

УДК 628.543

В.А. ОСТАПЮК

аспирант Киевского национального университета строительства и архитектуры,
ведущий инженер водоснабжения, канализации и очистки сточных вод корпорации «Энергоресурс-инвест»

ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ФЛОТАЦИЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТРУБНОГО САТУРАТОРА

DAFTECHNOLOGYIN WASTEWATERTREATMENTUSINGSATURATION TUBE

На основании результатов экспериментальных исследований выявлены особенности насыщения воды воздухом в трубном сатураторе для последующего качественного выделения микропузырьков во флотационной камере.

Ключевые слова: очистка сточных вод, нефте-содержащие стоки, жиросодержащие стоки, флотация, напорный флотатор, массопередача газов (воздуха).

Флотация является самым эффективным и экономически выгодным методом выделения эмульгированных гидрофобных частиц от водных растворов, нефти, жира и других аполярных веществ. В водоочистке, как в Украине, так и в других странах, в основном применяют напорную флотацию (DAF, dissolvedairflotation) в связи с возможностью извлечения мелкоэмульгированных загрязнений (от 5-10 мкм) с помощью введения во флотационную камеру пузырей от 15-30 мкм, затрачивая минимум энергии.

Теоретические основы и способы флотации изложены в [1]. Там же приведен вариант использования сатуратора (напорного бака) в виде трубы, спирально закрученной и сваренной, а также являющейся стенками флотационной камеры. Описаны гидродинамические условия движения водовоздушной смеси в трубе, приводящие к возможному увеличению и ускорению их массообмена. На основании этих данных был получен патент Украины [2].

Для решения задач оптимального проектирования трубного сатуратора необходимо знать все протекающие процессы, связанные с забором воды и воздуха, их совместным протеканием в трубе, а также выпуском во флотационную камеру водовоздушной смеси. Моделирование данных процессов необходимо для качественных и количественных данных. С этой целью был разработан и построен экспериментальный флотатор с трубным сатуратором DAF-ST (dissolvedairflotation– saturationtube) (рис. 1).

Based on the results of experimental studies the peculiarities saturation of water by air in saturation tube for subsequent qualitative generation of microbubbles in a flotation cell.

Key words: wastewater treatment, oil wastewater, grease wastewater, flotation, DAF, mass transfer of gases (air).

Высота флотационной камеры 2,0 м, диаметр 0,9 м, основной материал полиэтилен с окнами из оргстекла (4 окна шириной 150 мм по всей высоте). Классический напорный бак (сатуратор) заменен трубным сатуратором (прозрачный ПВХшланг с внутренним диаметром 12, 16 и 19 мм). Для циркуляционного насоса был выбран вихревой насос ($Q_{\max} = 47$ л/мин, $H_{\max} = 70$ м). В качестве измерительных приборов использовались: крыльчатый счетчик чистой воды ($Q_{\min} = 0,03$ м³/ч, $Q_{\max} = 3,0$ м³/ч), воздушный ротаметр ($Q_{\min} = 0,012$ м³/ч, $Q_{\max} = 0,175$ м³/ч), манометр ($P_{\max} = 6$ атм) и фотоаппарат (разрешение 4608x3072 пикселей).

Цель эксперимента заключалась в определении оптимальных параметров трубного сатуратора для последующего качественного выделения микропузырьков во флотационной камере, при минимальных затратах – определения места введения воздуха в воду, необходимых условий течения водовоздушной смеси (давления, скорости, соотношения воздуха и воды, времени насыщения и др.) и конструкции выпуска.

Введение воздуха в воду в сатуратор для насыщения

Вопрос уже рассматривался [3], и был выбран вариант ввода воздуха с помощью водовоздушного эжектора на всасывающей линии. В результате достигается:

- дополнительное дробление пузырей в эжекторе и частичное насыщение воды воздухом в самом насосе;

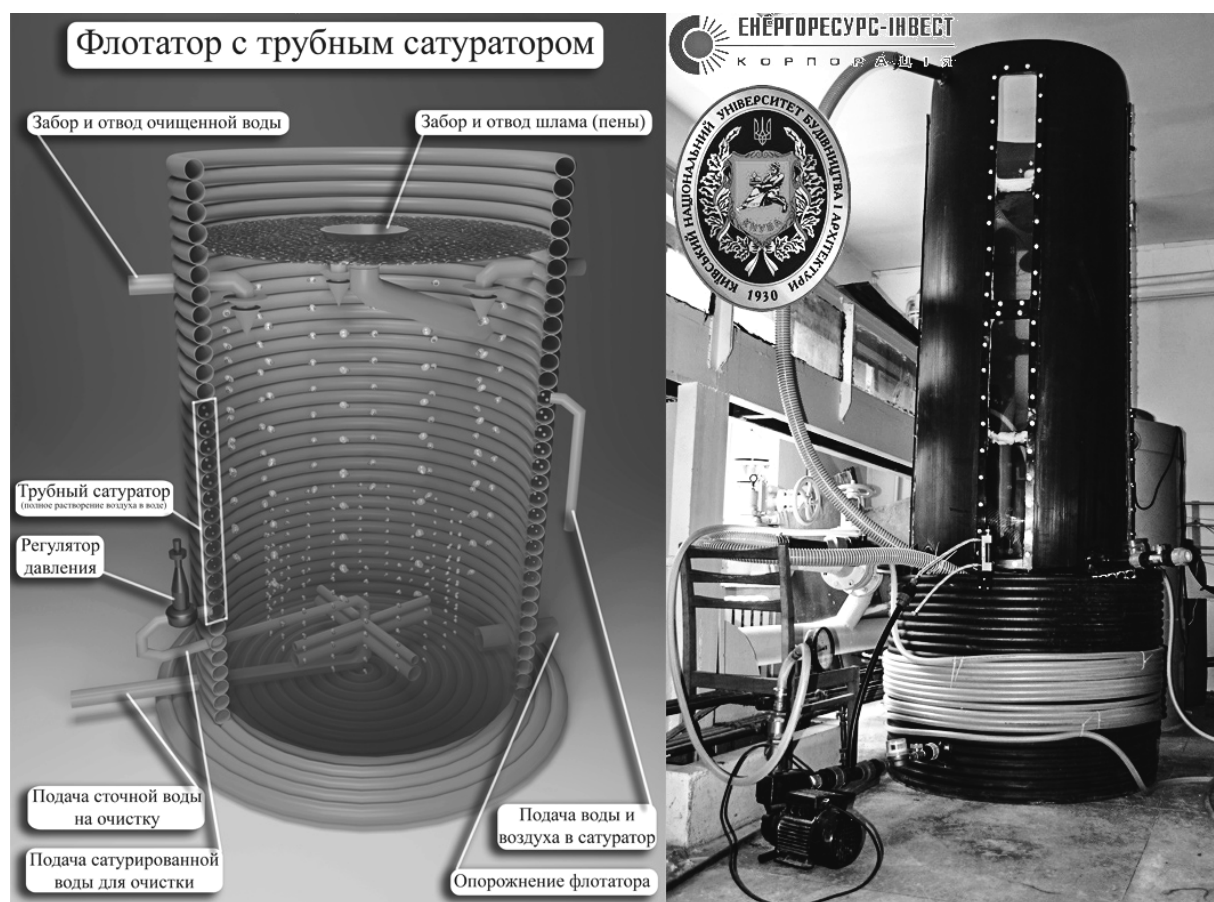


Рис. 1. Напорный флотатор с трубным сатуратором DAF-ST

- увеличение надежности системы (при монтаже эжектора на всасывающей линии используется сопло/труба сечением от 15 мм; в напорной линии сопло сечением от 1-2 мм, что приводит к забиванию и перерасходу энергии);

- уменьшение потребляемой энергии (нет необходимости в использовании компрессора).

Режимы движения водовоздушной смеси в трубном сатураторе

Трубный сатуратор предназначен для быстрого и полного насыщения воды воздухом.

Скорость массопередачи воздуха в воду описывается уравнением

$$\frac{\partial m}{\partial t} = S \cdot (C_H - C) \cdot K_L'$$

где S - площадь межфазного контакта, м²;

C_H - концентрация насыщения жидкости газом, кг/м³;

C - концентрация растворенного в жидкости газа, кг/м³;

K_L - коэффициент массопередачи жидкой пленки, м/с.

Как видно из уравнения, для увеличения массопередачи необходимо:

увеличить площадь межфазного контакта до S_{\max} , т.е. разбить воздух в сатураторе на пузырьки с минимальным радиусом, что достигается перемешивающим (турбулентным) движением водовоздушной смеси;

увеличить разницу $(C_H - C)$ до $(C_H - C)_{\max}$, что достигается увеличением давления в сатураторе и уменьшением уровня воды во флотаторе;

найти $K_{L, \max}$, увеличив взаимодействие всего воздуха пузыря с водой (трение пузыря в потоке воды).

Необходимо определить оптимальный режим движения водовоздушной смеси. Из опытов было определено, что оптимальный режим должен зависеть от числа Рейнольдса (степень турбулентности) и объемного соотношения воздуха и воды в трубном сатураторе.

Было рассмотрено движение водовоздушной смеси в трубном сатураторе в шлангах диаметрами 12, 16, и 19 мм при давлении от 1,6 до 6,0 атм.

Вода является трудносжимаемым веществом. Так, при увеличении атмосферного давления на 1 атм вода сжимается на 0,00005 доли её начального объёма. В данном случае вода принята несжимаемой.

В отличие от воды, параметры воздуха (давление, температура, объём) существенно меняются от изменения внешних условий.

Согласно закону Бойля-Мариотта, при постоянной температуре (в данном случае температура постоянна $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$) и массе идеального газа произведение его давления и объёма постоянно ($p \cdot V = const$). При повышении давления газа пропорционально уменьшается объём. Так как средняя молярная масса воздуха условно небольшая (28,98 г/моль), то в данном случае эту формулу можно применить к воздуху. Тогда при увеличении давления на некоторую величину p_m (избыточное давление) пропорционально изменится объём воздуха:

$$p_{atm} \cdot V_1 = (p_{atm} + p_m) \cdot V_2,$$

$$V_2 = V_1 \cdot p_{atm} / (p_{atm} + p_m).$$

Соответственно изменится и плотность воздуха в трубном сатураторе, но в сторону увеличения значения:

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot (p_{atm} + p_m) / p_{atm}.$$

Из-за большой разницы в плотностях воды и воздуха (при атмосферном давлении - 829 раз, при избыточном давлении 6 атм. - 118 раз) при течении в горизонтальной трубе происходит разделение, воздух движется в верхней части сатуратора большими пузырями (рис. 2), из-за чего уменьшается площадь межфазного контакта. И только при определенном значении числа Рейнольдса и соотношении объемов воздуха и воды наблюдалось разбивание больших пузырей на мелкие (средним диаметром 2 мм) и их движение в верхней зоне.

Общая площадь пузырей (межфазного контакта) связана с общим объемом воздуха в сатураторе следующим уравнением:

$$S_{total} = 6 \cdot V_{total} / d_{bubble}.$$

Так, при постоянном объеме, при увеличении среднего диаметра пузыря в два раза, общая площадь контакта уменьшится в два раза, что приведет к увеличению времени насыщения ориентировочно в два раза.

На графиках 1, 2 и 3 приведены данные для трех случаев (шланг диаметром 12, 16 и 19 мм). Показано максимальное соотношение объемов воздуха/воды, при которых средний диаметр пузырей

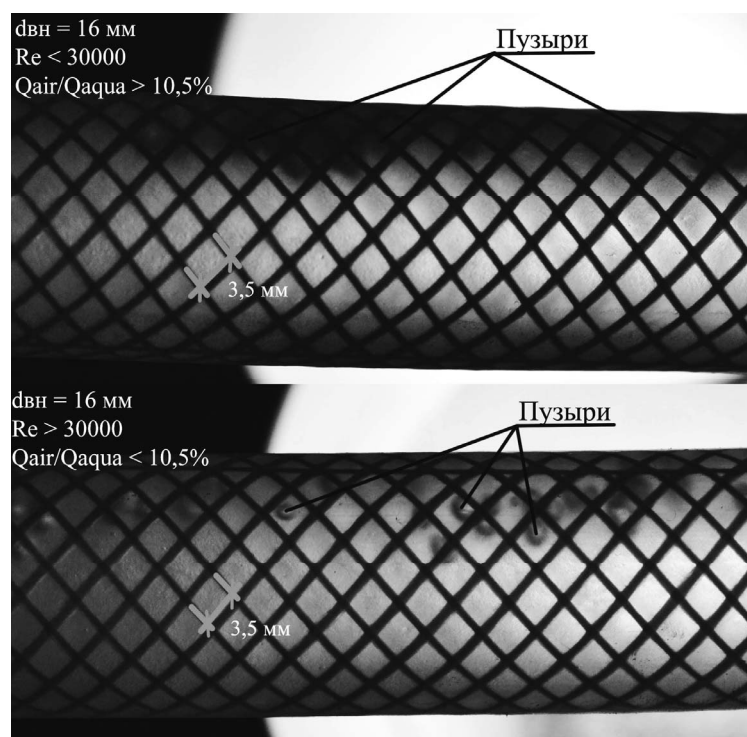
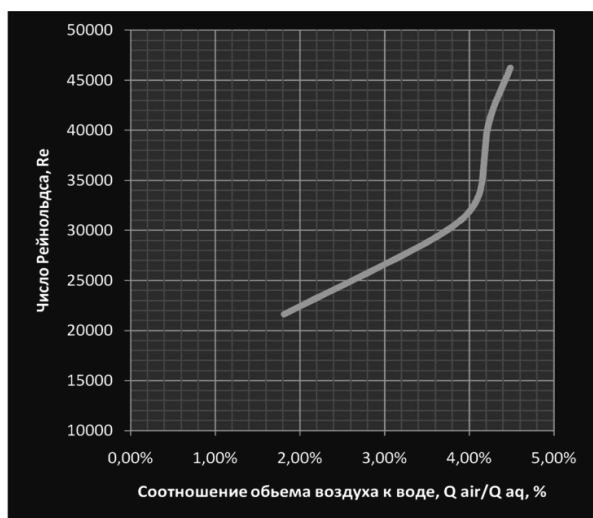
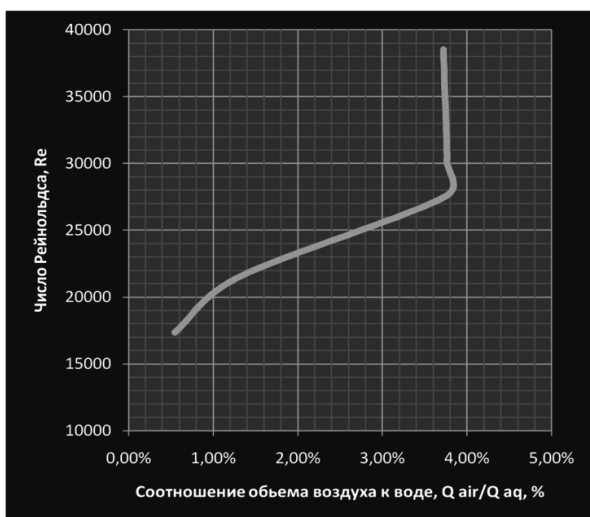


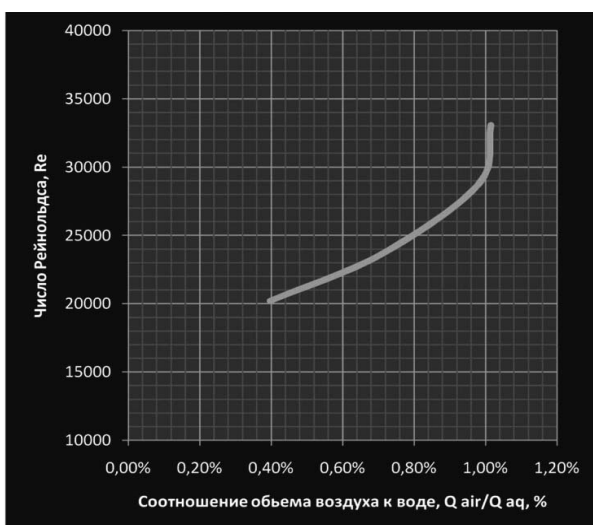
Рис. 2. Движение водовоздушной смеси в трубе (шланге) при разных режимах



Граф. 1. Движение водовоздушной смеси в шланге 12 мм



Граф. 2. Движение водовоздушной смеси в шланге 16 мм



Граф. 3. Движение водовоздушной смеси в шланге 19 мм

2 мм и они движутся в верхней части сатуратора толщиной до 8 мм.

Из графиков можно предположить, что для течения отдельных пузырей только при $Re > 30000$ ($p_m = 1,6-1,8$ атм) отношение объемов воздуха/воды достигает максимального значения (для шланга 12 мм – 4,25 % (на входе в ротаметр 11,0 %), для шланга 16 мм – 3,75 % (на входе в ротаметр 10,5 %), для шланга 19 мм затруднительно сделать вывод из-за малой мощности насоса и соответственно нехватки данных).

При движении водовоздушной смеси в сатураторе с числом Рейнольдса выше 30000 и объемном соотношении расходов воздуха и воды ниже 10 % (на входе в сатуратор) достигается S_{max} (разбивание воздуха на мелкие пузыри) и $K_{L,max}$ (увеличение трения пузыря в потоке воды при турбулентном режиме).

Соотношением объемов воздуха и воды можно определить оптимальное давление в сатураторе. 10 % равняется 100 мл/л концентрации воздуха в воде, полное растворение воздуха в воде такой концентрации достигается при давлении 5-5,5 атм (также при низком солесодержании воды требуется пониженное давление, при высоком – повышенное давление). Рекомендуемое давление для трубного сатуратора 5-5,5 атм.

Также необходимо определить время полного насыщения воды воздухом. Было исследовано движение водовоздушной смеси в трубном сатураторе длиной 5,5 и 50,0 м (соотношение воздуха и воды 8 %, давление 4,5 атм, время пребывания смеси 0,1 и 0,9 мин). На выходе из сатуратора во флотатор стояло сопло диаметром 2,5 мм (рис. 3).

Проанализировав в программе «AltamiStudio 3.3 demo» количество калибровочных пузырей на выходе с сопла, получили такие результаты - граф. 4 и 5. На рис. 4 изображены пузыри после сопла при длине сатуратора 5,5 и 50,0 м.

При длине сатуратора 5,5 м основной размер пузырей от 0,2 до 0,4 мм (разрешение фотоаппарата позволяет увидеть пузыри от 0,15 мм), что достигается выделением частично насыщенного воздуха и дроблением нерастворившихся пузырей в сопле. При длине сатуратора 50,0 м основной размер пузырей 0,2 мм и менее (в основном происходит выделение насыщенного воздуха и частично дробятся нерастворившиеся пузыри).

Были проведены опыты по определению размеров пузырей во флотаторе после полного насыщения воды воздухом в сатураторе [4]. При давлении в



Рис. 3. Выход из сатуратора во флотатор, сопло диаметром 2,5 мм

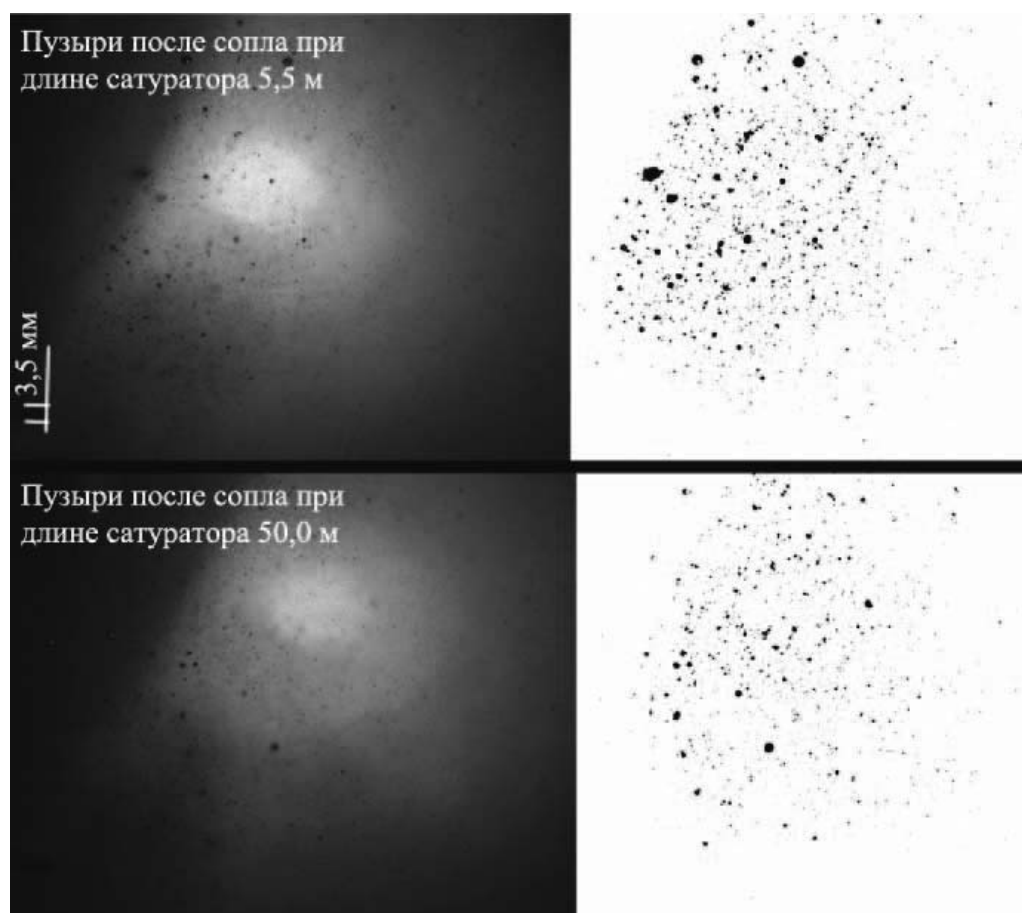
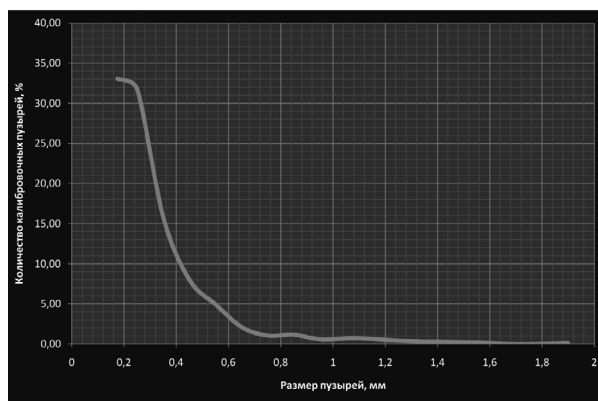


Рис. 4. Изображения пузырей (после применения адаптивного фильтра)



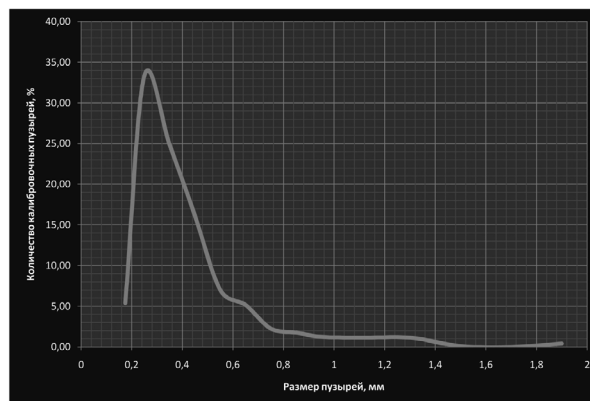
Граф. 4. Соотношение пузырей по размерам (выше 0,15 мм). Длина сатуратора 50,0 м

сатураторе 3,4 атм выделялись пузыри размерами от 45 до 115 мкм.

По мнению автора статьи, для флотации наиболее подходящий размер пузырей от 100 до 200 мкм (при большем размере пузырей происходит движение пузыря с завихрениями, которые приводят к отрыву прикрепленной частицы (загрязнения), а также к уменьшению относительной скорости подъема пузыря; при меньшем размере пузырей уменьшается подъемная сила и увеличивается их инерционность, что приводит к выносу пузырей с частицами в забор очищенной воды).

В данном случае нет необходимости в полном насыщении воздуха в воде.

Можно сделать вывод, что при *продолжительности насыщения воды воздухом в сатураторе не менее 1 мин будет выделение пузырей во флотаторе со средним диаметром 150 мкм* для качественного удаления загрязнений со сточной воды.



Граф. 5. Соотношение пузырей по размерам (выше 0,15 мм). Длина сатуратора 5,5 м

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Остапюк, В.А. Очистка сточных вод, содержащих эмульгированные гидрофобные загрязнения [Текст] / В.А. Остапюк // Водне господарство України. - №2(104). - 2013.
2. Остапюк, В.А. Установка «Флотатор с трубным сатуратором» [Текст] / В.А. Остапюк, И.М. Таварткиладзе // Патент Украины на полезную модель № 79440 от 25.04.2013.
3. Дерягин, Б.В. Микрофлотация: водоочистка, обогащение [Текст] / Б.В. Дерягин, С.С. Духин, Н.Н. Рулев. - М.: Химия, 1986.
4. Lawrence, K. Wang Aulenbach - Flotation Technology [Text] / K. Wang Lawrence, K. Shammas Nazih, A. Selke William, B. Donald. - New York: Springer Science, 2010.

© Остапюк В.А., 2013