки сточных вод от нефтепродуктов актуальна в настоящее время. Нефтепродукты относятся к наиболее распространенным видам загрязнений, которые присутствуют в большинстве сточных вод. Флотация широко используется для очистки сточных вод от гидрофобных загрязнений, к которым относятся и нефтепродукты [1; 2]. Повышение эффективности флотационного метода очистки воды при снижении капитальных и эксплуатационных затрат является важнейшей задачей. Использование эжекционной системы аэрации дает ряд преимуществ: простота, надежность, невысокие эксплуатационные затраты. Однако

у нее имеется существенный недостаток: генерирование крупных пузырьков размерами 500–1000 мкм, что не позволяет достигать высокой эффективности очистки от мелкодисперсных загрязнений [3–5]. Для устранения этого недостатка предлагается использование специального диспергатора, при контакте с которым пузырьки дробятся до размеров 30–300 мкм [6]. Еще одна важная задача состоит в определении продолжительности процесса очистки воды во флотаторе. Обычно при расчете рабочего объема флотационного аппарата продолжительность очистки принимают 20–30 мин согласно существующим рекомендациям [7]. Однако на это влияют множество параметров как системы аэрации (размеры пузырьков, интенсивность аэрации), так и загрязнений (степень гидрофобности, размеры частиц, плотность) [8; 9]. Применение математической модели, учитывающей характерные особенности определенного процесса флотации, позволяет более точно определить его продолжительность, что дает возможность проектировать установки, обладающие большей экономичностью и компактностью при достижении требуемой эффективности очистки. Существуют различные математические модели флотации, например, модель Белоглазова, модели с порядком, отличным от единицы, трехпараметрические модели [10–12]. Но наиболее полно флотация описывается многостадийной моделью, представленной в работе [7]. Данная модель учитывает все стадии флотационного процесса: образование флотокомплекса, его всплытие, а также обратимые процессы. Однако она не может быть применена для описания процесса во флотаторе с эжекционной системой аэрации с диспергатором, так как в ней не учитывается полимодальность распределения размеров пузырьков, генерируемых рассматриваемой системой аэрации [6].

Модель флотации с использованием эжекционной системы аэрации с диспергатором, учитывающая полимодальность распределения, в общем виде рассмотрена в работе [13]. С учетом определенных ранее характеристик системы аэрации в частном случае модель для флотации нефтепродуктов будет выглядеть следующим образом (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема флотации нефтепродуктов:  
A — исходное состояние; B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, C — мелко  
и крупнодисперсные пузырьки и пенный слой  
соответственно; k<sub>11</sub>, k<sub>12</sub>, k<sub>21</sub>, k<sub>22</sub>, k<sub>3</sub> — константы



**Fig. 1.** Scheme of oil flotation

Процесс описывается системой дифференциальных уравнений (1) с начальными условиями (2)

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}C_A = -k_{11}C_A - k_{12}C_A - k_3C_A; \\ \frac{d}{dt}C_{B_1} = k_{11}C_A - k_{21}C_{B_1}; \\ \frac{d}{dt}C_{B_2} = k_{12}C_A - k_{22}C_{B_2}; \\ \frac{d}{dt}C_C = k_{21}C_{B_1} + k_{22}C_{B_2} + k_3C_A. \end{cases} \quad (1)$$

где  $C_A, C_{B_1}, C_{B_2}, C_C$  — концентрации частиц в исходном состоянии  $A$ , состоянии флотокомплексов с мелко и крупнодисперсными пузырьками  $B_1, B_2$  и в пенном слое  $C$  соответственно. Переходы между состояниями описываются константами  $k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}, k_3$ .

Начальные условия при  $t = 0$ :

$$\begin{aligned} C_A(0) &= C_{A_0}; \\ C_{B_1}(0) &= 0; \\ C_{B_2}(0) &= 0; \\ C_C(0) &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Вероятность образования флотокомплексов с мелко и крупнодисперсными пузырьками характеризуется константами  $k_{11}, k_{12}$ , которые могут быть определены по формуле:

$$k_{11,12} = \frac{1,5q_{1,2}E_{1,2}}{k_{0,1,2}D_{1,2}}, \quad (3)$$

где  $q_{1,2}$  — интенсивность аэрации для мелко и крупнодисперсных пузырьков,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $E_{1,2}$  — эффективность захвата частиц мелко и крупнодисперсными пузырьками, о.е.;  $D_{1,2}$  — средний диаметр мелко и крупнодисперсных пузырьков, м;  $k_{0,1,2}$  — фактор полидисперсности мелко и крупнодисперсных пузырьков, о.е.

Общая интенсивность аэрации  $q$  может быть определена как отношение расхода воздуха к площади поверхности воды во флотаторе. Интенсивность аэрации для мелко и крупнодисперсных пузырьков может быть определена исходя из определения доли воздуха, приходящегося на каждую группу пузырьков:

$$q_{1,2} = q \frac{D_{1,2}^3 \cdot n_{1,2}}{D_1^3 \cdot n_1 + D_2^3 \cdot n_2}, \quad (4)$$

где  $n_{1,2}$  — доля мелко и крупнодисперсных пузырьков.

Эффективность захвата частиц и фактор полидисперсности определяются по зависимостям, приведенным в работах [14; 15].

Всплытие флотокомплексов с мелко и крупнодисперсными пузырьками характеризуется константами  $k_{31}$ ,  $k_{32}$ , которые определяют по формуле:

$$k_{31,32} = \frac{v_{31,32}}{h}, \quad (5)$$

где  $v_{31,32}$  — скорость всплытия флотокомплексов с мелко и крупнодисперсными пузырьками, м/с;  $h$  — высота уровня воды, м.

При этом скорость всплытия определялась по зависимостям, приведенным в работах [8; 9].

Константа, характеризующая самостоятельное всплытие частиц нефтепродуктов, определяется по формуле:

$$k_7 = \frac{v_{\text{вспл}}}{h}, \quad (6)$$

где  $v_{\text{вспл}}$  — скорость всплытия частиц загрязнений, м/с.

Скорость всплытия частиц нефтепродуктов может быть приближенно определена по формуле

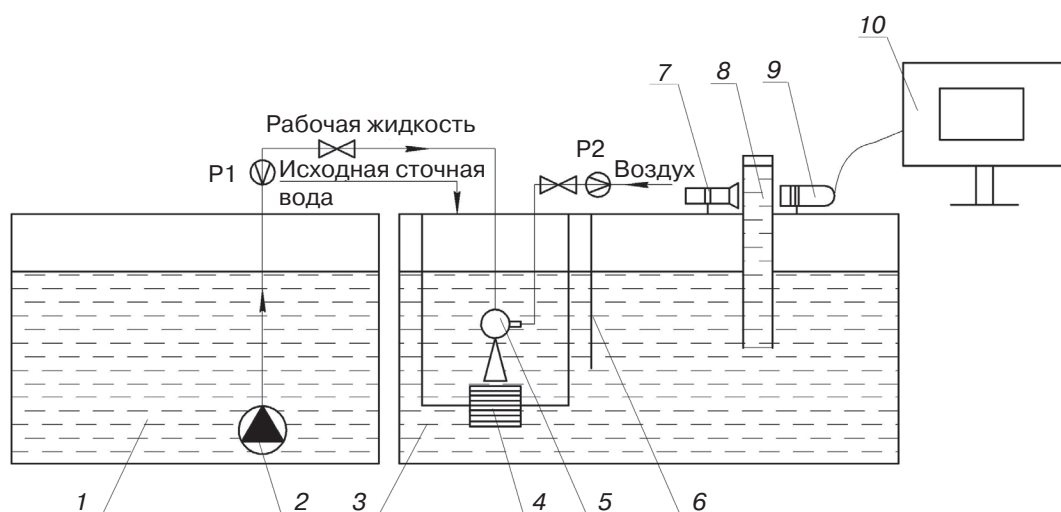
$$v_{\text{вспл}} = \frac{\bar{D}^2 g (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{ч}})}{18\mu}, \quad (7)$$

где  $\rho_{\text{в}}$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{ч}}$  — плотность частиц загрязнений, кг/м<sup>3</sup>.

## Материалы и методы

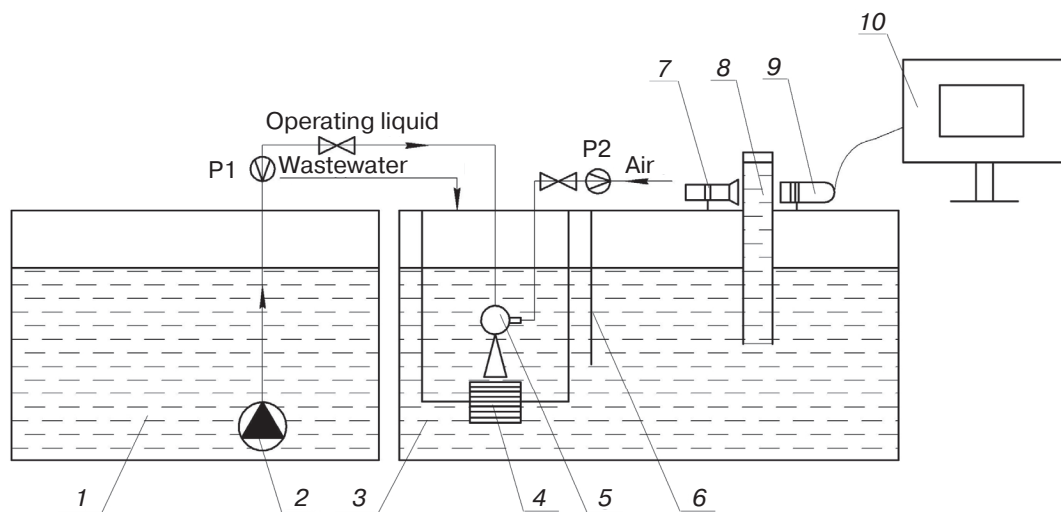
Эксперимент по исследованию флотационного извлечения нефтепродуктов разного дисперсного состава был проведен на установке (рис. 2). Для приготовления модельного стока использовалось моторное масло ( $\rho_{\text{м}} = 920$  кг/м<sup>3</sup>), исходная концентрация нефтепродуктов в воде составляла 30–35 мг/л. В ходе эксперимента был определен дисперсный состав извлекаемых частиц и эффективность их извлечения при флотации с диспергатором и без диспергатора.

Процесс флотации осуществлялся следующим образом. Во флотационную камеру 3 помещалось 2 л исходной сточной воды. В течение 3 мин производилась аэрация воды, при этом вода подавалась насосом 2 из камеры 1. Расход рабочей жидкости на стадии аэрации составлял 20 л/ч, расход воздуха составлял 15 л/ч. По окончании аэрации объем воды в камере составил 3 л. Далее насос для подачи рабочей жидкости был отключен в целях создания в камере спокойной обстановки для всплытия флотокомплексов. Система для фиксирования капель нефтепродуктов и пузырьков состоит из емкости 8, в которую набиралась исследуемая жидкость, USB-микроскопа 9, подключенного к компьютеру 10, и источника света 7. Фиксирование капель нефтепродуктов и отбор проб для анализа проводились в исходный момент времени и далее каждые 5 мин.



**Рис. 2.** Схема лабораторной установки:

1 — камера чистой воды; 2 — насос; 3 — флотационная камера; 4 — диспергатор; 5 — эжектор; 6 — перегородка; 7 — источник света; 8 — емкость; 9 — USB-микроскоп; 10 — компьютер



**Fig. 2.** Scheme of laboratory setup:

1 — chamber for clean water; 2 — pump; 3 — flotation chamber; 4 — disperser; 5 — ejector; 6 — semi-wall; 7 — source of light; 8 — container; 9 — USB-microscope; 10 — computer

В ходе эксперимента были измерены частицы нефтепродуктов с десяти фотографий для каждого случая. Так же были определены размеры пузырьков согласно методике, изложенной в работах [6; 16].

При статистической обработке результатов получены функции плотностей распределения частиц по размерам и данные о количестве частиц определенного размера. По полученным данным была определена продолжительность процесса

очистки и вычислены эффективности извлечения частиц каждой фракции по формуле

$$\eta_i = \frac{N_{0i} - N_i}{N_{0i}}, \quad (8)$$

где  $N_{0i}$  — количество измеренных частиц каждой фракции в исходной воде;  $N_i$  — количество измеренных частиц каждой фракции в очищенной воде.

Далее эффективности извлечения частиц каждой фракции были рассчитаны теоретически с использованием предлагаемой модели. По полученным результатам построены графики экспериментальной и теоретической зависимостей эффективности флотационного извлечения частиц нефтепродуктов от их размеров.

Общая эффективность очистки воды от нефтепродуктов была определена по формуле

$$\eta_{\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n N_{0i} d_{\text{чи}}^3 - \sum_{i=1}^n N_i d_{\text{чи}}^3}{\sum_{i=1}^n N_{0i} d_{\text{чи}}^3}, \quad (9)$$

где  $d_{\text{чи}}$  — средний диаметр частиц каждой фракции, мкм.

Далее было произведено сравнение эффективностей флотационного извлечения частиц различного размера без диспергатора и при его использовании.

Так же была определена концентрация нефтепродуктов в отобранных пробах и построена теоретическая кривая их извлечения. При расчете констант был использован среднеобъемный диаметр частиц нефтепродуктов, определенный по формуле:

$$d_{\text{ч}} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^n N_i d_{\text{чи}}^3}{N}}, \quad (10)$$

где  $N$  — общее количество частиц.

### Результаты и обсуждение

Функции плотностей распределения частиц нефтепродуктов по размерам для моторного масла при флотации с использованием диспергатора и без него представлены на рисунке 3. При флотации с использованием эжекционной системой аэрации с диспергатором продолжительность очистки воды составило 25 мин. После этого времени функция плотности распределения изменялась незначительно. Важно отметить, что при флотации без диспергатора за 25 мин получена функция плотности распределения, близкая к функции плотности распределения при флотации с диспергатором за 5 мин.

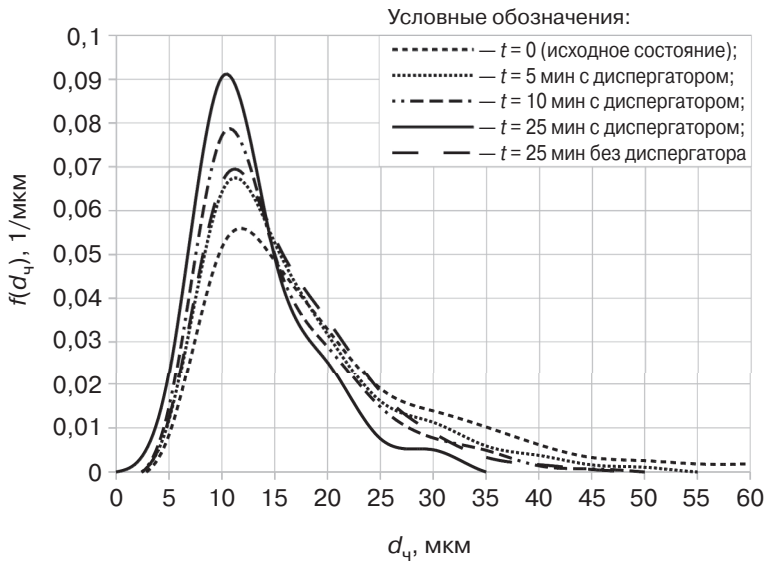


Рис. 3. Функции плотности распределения частиц моторного масла по размерам

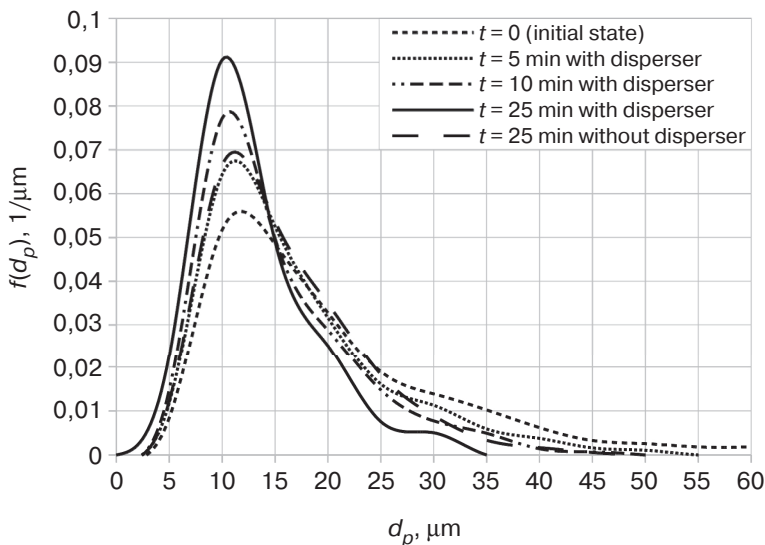
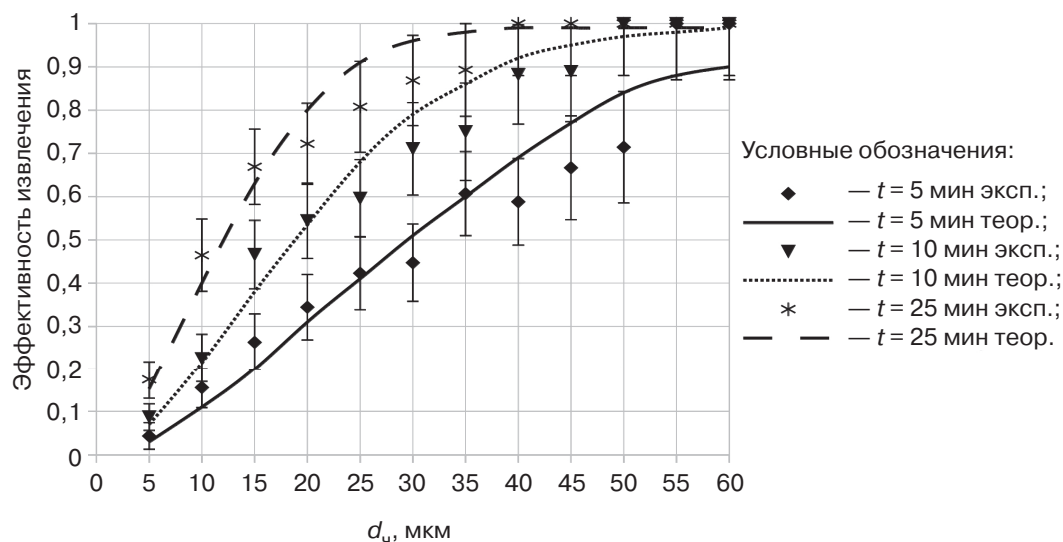


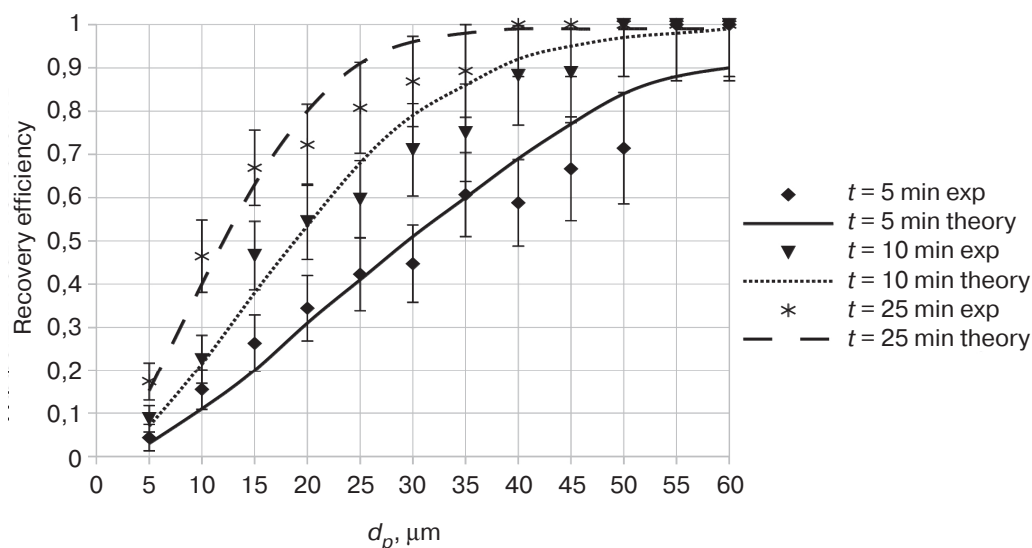
Fig. 3. Probability density function of motor oil particles size

При использовании диспергатора было выделено две группы пузырьков со следующими характеристиками: средний диаметр первой группы пузырьков составляет 55 мкм со среднеквадратическим отклонением 18 мкм, доля пузырьков составляет 66%; средний диаметр второй группы пузырьков — 105 мкм со среднеквадратическим отклонением 15 мкм (28%), доля пузырьков — 15 мкм; доля пузырьков с диаметрами 105—300 мкм составила около 6%. Данная часть спектра не является значимой и при описании процесса не учитывалась. При отсутствии диспергатора наблюдалось выделение пузырьков в диапазоне 100—1000 мкм со средним диаметром 500 мкм.

Параметры, необходимые для расчета констант, и константы определены по формулам (3)—(7). Экспериментальные эффективности извлечения определены по формуле (8), теоретические — по решению системы дифференциальных уравнений (1). Теоретическая зависимость и экспериментальные результаты эффективности извлечения от диаметра капель моторного масла при разной продолжительности флотации представлены на рисунке 4. Для времени окончания процесса (25 мин) на рисунке 5 показано сравнение эффективностей извлечения частиц при использовании диспергатора и при его отсутствии. Максимальный эффект диспергатора наблюдается при извлечении частиц размерами 15—35 мкм.

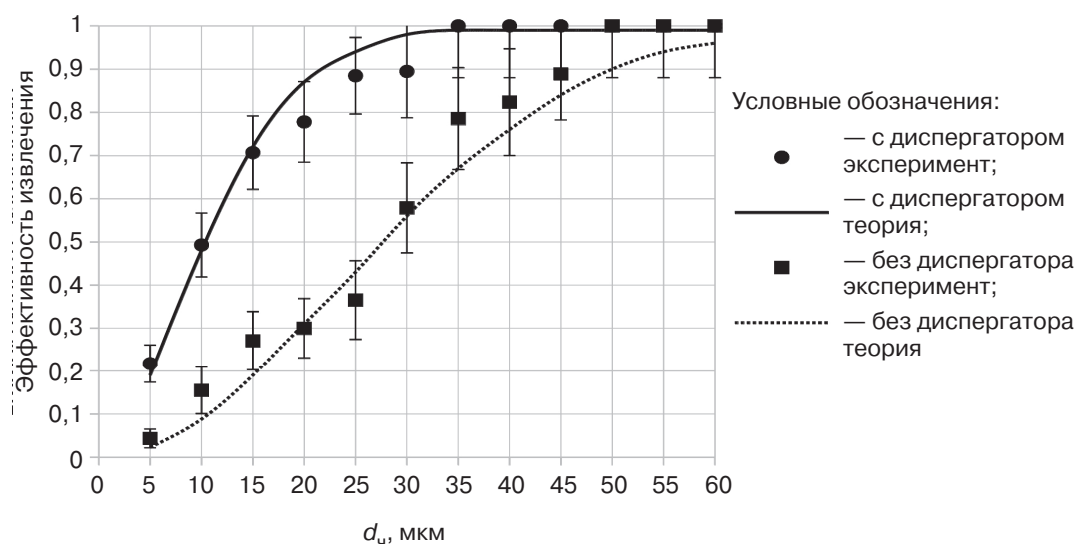


**Рис. 4.** Теоретическая и экспериментальная зависимости эффективности извлечения частиц моторного масла от диаметра частиц при разной продолжительности флотации

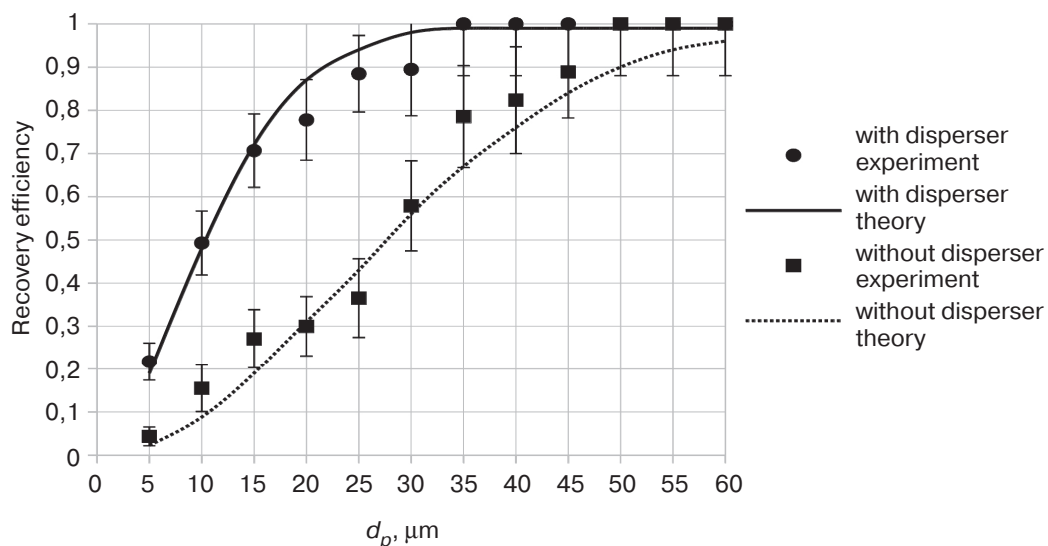


**Fig. 4.** Theoretical and experimental dependence of recovery of motor oil particles on particles size for different time of flotation





**Рис. 5.** Теоретическая и экспериментальная зависимости эффективности извлечения частиц моторного масла от диаметра частиц при продолжительности флотации 25 мин с диспергатором и без диспергатора

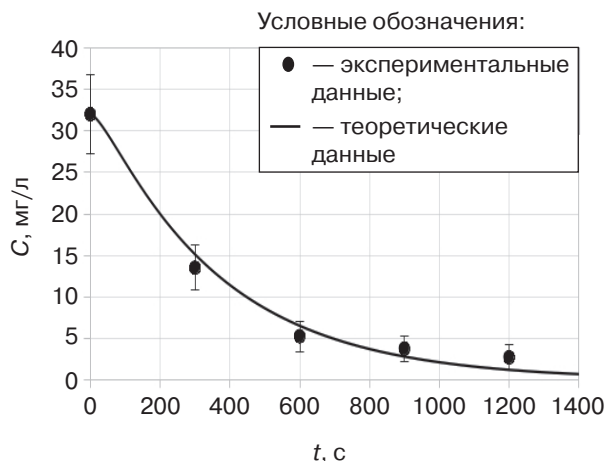


**Fig. 5.** Theoretical and experimental dependence of recovery of motor oil particles on particles size for the time of flotation 25 minutes with and without disperser

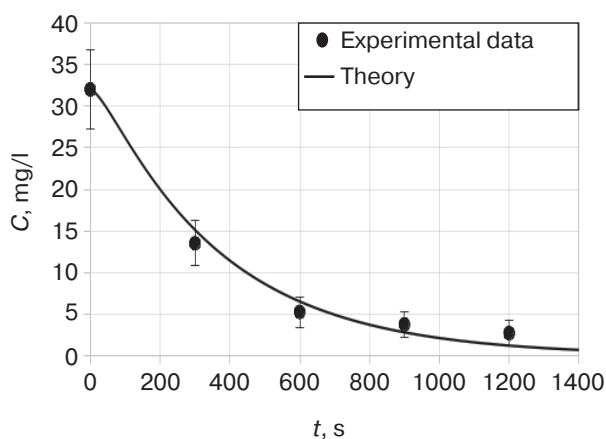
Общая эффективность извлечения моторного масла рассчитана по формуле (9). За 25 мин она составила 93%. Эффективность очистки воды при флотации без диспергатора за 25 мин составила 73%.

Далее был произведен расчет, в результате которого была получена теоретическая кривая извлечения моторного масла. Диаметр частиц, используемый для расчета констант, был определен по формуле (10) и составил  $d_q = 25$  мкм.

Теоретическая зависимость и экспериментально полученные результаты при флотации с использованием диспергатора представлены на рисунке 6.



**Рис. 6.** Теоретическая и экспериментальная зависимости изменения концентрации моторного масла от времени



**Fig. 6.** Theoretical and experimental dependence of oil concentration change on time

Эффективность очистки, рассчитанная по измеренным концентрациям, при флотации с диспергатором составила 91%, а без диспергатора — 75%. Результаты, полученные при расчете эффективности по формуле (9) и по данным, представленным на рисунке 6, не противоречат друг другу. Из представленного сравнения теоретических и экспериментальных результатов (рис. 4–6) видно, что результаты эксперимента в пределах погрешности, которая с вероятностью 0,9 не превышала 15%, совпадают с теоретической кривой. Следовательно, предлагаемая теоретическая модель не противоречит эксперименту и может быть использована для описания процесса очистки воды в предлагаемой установке при заданных условиях.

Далее было проведено сравнение концентраций нефтепродуктов в исходной сточной воде и в очищенной — после флотации при отсутствии и наличии дис-

пергатора. Концентрация нефтепродуктов в исходной воде составляла 32 мг/л, в очищенной после флотации с использованием диспергатора — 2,7 мг/л, в очищенной после флотации без использования диспергатора — 8 мг/л. Таким образом, применение диспергатора позволило повысить эффективность очистки воды от моторного масла примерно с 75 до 90%.

### Выводы

В работе теоретически показана и экспериментально подтверждена возможность описания процесса очистки нефтесодержащей сточной воды во флотационной установке с эжекционной системой аэрации с диспергатором на основе многостадийной модели флотации с учетом разделения пузырьков на несколько групп. Предлагаемая математическая модель может быть использована для определения эффективности извлечения и продолжительности процесса очистки воды от нефтепродуктов разного дисперсного состава. Экспериментально определен диапазон размеров частиц нефтепродуктов, составляющий 15—35 мкм, для извлечения которых применение диспергатора наиболее эффективно. Проведенные исследования показали, что применение диспергатора позволяет повысить эффективность очистки при заданном времени с 75% до 90% по сравнению с обычной эжекционной системой аэрации либо сократить продолжительность очистки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Алексеев Д.В., Николаев Н.А., Лантев А.Г. Комплексная очистка стоков промышленных предприятий методом струйной флотации. Казань: КГТУ, 2005. 156 с.
- [2] Кузубова Л.И., Морозов С.В. Очистка нефтесодержащих сточных вод: аналит. обзор / СО РАН ГПНТБ, НИОХ. Новосибирск, 1992. 72 с.
- [3] Воронов Ю.В., Казаков В.Д., Толстой М.Ю. Струйная аэрация. Научное издание. М.: Изд-во «Ассоциации строительных вузов», 2007. 216 с.
- [4] Grinis L., Lubashevsky N., Ostrovski Y. Influence of the flow rate ratio in a jet pump on the size of air bubbles // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering. 2015. Vol. 7. P. 1161—1164.
- [5] Mandal A. Characterization of gas-liquid parameters in a down-flow jet loop bubble column // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2010. Vol. 27. No. 2. P. 253—264. DOI: 10.1590/S0104-66322010000200004
- [6] Ксенофонтов Б.С., Антонова Е.С. Исследование дисперсного состава водовоздушной смеси, генерируемой эжекционной системой аэрации, в процессе флотационной очистки сточной воды // Безопасность в техносфере. 2016. Т. 5. № 4. С. 38—44. DOI: 10.12737/23760
- [7] Ксенофонтов Б.С. Флотационная обработка воды, отходов и почвы. М.: Новые технологии, 2010. 272 с.
- [8] Shawwa A.R., Smith D.W. Dissolved air flotation model for drinking water treatment // Canadian Journal of Civil Engineering. 2000. Vol. 27. No. 2. P. 373—382. DOI: 10.1139/199-071
- [9] Edzwald J.K. Developments of high rate dissolved air flotation for drinking water treatment // Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA. 2007. Vol. 56. No. 6-7. P. 399—409. DOI: 10.2166/aqua.2007.013
- [10] Рубинштейн Ю.В. Кинетика флотации. М.: Недра, 1980. 374 с.
- [11] Polat M. and Chander S. First order flotation kinetics models and methods for estimation of the true distribution of flotation rate constant // International Journal of Mineral Processing. 2000; 58: 145—166. DOI: 10.1016/s0301-7516(99)00069-1

- [12] *Yianatos J.B.* Fluid flow and kinetic modelling in flotation related processes: Columns and mechanically agitated cells-a review // *Chemical Engineering Research and Design*. 2007. 85(A12): P. 1591—1603. DOI: 10.1016/s0263-8762(07)73204-5
- [13] *Антонова Е.С.* Моделирование процесса очистки сточных вод во флотационной установке с эжекционной системой аэрации с диспергатором // *Безопасность в техносфере*. 2017. Т. 6. № 1. С. 43—50. DOI: 10.12737/article\_590199b9952dc2.23575176
- [14] *Москвичева Е.В., Москвичева А.В., Игнаткина Д.О., Сидякин П.А., Щитов Д.В.* Кинетическая модель флотации с использованием смешанного реагента на основе отхода производства // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2015. № 40. С. 45—57.
- [15] *Дерягин Б.В., Духин С.С., Рулев Н.Н.* Микрофлотация: водоочистка, обогащение. М.: Химия, 1986. 112 с.
- [16] *Rodrigues R.T., Rubio J.* New basis for measuring the size distribution of bubbles // *Minerals Engineering*. 2003. No. 16 (8). P. 757—765. DOI: 10.1016/s0892-6875(03)00181-x

© Антонова Е.С., 2017

#### **История статьи:**

Дата поступления в редакцию: 29.11.2017

Дата принятия к печати: 20.12.2017

#### **Для цитирования:**

*Антонова Е.С.* Исследование процесса очистки воды от нефтепродуктов во флотационной установке с эжекционной системой аэрации с диспергатором // *Вестник Российского университета дружбы народов*. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2017. Т. 25. № 4. С. 548—561. DOI: 10.22363/2313-2310-2017-25-4-548-561

#### **Сведения об авторе:**

*Антонова Екатерина Сергеевна* — аспирант кафедры экологии и промышленной безопасности Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). E-mail: kotant@mail.ru

## **INVESTIGATION OF OILY WASTEWATER TREATMENT PROCESS IN A FLOTATION SET UP WITH EJECTION SYSTEM OF AERATION WITH DISPERSER**

**E.S. Antonova**

Bauman Moscow State Technical University  
2-nd Baumanskaia str., 5, Build. 1, Moscow, Russia, 105005

The problem of oily wastewater treatment is considered. The main advantages and disadvantages of ejection system of aeration used for flotation treatment are presented. The importance of the use of mathematical model for the flotation time definition is pointed out. The use of ejection system of aeration with disperser is offered for the intensification of flotation oily wastewater treatment is offered. The mathematical model considering peculiarities of bubble characteristic is developed and experimentally verified. The experiments on a laboratory set up devoted to the investigation of the particles disperse characteristics and kinetics of the treatment were carried out. The bubble size without

dispenser was about 500  $\mu\text{m}$ , while the use of dispenser allows to generate two groups of bubbles with size 55  $\mu\text{m}$  and 105  $\mu\text{m}$ . The experiments showed that the use of the model is possible for the description of the treatment process. The comparison of flotation water treatment efficiencies with and without dispenser is presented. The use of dispenser is mostly effective for the separation of particles with size 15—35  $\mu\text{m}$  and allows to increase treatment efficiency from 75% to 90%.

**Key words:** flotation, ejector, dispenser, wastewater treatment, oil, mathematical model

## REFERENCES

- [1] Alekseev D.V., Nikolaev N.A., Laptev A.G. Kompleksnaya ochistka stokov promyshlennykh predpriyatii metodom struinoi flotatsii [Complex wastewater treatment of industrial plants by jet flotation]. Kazan: KGTU, 2005. 156 p. (in Russ.).
- [2] Kuzubova L.I., Morozov S.V. Ochistka neftesoderzhashchikh stochnykh vod: Analit. Obzor [Oily wastewater treatment. Analytical review]. SO RAN GPNTB, NIOKh. Novosibirsk, 1992. 72 p. (in Russ.).
- [3] Voronov Yu.V., Kazakov V.D., Tolstoy M.Yu. Struinaya aeratsiya. Nauchnoe izdanie [Jet aeration]. Moscow: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2007. 216 p. (in Russ.).
- [4] Grinis L., Lubashevsky N., Ostrovski Y. Influence of the flow rate ratio in a jet pump on the size of air bubbles. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering. 2015. Vol. 9. No. 7. P. 1161—1164.
- [5] Mandal A. Characterization of gas-liquid parameters in a down-flow jet loop bubble column. Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2010. Vol. 27. No. 2. P. 253—264. DOI: 10.1590/S0104-66322010000200004
- [6] Ksenofontov B.S., Antonova E.S. Research of disperse composition of air-and-water mix generated by ejector aeration system during wastewater flotation treatment. Bezopasnost' v tekhnosfere. 2016. Vol. 5. No. 4. P. 38—44. DOI: 10.12737/23760 (in Russ.).
- [7] Ksenofontov B.S. Flotatsionnaya obrabotka vody, otkhodov i pochvy [Flotation treatment of water, waste and soil]. Moscow: Noyve tekhnologii, 2010. 272 p. (in Russ.).
- [8] Shawwa A.R., Smith D.W. Dissolved air flotation model for drinking water treatment. Canadian Journal of Civil Engineering. 2000. Vol. 27. No. 2. P. 373—382. DOI: 10.1139/199-071
- [9] Edzwald J.K. Developments of high rate dissolved air flotation for drinking water treatment. Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA. 2007. Vol. 56. No. 6-7. P. 399—409. DOI: 10.2166/aqua.2007.013
- [10] Rubinshtein Yu.V. Kinetika flotatsii [Flotation kinetics]. Moscow: Nedra, 1980. 374 p. (in Russ.).
- [11] Polat M. and Chander S. First order flotation kinetics models and methods for estimation of the true distribution of flotation rate constant. International Journal of Mineral Processing. 2000. Vol. 58. P. 145—166. DOI: 10.1016/s0301-7516(99)00069-1
- [12] Yianatos J.B. Fluid flow and kinetic modelling in flotation related processes: Columns and mechanically agitated cells—a review. Chemical Engineering Research and Design. 2007. 85(A12): P. 1591—1603. DOI: 10.1016/s0263-8762(07)73204-5
- [13] Antonova E.S. Modeling of wastewater treatment process in a flotation setup with ejection aeration system having a dispenser. Bezopasnost' v tekhnosfere. 2017. Vol. 6. No. 1. P. 43—50. DOI: 10.12737/article\_590199b9952dc2.23575176 (in Russ.).
- [14] Moskvicheva E.V., Moskvicheva A.V., Ignatkina D.O., Sidyakin P.A., Shchitov D.V. Kinetic model of flotation using a mixed reagent on the basis of production waste. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura. 2015. No. 40. P. 45—57. (in Russ.).
- [15] Deryagin B.V., Dukhin S.S., Rulev N.N. Mikroflotatsiya: Vodoochistka, obogashchenie [Microflotation: Water treatment, concentration]. Moscow: Khimiya, 1986. 112 p. (in Russ.).
- [16] Rodrigues R.T., Rubio J. New basis for measuring the size distribution of bubbles. Minerals Engineering. 2003. No. 16 (8). P. 757—765. DOI: 10.1016/s0892-6875(03)00181-x

**Article history:**

Received: 29.11.2017

Revised: 20.12.2017

**For citation:**

Antonova E.S. (2017) Investigation of oily wastewater treatment process in a flotation set up with ejection system of aeration with disperser. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 25 (4), 548–561. DOI: 10.22363/2313-2310-2017-25-4-548-561

**Bio Note:**

*Antonova Ekaterina Sergeevna* — postgraduate student of Ecology and industrial safety department, Bauman Moscow State Technical University. E-mail: kotant@mail.ru