электронное научно-техническое издание НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ Эл № ФС 77 - 30569. Государственная регистрация №0421100025. IS5N 1994-0408

Интенсификация флотационной очистки в оборотных системах водопользования с использованием вибровоздействий

77-30569/340675

02, февраль 2012 Ксенофонтов Б. С., Иванов М. В. УДК.628.321

> МГТУ им. Н.Э. Баумана <u>kbsflot@mail.ru</u> <u>mivanov2005@mail.ru</u>

Наиболее рациональное использование воды в промышленности и на транспорте в большой степени связано с ее повторным использованием в специально созданных для таких целей оборотных системах. Достаточно широко оборотные системы водопользования использовались и ранее в СССР [1-2]. По нашему мнению, это было связано, в том числе и с более строгим контролем за водным хозяйством промышленных предприятий со стороны природоохранных органов, когда инспектор такого органа практически всегда мог осуществлять необходимый надзор. В условиях частного производства инспектор природоохранного органа не всегда в полном объеме может осуществлять контроль за качеством отработанных водных потоков. Кроме того, в ряде случаев наблюдается сброс в бытовые стоки промышленных загрязнений, например солей тяжелых металлов, что возможно связано с ведением нелегального бизнеса. Можно допустить, что указанные факты исчезнут со временем и, что в дальнейшем заработает чисто экономический механизм, когда выгодно будет максимально использовать оборотные системы водопользования, например при мойке различных транспортных средств. В России согласно нормативным современной документам при мойке транспортных средств необходимо использовать оборотные системы водопользования [3-4]. Однако, на практике только в немногих случаях при мойке транспорта используются оборотные системы. Это объясняется несколькими причинами, включая и указанные выше, а также несовершенство разработанных технологических схем очистки воды, в том числе и разработки зарубежных фирм. Последние чаще всего используют фильтрацию с реагентной обработкой, причем с высокими дозами дорогих синтетических флокулянтов.

Анализ различных технических решений по созданию оборотных систем водопользования и свой многолетний опыт привели к целесообразности более широкого использования в таких системах флотационной техники [5].

При этом было установлено, что в большинстве случаев можно обойтись без применения дорогих флокулянтов и в целом без реагентного хозяйства. При этом достигаются нормативные показатели качества оборотной воды. В дальнейшем нами проводилось совершенствование оборотных систем, направленное на уменьшение рабочих объемов применяемого оборудования и интенсификацию технологических процессов очистки воды и в, первую очередь, флотационных. Для решения подобных задач в последние годы были разработаны различные комбинированные флотационные машины и аппараты, которые в зависимости от целевого назначения могут быть использованы, в том числе и в системах оборотного водопользования.

Методы проведения экспериментов

Возможности интенсификации процесса флотации связаны и в том числе с получением тонкодисперсных газовых (воздушных) пузырьков в зоне аэрации флотационного аппарата, а также коалесценцией мелких флотокомплексов, что позволяет их извлекать в рабочей зоне флотокамеры. Последнее предотвращает их унос с очищаемой жидкостью. Одним из вариантов модернизации разработанных ранее пневматических установок и тем самым интенсификации их работы может быть использование вибровоздействий. В МГТУ им. Баумана на кафедре «Экология и промышленная безопасность» была разработана опытная флотационная установка с использованием вибровоздействий, представленная на рис. 1.



Рис. 1. Установка флотационная с диспергированием в корпусе аппарата. A - подача исходной воды, B - выход очищенной воды. 1 - вибростенды, 2 - флотационная камера диспергирования, 3 - аэратор, спомощью тяги соединенный с вибростендом, 4 - поршень, с помощью тягисоединенный с вибростендом, 5 - флотационная камера коалесценции, 6 - блоктонкослойного осветления, 7 - корпус аппарата.

Принцип работы данного аппарата следующий. Корпус аппарата 7 разделяется перегородками на четыре камер. Исходная вода А сначала подается во флотационную камеру диспергирования 2, в которой аэратор 3 соединен с помощью тяги с вибростендом 1. Вибростенд работает постоянно и передает возвратно-поступательное движение на аэратор. За счет интенсифицирующего воздействия вибрации в данной камере возможно добиться более высокой степени очистки. После этого, очищаемая вода поступает во вторую по ходу камеру коалесценции 5, в которой имеется поршень 4, соединенный с помощью тяги с вибростендом 3. В этой камере за счет действия вибрации происходит коалесценция флотокомплексов, их укрупнение и всплытие. Далее очищаемая вода поступает в четвертую камеру - блок тонкого осветления 6, в которой оставшиеся флотокомплексы задерживаются на пластинах блока. После этого, вода поступает в последнюю накопительную камеру и отводится через патрубок В.

В ходе проведения экспериментов, исследовалось содержание нефтепродуктов в используемом стоке автомоечного комплекса. Концентрации

нефтепродуктов определялись независимой аналитической лабораторией ОАО «Роса». Фотографии с испытаний приведены на рисунках 2 – 6.

Режим вибровоздействия выбирался по разработанной методике, которая описана в [6]. Так, для камеры диспергирования частота вибровоздействия составляла 90 Гц, уровень виброускорения - 2g.



Рис. 2. Общий вид установки виброфлотации.



Рис. 3. Вид сверху. Исходная сточная вода.



Рис. 4. Пенный продукт.

Рис. 5. Очищенная вода



Рис. 6. Вид на камеру виброфлотации.

Математическая модель

Для расчета процессов флотационной очистки, происходящих в аппарате, использовалась математическая модель, разработанная на основе многостадийной модели проф. Ксенофонтова [5, 7], и подробно описанная в [6].

Суть предлагаемой математической модели заключается в следующем. Оказываемое вибрационное воздействие принципиально различается по роду оказываемого эффекта: в одном случае происходит диспергирование воздушных пузырьков воздуха, а в другом – коалесценция флотокомплексов, в зависимости от режима вибровоздействий. Соответственно и математическая модель подразделялась на модель для диспергирования и модель для коалесценции.

Математическая модель флотации с учетом вибродиспергирования пузырьков воздуха.

Схема модели представлена на рис. 7.



Рис. 7. Схема модели флотации с учетом вибродиспергирования пузырьков воздуха.

 А – исходное состояние: частица загрязнения и пузырек воздуха отделены друг от друга; В и С – стадия диспергирования пузырей воздуха и образования флотокомплексов частичка-пузырек; D – стадия всплытия флотокомплексов и образования пенного слоя. К_i - константы переходов из одного состояния в другое

Суть процессов сводится к тому, что пузырек воздуха (стадия A) под воздействием вибрации диспергируется на два меньших по размеру, образует флотокомплексы с частицами загрязнений (стадии B и C), которые затем всплывают в пенный слой (стадия D). Кроме того, может иметь место непосредственное попадание частиц загрязнения в пенный слой, без образования флотокомплексов или, наоборот их выпадение. Данная модель описывается системой дифференциальных уравнений (1).

$$\begin{cases} \frac{dC_A}{dt} = -K_1C_A + K_2C_B - K_3C_A + K_4C_C + K_9C_D - K_{10}C_A \\ \frac{dC_B}{dt} = K_1C_A - K_2C_B - K_5C_B + K_6C_D \\ \frac{dC_C}{dt} = K_3C_A - K_4C_C - K_7C_C + K_8C_D \\ \frac{dC_D}{dt} = K_5C_B - K_6C_D + K_7C_C - K_8C_D - K_9C_D + K_{10}C_A \end{cases}$$
(1)

Для каждого из переходов имеют место свои соответспвующие константы, входящие в систему дифференциальных уравнений (1). Каждая константа имеет тот или иной физический смысл, определяющий процессы происходящие при переходе из одной стадии в другую. Решение данной системы уравнений при известных константах переходов Кі позволит найти изменение концентраций в стадиях A, B, C и D во времени t.

Математическая модель флотации с учетом виброкоалесценции пузырьков

воздуха

Схема модели представлена на рис. 8.



Рис. 8. Схема модели флотации с учетом виброкоалесценции пузырьков воздуха. В – стадия наличия невсплывших флотокомплесов частица - пузырек; D – стадия всплытия флотокомплексов и образования пенного слоя. Е – стадия коалесценции флотокомплексов К_i - константы переходов из одного состояния в другое

В данном случае флотокомплексы частица - пузырек (стадия В) могут как непосредственно попадать в пенный слой (стадия D), так и через промежуточное состояние – коалесценцию флотокомплексов (стадия E). Данная модель описывается системой дифференциальных уравнений (2). Для каждого из переходов имеют место свои соответсвующие константы, входящие в систему дифференциальных уравнений (2). Каждая константа имеет тот или иной физический смысл, определяющий процессы происходящие при переходе из одной стадии в другую.

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}C_{B} = -K_{5}C_{B} + K_{6}C_{D} + K_{12}C_{E} - K_{11}C_{B} \\ \frac{d}{dt}C_{E} = K_{11}C_{B} - K_{12}C_{E} + K_{14}C_{D} - K_{13}C_{E} \\ \frac{d}{dt}C_{D} = K_{5}C_{B} - K_{6}C_{D} - K_{14}C_{D} + K_{13}C_{E} \end{cases}$$
(2)

Решение данной системы уравнений при известных константах переходов К_i позволит найти изменение концентраций С в стадиях B, D и E во времени t.

Расчет констант переходов

Для расчета систем уравнений (1) и (2) задается исходная концентрация загрязнителя.

Принимаются следующие начальные условия для решения: $C_A(t) + C_B(t) + C_C(t) + C_D(t) = C_0$; $C_A(0) = C_0$; $C_B(0) = 0$; $C_C(0) = 0$; $C_D(0) = 0$.

Значения констант рассчитываются по следующим формулам:

•
$$K_1 = K_3 = \frac{1.5 qE}{k_0 \overline{D_{ef}}}$$
, где q – скорость барботирования; Е –

эффективность захвата частиц всплывающим пузырьком газа при флотации; $\overline{D_{ef}}$ - средне-эффективный диаметр пузырьков во флотационной ячейке. k₀ – фактор полидисперсности пузырьков.

В ходе проведения эксперимента, компрессор работал с производительностью 150 литров в минуту, площадь сечения флотационной колонны составляла 0,06 м² таким образом, скорость барботажа составила

$$q = \frac{150}{1000 \cdot 0.06 \cdot 60} \approx 0.042 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{c}.$$

При нормальном распределении пузырьков воздуха коэффициент K_0 , характеризующий полидисперсность пузырьков воздуха изменяется в пределах $1 \le K_0 \le 1,58$. Большой расход воздуха и большая площадь сечения колонны, а также некоторые конструктивные особенности используемого аппарата могут привести к наличию некоторого нормального распределения пузырьков воздуха по размеру. На основании этого, примем $K_0=1.58$.

Эффективность захвата частицы пузырьком Е изменяется в пределах $0,005 \le E \le 0,01$, возьмем минимальное значение, равное 0,005, так как в силу конструктивных особенностей используемой флотационной машины может иметь некоторое снижение эффективности захвата.

Средне-эффективный размер пузырьков воздуха составляет 0,1 мм. Следовательно константы К₁ и К₃ могут быть рассчитаны следующим образом:

$$K_1 = K_3 = \frac{1.5 \, qE}{k_0 \, \overline{D}} = \frac{1.5 \cdot 0.042 \cdot 0.005}{1,58 \cdot 0.01} = 0.002$$

• $K_5 = K_7 = \frac{v_p}{h}$, где v_p – скорость подъема флотокомплекса; h –

расстояние от зоны аэрации до пенного слоя (глубина флотокамеры).

Высота флотационной колонны составляла 1 м. Скорость подъема флотокомплексов составлял 0.02 м/с (ввиду наличия ПАВ во очищаемом стоке автомоечного комплекса). Тогда, константы К₅ и К₇ могут быть рассчитаны следующим образом:

$$K_{5} = K_{7} = \frac{V_{pool}}{h} = \frac{0,02}{1} = 0,02$$

• $K_9 = \frac{V_{\infty}}{h}$, где $v_{0,c}$ - скорость осаждения частиц твердой фазы, h – высота

флотокамеры.

Скорость осаждения загрязнений из пенного слоя в исходную воду составляет 0,001 м/с. Таким образом, константа К9 может быть рассчитана следующим образом:

$$K_9 = \frac{V_{\infty}}{h} = \frac{0,001}{1} = 0,001$$

• $K_{11} = \frac{4G\alpha\phi}{3\pi}$, где G-эффективный градиент сдвига гидродинамического

поля: $G = \sqrt{qg/v}$, g – ускорение сил тяжести; v - кинематическая вязкость жидкости; q – скорость барботажа; α - эффективность коалесценции; ϕ -объемная доля газовой фазы.

g – ускорение сил тяжести, g=982 см/с²; v - кинематическая вязкость жидкости, $v=10^{-6}$ м²/с; q – скорость барботажа, q=0.006. Тогда

$$G = \sqrt{\frac{0.006 \cdot 9.82}{10^{-6}}} = 242,73$$
$$\mathcal{K}_{11} = \frac{4G\alpha\phi}{3\pi}$$

α - эффективность коалесценции, α=10⁻²; φ- объемная доля газовой фазы, φ=0,02
[8]. Таким образом,

$$K_{11} = \frac{4 \cdot 242.73 \cdot 10^{-2} \cdot 0.02}{3 \cdot 3.14} = 2.0 \cdot 10^{-2}$$

• $K_{13} = \frac{v_{pod}^{of}}{h}$, где v_{pod}^{of} - скорость подъема объединенного флотокомплекса,

h – высота флотокамеры.

Скорость подъема объединенного флотокомплекса составляет 0,005 м/с, тогда:

$$K_{13} = \frac{\nu_{pod}^{or}}{h} = \frac{0,005}{1} = 0,005$$

Значения остальных констант равны нулю, так как в данных условиях, при флотации стока автомоечного комплекса, не может происходит разрушение уже образовавшегося флотокомплекса, самостоятельное всплытие загрязнения в пенный слой и выпадение флотокомплекса из пенного слоя.

Результаты эксперимента и верификация математической модели

После нахождения всех кинетических констант и решения систем уравнений (1) и (2) с подстановкой значений констант, было получено решение, графическое представление которого показано на рис. 9 и 10.



Рис. 9. Сравнение теоретических и экспериментальных данных по виброфлотации стока автомоечного комплекса в разработанной флотомашине в блоке диспергирования

флотомашине в блоке диспергирования $Z^{<1>}$ - время, с; $Z^{<2>}$ - концентрация нефтепродуктов в очищаемом стоке; $Z^{<3>}$ и $Z^{<4>}$ - содержание флотокомплексов; $Z^{<5>}$ - концентрация нефтепродуктов в пенном слое. Линиями показаны теоретические данные, точками – результаты

экспериментов.





экспериментов.

Теоретические данные были также подтверждены экспериментально. Для этого использовался сток автомоечного комплекса. Как видно из рис. 10, имеет место хорошее совпадение теоретических данных с экспериментальными. Время флотации с диспергированием при этом составляет 7 минут, по истечении которых содержание нефтепродуктов снизилось с 2,5 до 0,8. Содержание не всплывших флотокомплексов при этом составляет еще 0,079 мг/л. Для ускорения их всплытия они коалесцируются, для чего, вода направляется в камеру коалесценции.

Таким же образом, для камеры коалесценции также производился расчет. При этом, использовалась математическая модель для флотации с коалесценцией. Для нее были рассчитаны все необходимые константы переходов К с учетом результатов полученных в ходе решения обратной задачи, и решена система уравнений. Решение представлено на рис. 10.

Теоретические данные были также подтверждены экспериментально. Как видно из рис. 10, имеет место хорошее совпадение теоретических данных с экспериментальными. Время флотации с коалесценцией при этом составляет 6 минут по истечении которых содержание флотокомплексов снизилось до 5го порядка малости. На основании полученных решений определяется время флотации (как сумма времени диспергирования и времени коалесценции) путем подстановки в решение исходных данных. Таким образом, общее время очистки составило 13 минут.

Выводы

Таким образом, в настоящей работе показана возможность применения вибрации для интенсификации флотационной очистки вод для оборотных систем водопользования. В ходе проведения экспериментов было установлено, что эффективность флотационной очистки с применением вибровоздействий может достигать 95 процентов на реальных стоках автомоечного комплекса. При этом, время флотации снижается практически вдвое по сравнению с пневматической флотацией.

Кроме того, показано хорошее согласование данных теоретических расчетов и экспериментальных данных, что свидетельствует о том, что разработанная математическая модель может применяться для расчет аппаратов виброфлотационной очистки.

Следует отметить, ЧТО предлагаемая конструкция аппаратов универсальна. Во-первых, она позволяет, в зависимости от требуемой степени очистки использовать камеры диспергирования, коалесценции вместе и по отдельности. Помимо этого. имеется возможность модернизировать существующие пневматические флотационные аппараты, увеличивая таким образом эффективность очистки, либо увеличивая производительность.

Литература

 Алферова Л.А., Нечаев А.П. Замкнутые системы водного хозяйства промышленных предприятий, комплексов и районов/Под ред. С.В. Яковлева.
 М.: Стройиздат. 1984. 272 с.

2. Замкнутые системы водообеспечения химических производств. М.: Химия, 1990, 208 с.

3. Общесоюзные нормы технологического проектирования автотранспортных предприятий: ОНТП-01-86/Минавтотранс РСФСР. М., 1986. 128 с.

4. Общесоюзные нормы технологического проектирования авторемонтных предприятий: ОНТП-02-86/Минавтотранс РСФСР. М., 1986.128 с.

5. Ксенофонтов Б.С. Очистка воды и почвы флотацией. М.: Новые технологии. 2004. 224 с.

6. Ксенофонтов, Б. С. Флотационная очистка сточных вод с использованием вибровоздействий / Б. С. Ксенофонтов, М. В. Иванов, Р. Э. Геворкян // Безопасность жизнедеятельности. - 2011. - N 9. - С. 32-37.

7. Ксенофонтов Б.С. Флотационная обработка воды, отходов и почвы. М.: Новые технологии.- 2010. – 272 с.

8. Рулев Н. Н., Колесников В. А., Карась С. В. Влияние коалесценции на распределение пузырьков по размерам в барботере флотомашины. //Химия и технология воды. 1991.-13, №2. 127-132 с.

electronic scientific and technical periodical SCIENCE and EDUCATION EL Nº FS 77 - 30569. Nº0421100025. ISSN 1994-0408

Intensification of Waste Water Flotation Treatment by Vibration Excitement for Water Recycling

77-30569/340675

02, February 2012 Ksenofontov B.S., Ivanov M. V.

> Bauman Moscow State Technical University <u>kbsflot@mail.ru</u> <u>mivanov2005@mail.ru</u>

Introduction

Water reusage for industries and transport facilities in specially constructed water recycling systems seems to be the most efficient water usage. Water recycling systems had been widely used in the USSR [1-2]. We suppose that this was due to strict control of the municipal environment protection agencies in the area of water pollution. Nowadays, in the times of high bureaucracy and privacy protection inspectors often do not have enough rights to perform the control needed. Besides, quite often, industrial waste water may be illegally discharged into state collectors for household waste water, which are not designed for this. We hope, that these violations won't last long and soon some economic leverages will arise that would result in obtaining of high profits from water recycling systems usage in various industries, i.e. for car wash.

In modern Russia according to the federal regulations one has to use water recycling systems for car washes [3-4]. However, in practice, this happens quite rare. There are some reasons for this including the ones described above. Besides, modern water recycling technological lines are not perfect yet neither the ones designed in Russia, nor in any foreign company. It is most common to use filtration and reagent treatment with the consumption of large amounts of very expensive flocculants. The analysis of various technical solutions in creation of water recycling systems and broad experience have resulted in a conclusion that it is necessary to use flotation techniques in this area [5].

It was found out, that in many cases it is possible not to use these expensive flocculants or even any reagents. Still all the required recycled water quality parameters may be achieved. Later on, we have carried out a large work aimed to further improvement of the water recycling systems, to decrease the dimensions of the equipment used and to intensify the technological processes of water treatment, especially flotation treatment. In recent years a set of various flotation tanks has been designed that may be used, depending on their type, also in water recycling systems.

Materials and Methods

On of the possibilities to intensify the flotation treatment is obtaining finely dispersed gas (air) bubbles in the aeration area of the flotation tank, another – is coalescense of fine aggregates particle-bubble, what can result in their extraction in the effective area of the flotation tank. This may also result in decrease of the loss of the fine particles that haven't risen yet with the water flow. On of the ways of modernization of the pneumatic flotation tanks designed before and, hence, intensification of their efficiency is usage of vibration excitement. An experimental plant for vibro- flotation has been designed in Bauman Moscow State Technical University at the department of Ecology and Environment Protection. A scheme of this plant is shown on figure 1.



Fig. 1. Flotation tank with built-in vibration exciters A – water inlet, B – water outlet

1 – exciters, 2 – flotation chamber of dispersion, 3 – aerator, mechanically connected to the exciter, 4 – piston, mechanically connected to the exciter, 5 – flotation chamber of coalescense, 6 – fine-particle treatment module, 7 – body of the tank.

This apparatus is working as follows. A body of the tank 7 is divided into four chambers. Initial water A is supplied to the flotation chamber of dispersion 2, where an aerator 3 may be found that is connected to the exciter 1. Exciter are working constantly and transducing the reciprocal motion to the aerator. Due to the vibration excitement in water, a higher extraction rate may be achieved. Afterwards, treated water goes to the second chamber of coalescense 5, where a piston 4 can be found that is connected to the exciter 1. Here, due to vibration, aggregates particle-buuble coalescent, grow bigger and arise. Then, treated water goes to the standart fine-particle treatment module 6, where the residual contaminant is recovered. After this, treated water goes to the collection chamber and released from the tank via water outlet B.

During the experiments taken, a concentration of the oils in the waste water of a car wash has been determined. This was done by an independed analytical laboratory JSC «ROSA». Photos from the experiments are given on the figures 2 - 6. Vibration mode has been choosed based on the earlier researches [6]. So, for dispersion chamber vibration frequency was 90 Hz and level of the vibration - 2g.



Fig. 2. General view of the vibro- flotation tank.



Fig. 3. View from the above. Initial water.



Fig. 4. Froth.

Fig. 5. Treated water



Fig. 6. View on the flotation chamber.

Mathematical modelling

In order to design the processes of the vibro- flotation treatment a theoretical model was used that was developed based on the multistage model of prof. Ksenofontov [5, 7] and thoroughly described in [6].

The theoretical model is based on the following. The effect from vibration excitement on principle differs: depending on the vibration mode either air bubbles dispersion occures, or coalescence of the aggregates particle-bubble. Respectively, the theoretical model is divided into dispersion model and coalescence model.

Theretical model of flotation with dispersion of air bubbles.

A scheme of the model is shown on figure 7.



Fig. 7. A scheme of the flotation model with dispersion of air bubbles.
A – initial stage: particle and bubble are separated; B and C – stage of air bubble breach and formation of the aggregate particle-bubble; D – stage when aggregates rise and form the froth layer. K_i - transition constants from one stage to another.

Air bubble (stage A) is excited by vibration, breaks into two smaller ones, forms aggregates particle-bubble (stages B and C) and rises to the froth layer (stage D).

Besides, particles may directly rise to the froth layer, without the aggregate formation, or, vice versa, they may drop down from the froth layer back in the water. This model is described by an equation' system (1).

$$\begin{cases} \frac{dC_A}{dt} = -K_1 C_A + K_2 C_B - K_3 C_A + K_4 C_C + K_9 C_D - K_{10} C_A \\ \frac{dC_B}{dt} = K_1 C_A - K_2 C_B - K_5 C_B + K_6 C_D \\ \frac{dC_C}{dt} = K_3 C_A - K_4 C_C - K_7 C_C + K_8 C_D \\ \frac{dC_D}{dt} = K_5 C_B - K_6 C_D + K_7 C_C - K_8 C_D - K_9 C_D + K_{10} C_A \end{cases}$$
(1)

For every transition there are own transition constants K, which have a definite physical description and define some processes that take place in flotation tank. A solution of the equation system with the given constants K_i results in determining the change of pollutant's concentration in stages A, B, C and D in time t.

Theoretical model for flotation with coalescence of the aggregates.

A scheme of the model is shown of fig. 8.



Fig. 8. A scheme of the model for flotation with coalescence of the aggregates. B – stage when there are floating aggregates particle-bubble; D – stage when aggregates rise and form the froth layer. E – stage of aggregates coalescence. K_i - transition constants from one stage to another.

In this case aggregates (stage B) either directly get to the froth layer (stage D), or, due to vibration excitement, coalescent, grow bigger (stage E) and oly then go to the froth layer. This model may be described by the equation' system (2).

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}C_B = -K_5C_B + K_6C_D + K_{12}C_E - K_{11}C_B \\ \frac{d}{dt}C_E = K_{11}C_B - K_{12}C_E + K_{14}C_D - K_{13}C_E \\ \frac{d}{dt}C_D = K_5C_B - K_6C_D - K_{14}C_D + K_{13}C_E \end{cases}$$
(2)

For every transition there are own transition constants K, which have a definite physical description and define some processes that take place in flotation tank. A solution of the equation system with the given constants K_i results in determining the change of pollutant's concentration in stages B, E and D with time t.

Transition constants calculation

To solve equation' systems (1) and (2) an initial concentration of pollutants has to be set. A following is assumed:

$$C_{A}(t) + C_{B}(t) + C_{C}(t) + C_{D}(t) = C_{0}; C_{A}(0) = C_{0}; C_{B}(0) = 0; C_{C}(0) = 0; C_{D}(0) = 0.$$

Transition constants' values are calculated as follows.

$$\bullet \qquad K_1 = K_3 = \frac{1.5 qE}{k_0 \overline{D_e}},$$

where: q – barbotage rate, E – efficiency of particle capture by a rising bubble (it is describing a probability of bubble contacting the particle), $\overline{D_{ef}}$ - effective diameter of the bubbles in the flotation cell. k_0 – bubble polydispersity factor.

During the experiment air compressor was producing 150 l/min of air, cross section of the flotation chamber was 0,06 sq. m. So barbotage rate

$$q = \frac{150}{1000 \cdot 0.06 \cdot 60} \approx 0.042 \otimes \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}.$$

When there is a normal distribution of the air bubble polydispersity coefficient K_0 , varies as $1 \le K_0 \le 1,58$. High air flow and large cross section of the flotation chamber, as well as some features of the flotation tank may result in some distribution of the air bubbles dimensions. Therefore, we assume $K_0=1.58$.

Efficiency of particle capture E varies as $0,005 \le E \le 0,01$. We assume that its value is the lowest one: 0,005, because due to some features of the flotation tank there may some decrease in the particle capture efficiency take place.

Effective diameter of the air bubble produced was 0,1 mm. So constants K_1 and K_3 may be calculated as follows:

$$K_{1} = K_{3} = \frac{1.5 \, qE}{k_{0} \, \overline{D}} = \frac{1.5 \cdot 0.042 \cdot 0.005}{1,58 \cdot 0.01} = 0.002$$
$$K_{5} = K_{7} = \frac{\nu_{p}}{h},$$

where
$$v_p$$
 – bubble surfacing velocity; h – distance from the aeration area to the froth layer (depth of the flotation chamber).

Depth of the flotation chamber is 1 m. Bubble velocity is 0.02 m/s (as there are some surfactants in the car wash waste water). So, constants K_5 and K_7 may be calculated as follows:

$$K_5 = K_7 = \frac{V_{pod}}{h} = \frac{0,02}{1} = 0,02$$

 $K_9 = \frac{V_{\infty}}{h}$, where $v_{0,c}$ - velocity of particles sedimentation. It is equal 0,001 m/s. So, constant K₉ may be calculated as follows:

v 0.001

$$K_9 = \frac{V_{oc}}{h} = \frac{0,001}{1} = 0,001$$

• $K_{11} = \frac{4G\alpha\phi}{3\pi}$, where G – effective shear gradient of the hydrodynamic field:

 $G = \sqrt{qg/v}$, g – free fall acceleration, 9.82 m/s²; v – water kinematic viscosity v=10⁻⁶ m²/s; α - coalescence efficiency, α =10⁻²; φ - gas phase volume share φ =0,02 [8]. q=0.006. So,

$$G = \sqrt{\frac{0.006 \cdot 9.82}{10^{-6}}} = 242,73$$
$$K_{11} = \frac{4G\alpha\phi}{3\pi}$$
$$K_{11} = \frac{4 \cdot 242.73 \cdot 10^{-2} \cdot 0.02}{3 \cdot 3.14} = 2.0 \cdot 10^{-2}$$

• $K_{13} = \frac{v_{pod}^{of}}{h}$, where v_{pod}^{of} – surfacing velocity of the coalescented bubble, 0,005

m/s. So:

$$K_{13} = \frac{v_{pod}^{of}}{h} = \frac{0,005}{1} = 0,005$$

All the other constants turn zero, because with the given conditions and with the given waste water neither an aggregate will not break once it was formed, nor self arisal of the contamninat particle, nor loss of the aggregate from the froth layer.

Experiments results and theoretical model verification

After calculation of all the transition constants and solving the equations' systems (1) and (2), a solution was obtained, which is graphically presented on figures 9 and 10.



Fig. 9. Comparision of theoretical and experimental data of vibro- flotation of car wash waste water in the dispersion chamber. Z^{<1>} - time, s; Z^{<2>} - oils concentration in the treated water; Z^{<3>} и Z^{<4>} - aggregates concentration; Z^{<5>} - oils concentration in the froth layer.

Lines – theoretical data, dots - experimental.



Fig. 10. Comparision of theoretical and experimental data of vibro- flotation of car wash waste water in the coalescence chamber. $Z^{<1>}$ - time, s; $Z^{<2>}$ - oils concentration in the treated water; $Z^{<3>}$ - concentration of the coalescent aggregates; $Z^{<4>}$ - oils concentration in the froth layer. Lines – theoretical data, dots - experimental.

Theoretical data has been also proven experimentally. A waste water of car wash was used for this. As it may be seen from fig. 9 there is a good correlation between theoretical and experimental data. Duration of flotation with dispersion was 7 minutes, after which oil concentration has decreased from 2.5 to 0.8 mg/l. As the residual concentration is 0.8 mg/l aggregates are directed to the coalescence chamber.

Same way, coalescence chamber has been also designed. And the respective model was used. As it may be seen from fig. 10 there is a good correlation between theoretical and experimental data. Duration of flotation with dispersion was 6 minutes, after which oil concentration has decreased to 0,001 mg/l.

Basing on the solution obtained a total flotation duration may be calculated (as a summ of flotation with dispersion and flotation with coalescence). So. The total flotation duration is 13 minutes. Flotation efficiency is 93%.

Conclusions

So, it was shown a possibility of vibration excitement usage for flotation waste water treatment intensification in water recycling systems. As the experiments were taken, it was found that flotation efficiency may rise up to 95% for real waste waters. At the same time, flotation time decreases by two times compared to pneumatic flotation treatment.

Besides, a good correlation of experimental and theoretical data is presented. This may result in conclusion, that the developed theoretical model may be used for design of vibro- flotation treatment plants.

It is very important, that the described here flotation plant is uniform. Firstly, it allows depending on the required efficiency use chambers of dispersion or coalescence separately or together. Furthermore, with the given technology, it is possible to upgrade the existing pneumatic flotation plants and multiple either treatement efficiency, or their performance.

References

1. Alferova L.A., Nechaev A.P. Zamknutye sistemy vodnogo khoziaistva promyshlennykh predpriiatii, kompleksov i raionov [Closed systems of water supply for industrial enterprises, facilities and districts]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1984. 272 p.

 Belichenko Iu.P. Zamknutye sistemy vodoobespecheniia khimicheskikh proizvodstv [Closed systems of water supply for chemical plants]. Moscow, Khimiia Publ., 1990.
 208 p.

3. *All-Union standards for technological design of transport companies: ONTP-01-86* (in Russ.). Moscow, Minavtotrans RSFSR, 1986. 128 p.

4. *All-Union standards for technological design of auto-repair companies: ONTP-02-86* (in Russ.). Moscow, Minavtotrans RSFSR, 1986. 128 p.

5. Ksenofontov B.S. *Ochistka vody i pochvy flotatsiei* [Water and soil reclamation by flotation]. Moscow, Novye tekhnologii Publ., 2004. 224 p.

6. Ksenofontov B.S., Ivanov M.V., Gevorkian R.E. Flotatsionnaia ochistka stochnykh vod s ispol'zovaniem vibrovozdeistvii [Sewage treatment by flotation with use of

vibrating influence]. *Bezopasnost' zhiznedeiatel'nosti* [Life safety], 2011, no. 9, pp. 32-37.

7. Ksenofontov B.S. *Flotatsionnaia obrabotka vody, otkhodov i pochvy* [Flotation treatment of water, waste and soil]. Moscow, Novye tekhnologii Publ., 2010. 272 p.

8. Rulev N.N., Kolesnikov V.A., Karas' S.V. Vliianie koalestsentsii na raspredelenie puzyr'kov po razmeram v barbotere flotomashiny [Effect of coalescence on the size distribution of bubbles in a flotation bubbler]. *Khimiia i tekhnologiia vody*, 1991, vol. 13, no. 2, pp. 127-132.