

УДК 628.54

Разработка флотационной машины с эжекционной системой аэрации

*Антонова Е. С., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Экология и промышленная безопасность»*

*Научный руководитель: Ксенофонтов Б. С., д. т. н., профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
e9@mx.bmstu.ru*

Флотационный способ очистки воды широко применяется при очистке сточных вод от гидрофобных загрязнений (нефтепродуктов, жиров, поверхностно-активных веществ (ПАВ)), так же возможно применение данного метода при очистке от гидрофильных загрязнений с использованием реагентов. Развитие флотационной техники для очистки сточных вод ведется по нескольким направлениям [1]. Аэрация — основа флотационного процесса, поэтому важнейшей задачей является выбор системы аэрации, которая обеспечит требуемые гидродинамические параметры: высокую интенсивность аэрации с получением пузырьков малого размера, для высокой эффективности процесса. При этом предпочтительно использование более простой по конструкции системы с меньшими энергозатратами. Одним из основных путей совершенствования флотационной техники является интенсивное диспергирование воздуха. Перспективным и актуальным является применение эжекторов для насыщения воды пузырьками воздуха. Преимуществом является простота реализации данного метода, надёжность, экономичность. Однако при данном способе не всегда удаётся получить пузырьки оптимальных размеров. Эта проблема может быть решена внедрением специальных устройств диспергирования. В данной работе предлагается усовершенствование системы аэрации с использованием эжектора путём установки специального устройства диспергирования с целью повышения эффективности очистки сточных вод.

Аэрирование эжекторами основано на использовании энергии рабочей жидкости, движущейся линейно с большой скоростью порядка 15-17 м/с через сопло, имеющее определённые форму и размеры, с целью получения перепада давления, создающего эжекцию газовой или жидкой фазы.[2] При прохождении через эжектор в водной струе

возникает зона пониженного давления, меньшего, чем атмосферное, что приводит к подсосу воздуха через патрубок и его смещению с водным потоком. Согласно [1] эффективность флотационной очистки воды зависит от размера пузырька. Для повышения эффективности очистки требуется обеспечить высокую интенсивность аэрации с получением пузырьков малого размера (порядка десятков микрометров). Однако при аэрировании с помощью эжекторов не всегда удаётся получить пузырьки оптимальных размеров, а следовательно обеспечить требуемую степень очистки, что является существенным недостатком данного метода.

Для оптимального сочетания концентрации газовой фазы и размеров пузырьков, дающего наилучшие результаты при флотации с использованием эжекторной системы аэрации, в работах [3, 4, 5] предложено использование устройств диспергирования, устанавливаемых после эжектора. В работах [3, 4] в качестве устройства диспергирования рассматривается электрогидродинамическое или вихревое смесительное устройство. В таких устройствах удастся получить пузырьки практически любого размера, вследствие больших касательных напряжений в вихре. Положительное влияние на диспергирование водовоздушной смеси, а следовательно и на эффективность флотации так же оказывает комбинация центробежного и электрического полей. Недостатком данных устройств является невысокая степень аэрации воды, обусловленная образованием достаточно больших пузырьков воздуха из-за недостаточной турбулизации водовоздушного потока. [3, 4]

В работе [5] в качестве устройства диспергирования водовоздушной смеси после эжектора предлагается использовать статический смеситель. При прохождении потока воды через эжектор на высокой скорости, происходит всасывание воздуха где вследствие интенсивной турбулизации потока происходит образование пузырьков. После эжектора водовоздушная смесь поступает в статический смеситель, в котором происходит дальнейшее диспергирование пузырьков за счёт высокой скорости течения потока. Окончательное диспергирование водовоздушной смеси происходит при прохождении её через насос. При этом диаметр генерируемых пузырьков в зависимости от различных условий составил 30-80 мкм. Недостатком способа является прохождение водовоздушной смеси через насос, что может создать сложности в эксплуатации, так как для работы при таких условиях требуется использование специальных насосов.

С целью повышения эффективности флотационной очистки сточных вод предлагается усовершенствование эжекторного способа аэрации путём установки специального устройства диспергирования водовоздушной смеси после эжектора.

Предложенная флотационная машина для очистки сточных вод представлена на рис. 1.

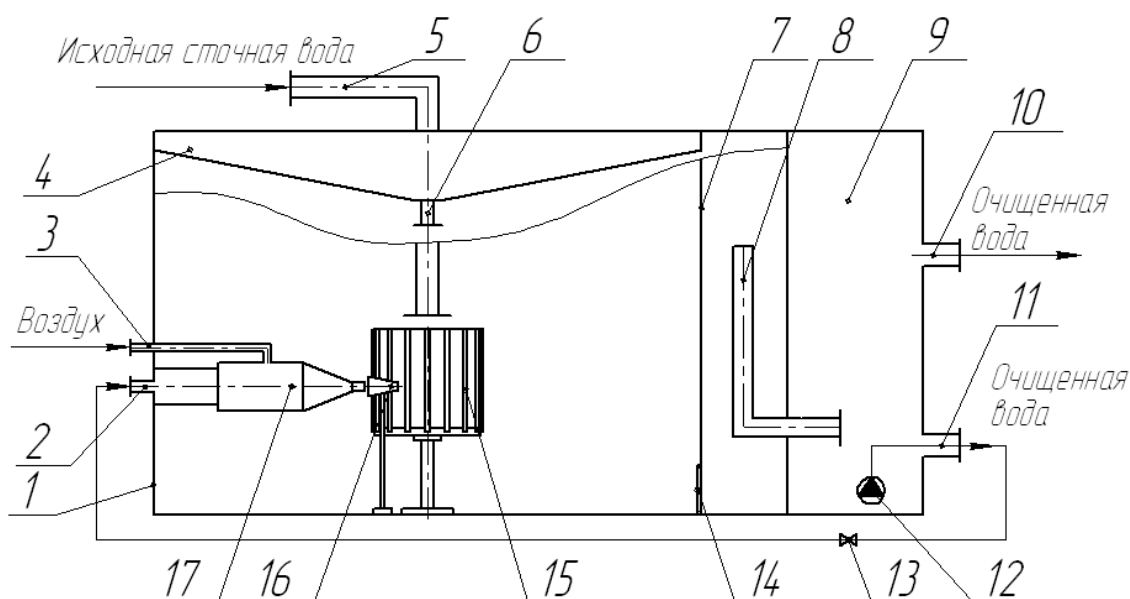


Рис. 1. Схема флотационной машины с эжекционной системой аэрации

1 – корпус; 2 – патрубок подвода рабочей жидкости; 3 – патрубок подвода воздуха; 4 – пенный желоб; 5 – патрубок подачи грязной воды; 6 – патрубок отвода пенного продукта; 7 – полупогружная перегородка; 8 – регулятор отвода очищенной воды; 9 – камера для очищенной воды; 10 – патрубок отвода очищенной воды; 11 – патрубок для рецикла очищенной воды; 12 – погружной насос; 13 – вентиль; 14 – сетка; 15 – диспергатор; 16 – щелевой элемент; 17 – эжектор

Она состоит из корпуса 1, на внешней стороне которого расположены патрубки для подачи грязной воды 5, рабочей жидкости 2 и воздуха 3 и отвода очищенной воды 10 и пенный желоб 4 с патрубком отвода пенного продукта 6, патрубок для рецикла очищенной воды 11; внутри корпуса расположены аэрирующее устройство в виде эжектора 17, щелевого элемента 16 и диспергатора 15, полупогружная перегородка 7 с сеткой 14 и камера для очищенной воды 9 с регулятором отвода очищенной воды 8 и погружным насосом 12, соединённым трубопроводом с вентилем 13.

Диспергатор, различные варианты которого представлены на рис. 2, выполнен в виде полого тела 1 с рифлёной поверхностью с нарифлениями в виде полуцилиндрических стержней 2 перпендикулярно которым расположен щелевой элемент 4. При этом нарифления выполняют как на внутренней так и на внешней стороне полого тела, которое может быть выполнено в виде цилиндра или усеченного конуса с углом конусности 10...60°. Полое тело может располагаться на подвижной платформе 3 и при этом щелевой элемент 4 располагается тангенциально к поверхности диспергатора.

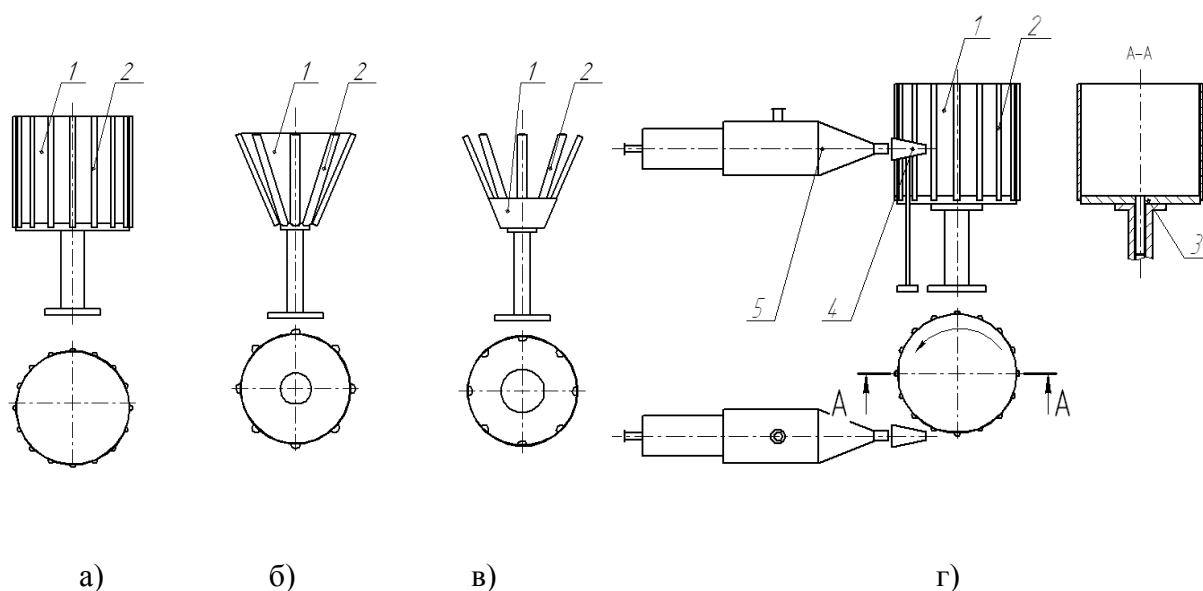


Рис. 2. Варианты конструкции диспергатора

1 – полое тело; 2 – полуцилиндрические стержни; 3 – подвижная платформа; 4 – щелевой элемент; 5 – эжектор;

а – диспергатор цилиндрической формы с нарифлениями снаружи на неподвижной платформе; б – диспергатор конической формы с нарифлениями снаружи на неподвижной платформе; в – диспергатор конической формы с нарифлениями внутри на неподвижной платформе; г – диспергатор цилиндрической формы с нарифлениями снаружи на подвижной платформе

Принцип работы предложенной флотационной машины заключается в следующем. Исходная (грязная) вода подаётся по патрубку 5 (см. рис. 1) в область диспергатора 15. Рабочая жидкость, расход которой регулируется вентилем 13, подаётся погружным насосом 12 и поступает через патрубок 2 внутрь эжектора 17. При прохождении воды с большой скоростью через эжектор в водной струе возникает зона пониженного давления, меньшего, чем атмосферное, что приводит к подсосу воздуха через патрубок 3 и его смешению с водным потоком. Полученная водовоздушная смесь через щелевой элемент 16 попадает на нарифления диспергатора 15 в виде полуцилиндрических стержней (см. рис. 2, поз. 2), установленных на поверхности полого тела (см. рис. 2, поз. 1). При контакте водовоздушной смеси и в первую очередь газовой фазы с нарифлениями происходит её диспергирование до мельчайших пузырьков. При этом происходит интенсивное перемешивание водовоздушной смеси с загрязнённой водой, что приводит к существенному повышению степени аэрации воды и повышению эффективности очистки. Образовавшиеся флотокомплексы всплывают, образуя пену, которая поступает в пенный желоб 4 и отводится по патрубку 6. Далее вода проходит сквозь сетку 14 и по патрубку 8

отводится в камеру очищенной воды 9, из которой основная часть очищенной воды отводится по патрубку 10, а другая часть - через патрубок 11 для использования в качестве рабочей жидкости.

Процесс очистки воды в предложенной флотационной машине протекает по схеме, представленной на рис. 3.

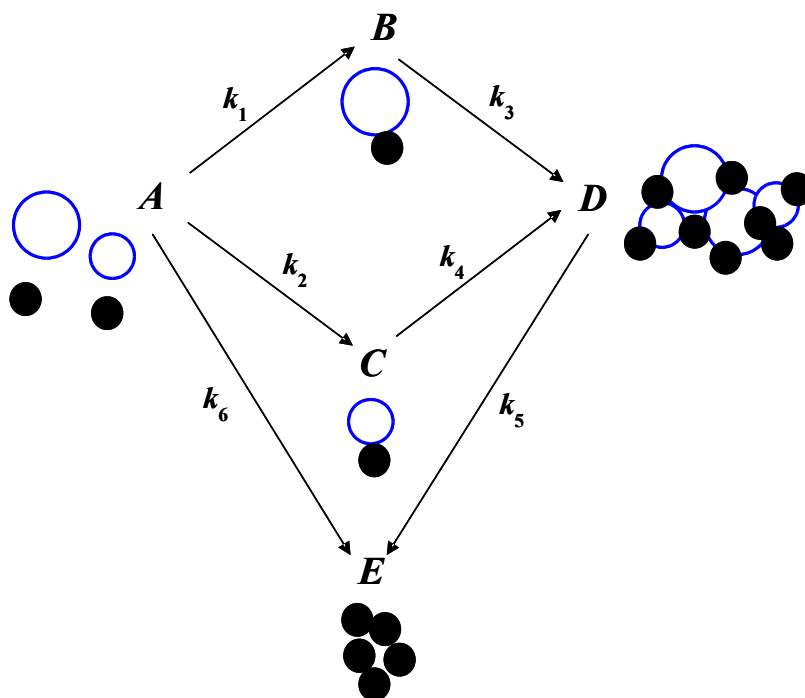


Рис. 3. Схема процесса

В данной схеме A — частицы загрязнений в исходном состоянии. При флотационной очистке частицы гидрофобных загрязнений могут слипаться с более крупными пузырьками, образуя флотокомплексы (состояние B), а частицы гидрофобно-гидрофильных загрязнений образуют флотокомплексы с пузырьками более мелких размеров (состояние C). Далее флотокомплексы всплывают, образуя пенный слой (состояние D). Одновременно со всплытием флотокомплексов может происходить осаждение частиц (состояние E) как из исходного состояния A , так и из пенного слоя D . Переходы между состояниями характеризуется константами $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$.

Константы k_1, k_2 характеризующие вероятность образования флотокомплекса, определяются из соотношения:

$$k_{1,2} = \frac{1,5qE}{k_0 D_{1,2}}, \quad (1)$$

где q – скорость барботирования, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

E – эффективность захвата частиц всплывающим пузырьком газа при флотации (безразм.);

$\overline{D}_{1,2}$ – средний диаметр крупных и мелких пузырьков во флотационной ячейке соответственно, м;

k_0 – фактор полидисперсности пузырьков (безразм.).

Константы k_3, k_4 характеризуют перемещение флотокомплексов частица-пузырёк из жидкости в пенный слой и определяются как:

$$k_{3,4} = \frac{v_{\text{под}1,2}}{h}, \quad (2)$$

где $v_{\text{под}1,2}$ – скорость подъема флотокомплекса с крупными и мелкими пузырьками соответственно, м/с;

h – расстояние от зоны аэрации до пенного слоя (глубина флотокамеры), м.

Константа k_5 , характеризует выпадение частиц твердой фазы из пенного слоя в зону аэрации.

Константа k_6 , характеризует осаждение частиц твердой фазы, находящихся в исходном состоянии.

Константы k_5, k_6 определяются по формуле (3):

$$k_{5,6} = \frac{v_{oc}}{h}, \quad (3)$$

где v_{oc} – скорость осаждения частиц твердой фазы, м/с;

h – расстояние от зоны аэрации до пенного слоя (глубина флотокамеры), м.

Система дифференциальных уравнений, описывающая процесс, протекающий во флотационной машине, в этом случае будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} C_A = -k_1 C_A - k_2 C_A - k_6 C_A; \\ \frac{d}{dt} C_B = k_1 C_A - k_3 C_B; \\ \frac{d}{dt} C_C = k_2 C_A - k_4 C_C; \\ \frac{d}{dt} C_D = k_3 C_B + k_4 C_C - k_5 C_D; \\ \frac{d}{dt} C_E = k_6 C_A + k_5 C_D; \end{cases} \quad (4)$$

Начальные условия для данной системы дифференциальных уравнений следующие:
при $t=0$:

$$\begin{aligned}C_A(0) &= C_{A_0}; \\C_B(0) &= 0; \\C_C(0) &= 0; \\C_D(0) &= 0; \\C_E(0) &= 0;\end{aligned}\quad (5)$$

Получено решение данной системы:

$$\begin{aligned}C_A(t) &= C_{A_0} e^{-\alpha t}; \\C_B(t) &= \frac{C_{A_0} k_1}{k_3 - \alpha} (e^{-\alpha t} - e^{-k_3 t}); \\C_C(t) &= \frac{C_{A_0} k_2}{k_4 - \alpha} (e^{-\alpha t} - e^{-k_4 t}); \\C_D(t) &= C_{A_0} \left\{ \frac{k_1 k_3}{k_3 - \alpha} \left[\frac{(e^{-\alpha t} - e^{-k_5 t})}{k_5 - \alpha} + \frac{(e^{-k_5 t} - e^{-k_3 t})}{k_5 - k_3} \right] + \right. \\&\quad \left. + \frac{k_2 k_4}{k_4 - \alpha} \left[\frac{(e^{-\alpha t} - e^{-k_5 t})}{k_5 - \alpha} + \frac{(e^{-k_5 t} - e^{-k_4 t})}{k_5 - k_4} \right] \right\}; \\C_E(t) &= C_{A_0} \left\{ 1 - \frac{k_6}{\alpha} e^{-\alpha t} + k_5 \left[\frac{k_1 k_3}{k_3 - \alpha} \left\{ \frac{e^{-k_5 t}}{k_5(k_5 - \alpha)} - \frac{e^{-\alpha t}}{\alpha(k_5 - \alpha)} + \right. \right. \right. \\&\quad \left. \left. + \frac{e^{-k_3 t}}{k_3(k_5 - k_3)} - \frac{e^{-k_5 t}}{k_5(k_5 - k_3)} \right\} + \right. \\&\quad \left. + \frac{k_2 k_4}{k_4 - \alpha} \left\{ \frac{e^{-k_5 t}}{k_5(k_5 - \alpha)} - \frac{e^{-\alpha t}}{\alpha(k_5 - \alpha)} + \right. \right. \\&\quad \left. \left. + \frac{e^{-k_4 t}}{k_4(k_5 - k_4)} - \frac{e^{-k_5 t}}{k_5(k_5 - k_4)} \right\} \right] \right\}.\end{aligned}\quad (6)$$

где $\alpha = k_1 + k_2 + k_6$

Расчёт констант, характеризующих вероятность образования флотокомплекса для крупных и мелких пузырьков k_1 и k_2 соответственно, производился по формуле (1).

Принимаем среднюю скорость барботирования $q = 4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

Эффективность захвата частиц всплывающим пузырьком газа при флотации принимаем

$E=0,05$;

Фактор полидисперсности пузырьков принимаем $k_0=1$.

Средний диаметр пузырька принимаем 1) $D_1=500$ мкм; 2) $D_2=60$ мкм;

$$k_1 = \frac{1,5 \cdot 4 \cdot 10^{-5} \cdot 0,05}{1 \cdot 500 \cdot 10^{-6}} = 0,006 \frac{1}{c};$$

$$k_2 = \frac{1,5 \cdot 4 \cdot 10^{-5} \cdot 0,05}{1 \cdot 60 \cdot 10^{-6}} = 0,05 \frac{1}{c}.$$

Расчёт констант, характеризующих перемещение флотокомплекса в пенный слой, k_3, k_4 производился по формуле (2).

Скорость всплытия для пузырьков диаметром 500 мкм: $v_{под1}=0,07$ м/с согласно [6].

Скорость всплытия для пузырьков диаметром 60 мкм можно приблизительно определить по формуле:

$$v_{под1,2} = \frac{\bar{D}_{1,2}^2 g (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{в}})}{18\mu}, \quad (7)$$

где $g=9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения;

$\rho_{\text{в}}$ — плотность воды, кг/м^3 ;

$\rho_{\text{в}}$ — плотность воздуха, кг/м^3 ;

μ — динамический коэффициент вязкости воды, $\text{Па}\cdot\text{с}$



Высота $h=1$ м.

Тогда константы k_3, k_4 :

$$k_3 = \frac{0,07}{1} = 0,07 \frac{1}{c};$$

$$k_4 = \frac{0,019}{1} = 0,019 \frac{1}{c}.$$

Константы k_5, k_6 , характеризующие процесс осаждения, определяют по формуле (3), приняв скорость осаждения частиц $v_{oc}=0,2 \cdot 10^{-3}$ м/с.

$$k_5 = \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{1} = 0,2 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c};$$

С использованием полученных констант по найденному решению построены графики зависимостей изменения концентраций от времени (рис. 4).

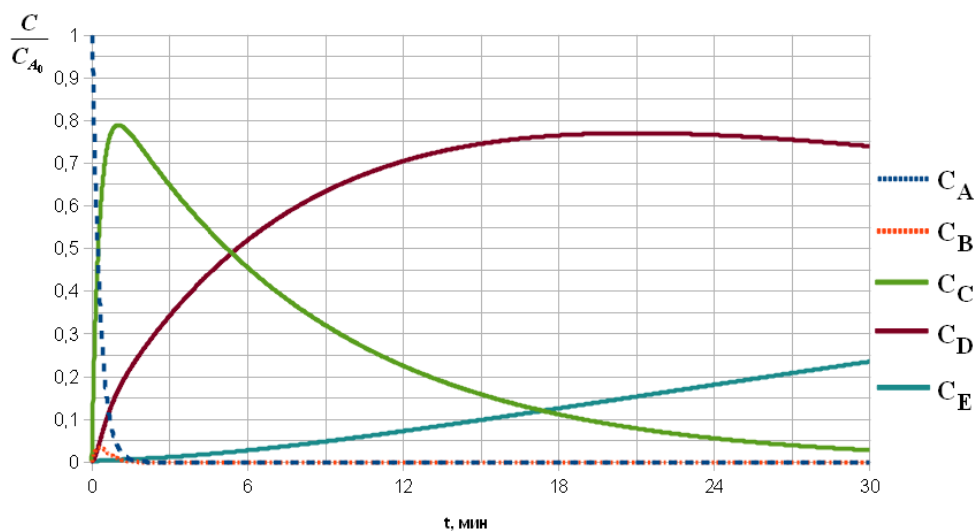


Рис. 4. Зависимость концентрации от времени процесса

Варьируя различные параметры, можно установить, в какой степени их изменение влияет на процесс очистки.

На рис. 5 представлен график для следующих данных: $D_1=300$ мкм; $D_2=50$ мкм; $v_{oc1}=0,1 \cdot 10^{-3}$ м/с — скорость осаждения частиц из пены; $v_{oc2}=0,1 \cdot 10^{-3}$ м/с — скорость осаждения частиц из исходного состояния; $k_1=0,01$ 1/с; $k_2=0,06$ 1/с; $k_3=0,035$ 1/с; $k_4=0,0013$ 1/с; $k_5=0,0001$ 1/с; $k_6=0,0001$ 1/с;

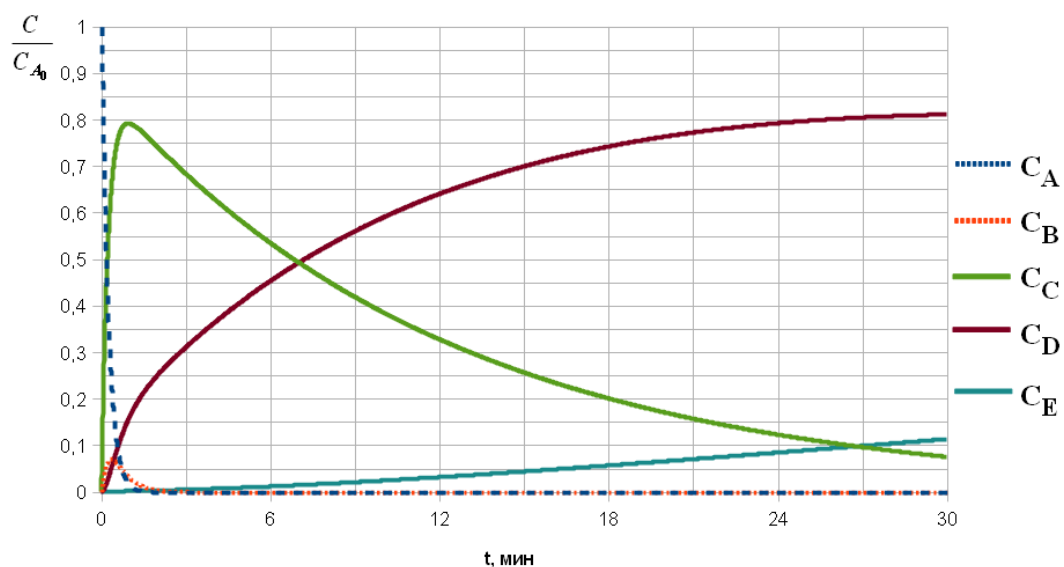


Рис. 5. Зависимость концентрации от времени процесса

Представленные на рис. 4-5 данные показывают, как значения констант флотационного процесса влияют на его кинетику. Рассмотренная модель демонстрирует характерные особенности многостадийного процесса, в котором помимо флотации происходит осаждение. Вид кривых на графиках показывает, как изменение характерных параметров определяет течение процесса как на отдельных стадиях, так и в целом: например на рис. 4 кривая C_D , характеризующая концентрацию частиц в пенном слое, начинает спадать после 24 минуты, при этом можно сделать вывод от том, что процесс выпадения частиц из пенного слоя, начиная с этого времени, проходит интенсивнее, чем всплытия, но при других значениях параметров, входящих в константы, такого спада может не наблюдаться (рис. 5).

Таким образом, полученные графики дают возможность определить длительность процесса очистки. Процесс обычно прекращают, когда изменение концентрации не превышает 5 %, так как в этом случае её изменение соизмеримо с погрешностью измерения. Однако, в каждом индивидуальном случае при определении времени очистки, необходимо учитывать характерные особенности конкретного процесса в конкретных условиях и нормативные требования, предъявляемые к качеству воды.

Для исследования процесса аэрации и диспергирования пузырьков собрана лабораторная установка (рис. 6), состоящая из камеры аэрации 1, эжектора 2, диспергатора 3 и погружного насоса 4.

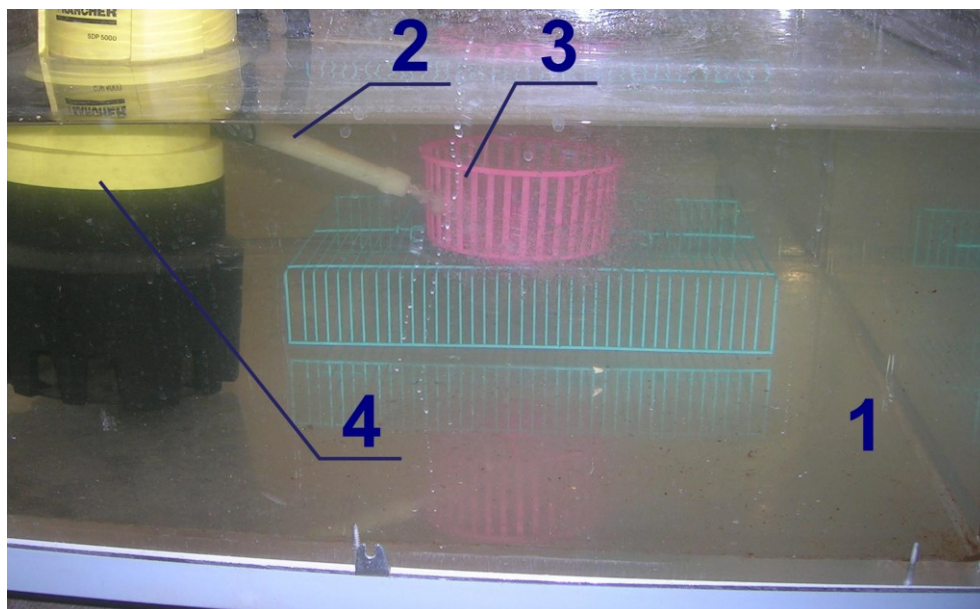


Рис. 6. Лабораторная установка эжекционной системы аэрации с диспергатором
1 – камера аэрации; 2 – эжектор; 3 – диспергатор; 4 – погружной насос

Вид струи при контакте с нарифлениями диспергатора показан рис. 7.

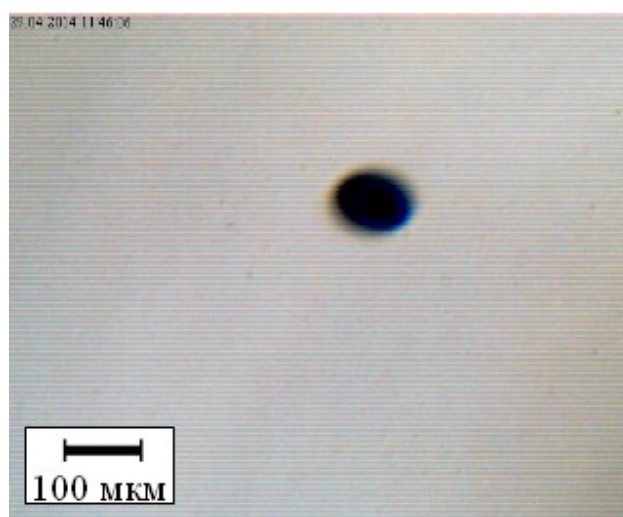


Рис. 7. Контакт струи рабочей жидкости с диспергатором

В ходе эксперимента было проведено наблюдение за пузырьками как при наличии, так и при отсутствии диспергатора. Пузырьки фиксировались с помощью USB-микросткопа. Полученные фотографии представлена на рис. 8.



а) без диспергатора



б) с диспергатором

Рис. 8. Фотографии пузырьков

При работе установки без диспергатора наблюдалось достаточно большое количество пузырьков диаметром от 800 мкм до 1,5 мм. Микропузырьков диаметром менее 500 мкм зафиксировано не было.

После установки диспергатора количество микропузырьков значительно увеличилось. При обработке изображений, полученных с помощью USB-микроскопа, было установлено, что большинство пузырьков после контакта с диспергатором имеют диаметры 30–300 мкм, причём на диапазон 50-100 мкм приходится 30 % пузырьков. Количество пузырьков диаметром более 1 мм при этом уменьшилось.

Таким образом, установлено, что использование предлагаемого диспергатора позволяет получать больше тонкодисперсных пузырьков с размерами 30-300 мкм. Кроме того, диспергатор обеспечивает более интенсивное перемешивание сточных вод с тонкодисперсной газовой фазой, что повышает вероятность образования флотокомплексов частица-пузырёк.

Использование новых технических решений позволяет повысить эффективность очистки на 15-20 % по сравнению с существующими установками при проведении процесса очистки сточных вод, содержащих гидрофобно-гидрофильные загрязнения.

Список литературы

1. Ксенофонтов Б. С. Флотационная обработка воды, отходов и почвы. М.: Новые технологии, 2010. 272 с.
2. Воронов Ю. В., Казаков В. Д., Толстой М. Ю. Струйная аэрация. Научное издание. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. 216 с.
3. Алексеева Т. В. Разработка технологии очистки замазученных сточных вод ТЭЦ с использованием метода безнапорной флотации: дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2003. 126 с.
4. Гришин Л. Б. Совершенствование очистки нефтесодержащих производственных сточных вод: дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2009. 144 с.
5. Chen Fu-tai, Peng Feng-xian, Wu Xiao-qing, Luan Zhao-kun. Bubble performance of a novel dissolved air flotation (DAF) unit // Journal of Environmental Sciences. 2004. Vol. 16, №1, pp. 104-107.
6. Бараке К., Бебен Ж., Бернар Ж. Технические записки по проблемам воды: пер. с англ. / под ред. Т. А. Карюхиной, И. Н. Чурбановой. В 2-х томах, Т. 1. М.: Стройиздат, 1983. 193 с.