

- сооружениях с аэротенками / Н.С. Жмур. - М.: Луч, 1997.- 172 с.
7. Олійник О.Я. Аналіз моделей біологічного очищення стічних вод в аэротенках / О.Я. Олійник, Т.С. Айрапетян // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2014.- Вип. № 3 (77).- С. 198-201.
  8. Панкратова С.А. Математическое моделирование и управление качеством сточных вод / С.А. Панкратова, В.М. Емельянов, А.С. Сироткин, М.В. Шулаев // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 6. – С. 76-85.
  9. Эпоян С.М. Повышение эффективности биологической очистки и доочистки сточных вод в закрытых циркуляционных окислительных каналах / С.М. Эпоян, И.Ю. Штонда, Ю.И. Штонда, А.Л. Зубко, Я. Лешенарова // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2014.- Вип.№ 1 (75). - С. 106-108.
  10. Горносталя С.А. Исследование процесса биологической очистки сточных вод в системе «аэротенк – вторичный отстойник» / С.А. Горносталя // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – Белгород. – 2013. – № 4. – С. 164-167.
  11. Горносталя С.А. Практичне застосування результатів моделювання процесу біологічного очищення стічних вод. / С.А. Горносталя, О.А.Петухова, Т.С.Айрапетян // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ. – 2015. – Вип. 1(79). – С. 255-258.

УДК 628.16

**Сыроватский А.А., Бабенко С.П., Гайдучок А.Г., Рыбачук Ю.М.**  
*Харьковский национальный университет строительства и архитектуры*

### **ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ПРИРОДНЫХ МАЛОМУТНЫХ ЦВЕТНЫХ ВОД МЕТОДОМ НАПОРНОЙ ФЛОТАЦИИ**

**Введение.** На сегодня, состояние водоемов нашей страны вызывает естественную тревогу в связи с прогрессирующими загрязнениями их промышленными и другими стоками, химизацией сельского хозяйства, а так же в связи с возрастающими требованиями к качеству очистки, приводящим к необходимости использования все менее пригодных по качественным показателям водоисточников [1-2]. Маломутные цветные воды - это воды, имеющие максимальные значения взвешенных веществ менее 50 мг/л и цветность более 35 градусов по платиново-кобальтовой шкале. В отличие от мутности воды, характеризующейся содержанием в ней частиц минерального происхождения (песок, ил, глина), цветность воды является косвенным показателем содержания веществ органического характера (гуминовых и дубильных веществ). Взвешенные вещества в основном представлены мелким песком, илом, глиной и имеют дисперсность (в

среднем)  $10^2-10^4$ . Вместе с тем часть примесей имеет более высокую дисперсность и гидравлическую крупность частиц до 0,01 мм/с и менее. Цветность воды обусловлена присутствием гуминовых веществ, вымываемых из почв или образующихся в результате жизнедеятельности водной растительности. Основным компонентом гуминовых веществ являются фульвокислоты, находящиеся в молекулярном состоянии, а также коллоиды гуминовых кислот. Фульвокислоты образуют в результате реакции с катионами кальция или магния трудно растворимые соединения. Очистка таких вод, осуществляемая по традиционным технологиям, связана с большими технологическими трудностями, обусловленными особенностями состава и фазово-дисперсного состояния загрязнений [2]. Как правило, это низкие величины фильтроциклов, неудовлетворительная скорость отстаивания хлопьев, повышенные дозы коагулянтов и других

реагентов, «проскок» продуктов гидролиза и веществ, обуславливающих цветность, в очищенную воду, высокая токсичность хлорорганических соединений, образующихся при хлорировании [1]. В связи с этим на сегодняшний день весьма актуальным как для Украины, так и для других стран является поиск новых методов и технологий очистки, позволяющих обеспечить требуемое качество воды при сравнительно невысоких затратах.

На наш взгляд наиболее перспективным методом является флотационный метод очистки. Флотация – это процесс удаления из воды мелких твёрдых и плавающих частиц, основанный на различии их смачиваемости водой. Принцип метода напорной флотации заключается в том, что обрабатываемую воду под давлением насыщают воздухом или другим газом. Попадая в зону меньшего давления, из насыщенной воздухом воды выделяются мельчайшие пузырьки (дисперсность пузырьков газа от 15мкм - 30мкм), необходимые для флотации легкой взвеси. Таким образом, флотация - это процесс, основанный на всплывании коллоидных и дисперсных примесей вместе с пузырьками воздуха и образование на поверхности флотатора пены [3-4]. Идея очистки с помощью этого метода привлекательна не только из-за экономической целесообразности, но также из-за возможности комплексного решения проблем: уменьшение нагрузки на водоочистные сооружения и уменьшение объёма осадка после этих сооружений [5].

**Цель и задачи.** Целью данного исследования является изучение метода напорной флотации применительно к маломутным цветным водам поверхностных источников, определение основных закономерностей и факторов, влияющих на эффективность процесса очистки, а также поиск направлений дальнейших исследований для интенсификации выделения загрязнений из воды.

#### **Результаты исследований**

Напорная флотация является сравнительно новой технологией в водоподготовке. Впервые она была применена в 1960-х годах в Швеции и Финляндии [6].

В США внедрение метода напорной флотации при производстве питьевой

воды началось в 1980-х годах. Разработка осуществлялась компанией Krofta Engineering Corp. В их числе в 1986-87 гг. была запущена в эксплуатацию установка мощностью 90000 м<sup>3</sup>/сутки. В настоящее время более, чем в 20 странах мира (прежде всего в Канаде и США) насчитываются сотни установок напорной флотации мощностью более 50000 м<sup>3</sup>/сутки [6]. Известен опыт внедрения флотационных установок мощностью свыше 60000 м<sup>3</sup>/сутки и в России при очистке вод поверхностных источников [7]. Таким образом, как видно, прослеживается тенденция увеличения использования напорной флотации как природных, так и сточных вод различного происхождения [5].

Обработку воды флотацией рекомендуется применять при ее мутности до 150мг/л и цветности до 200 градусов по платиново-кобальтовой шкале. Это позволяет уменьшить объем водоочистных сооружений вследствие ускорения в 3-5 раз процесса выделения взвеси из воды, отказаться от микрофильтров, улучшить санитарное состояние очистных сооружений [8-10].

Для использования на очистных сооружениях наиболее удобным является метод напорной флотации, при котором очищаемую воду под давлением насыщают воздухом, а при понижении давления до атмосферного во флотаторе мелкие пузырьки воздуха начинают выделяться из раствора [9-10]. В этом случае частицы взвеси собираются на поверхности раздела двух фаз «воздух-жидкость», прилипают к пузырькам воздуха и выносятся с ними на поверхность. Объем вводимого воздуха составляет 0,9-1,2%, от объема обрабатываемой воды [8]. Вид содержащихся в воде загрязнений определяет характер флотационной обработки: одним воздухом или воздухом в сочетании с различными реагентами [7-8].

Воздух представляет собой смесь газов. Растворимость газов в воде подчиняется закону Генри, из которого следует, что при постоянной температуре растворимость каждого из компонентов газовой смеси в данной жидкости прямо пропорциональна его парциальному давлению

над жидкостью и не зависит от общего давления газовой смеси и общего содержания других компонентов. Количество воздуха, которое может быть растворено в воде, зависит от давления, температуры, времени насыщения и способа их взаимодействия. Эта зависимость выражается уравнением [3-4]:

$$Q = p B (1 - e^{-kT}) \quad (1)$$

где  $Q$  – количество воздуха, растворенного в воде, мг/л;  $p$  – давление насыщения, Па;  $B$  – растворимость воздуха в воде, мг/л;  $k$  – константа скорости насыщения,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $T$  – время насыщения, мин.

Давление влияет не только на количество воздуха, которое может раствориться в воде, но и на размер самих пузырьков. Это давление колеблется в довольно широких пределах от  $3 \cdot 10^5$  до  $9 \cdot 10^5$  Па адекватно характеристике выделяемой суспензии [5].

Контактирование пузырьков воздуха и частиц примесей возможно двумя путями: при столкновении частиц с поверхностью пузырьков или при их образовании на частицах при выделении растворенных газов. Для напорной флотации, при очистке природных вод, процесс взаимодействия пузырьков при их столкновении с частицами примесей является основным и поэтому представляет практический и теоретический интерес.

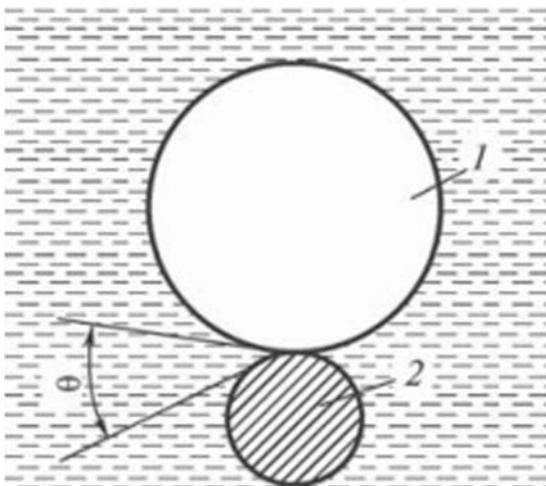


Рис. 1. Схема прилипания пузырька воздуха 1 к частице загрязнений 2

Прикрепление пузырьков к частице характеризуется краевым углом смачивания  $\theta$ , который образуется поверхностью частицы и касательной к поверхности пузырька (рис. 1). Величина краевого угла смачивания определяется размерами частицы и пузырька, а также поверхностным натяжением на границе раздела трех фаз: твердого тела (частицы), жидкости и воздуха [3-5].

Одним из параметров, играющим заметную роль в эффекте очистки методом напорной флотации, является размер пузырьков выделяющегося из раствора воздуха [3-4]. Здесь прослеживается определенная закономерность: чем меньше размер пузырька – тем большее количество пузырьков в воде; чем их больше – тем выше шанс закрепить частицы загрязнений на поверхности пузырька; чем выше этот шанс – тем выше эффект очистки.

Растворенный воздух выделяется из воды при понижении давления, что и используется в установках напорной флотации. Минимальный размер пузырьков воздуха, которые образуются при понижении давления [3]:

$$R_{\min} = \frac{2 \sigma_{гж}}{p_1 - p_2} \quad (2)$$

де  $R_{\min}$  - минимальный радиус пузырька воздуха, см;  $\sigma_{гж}$  - поверхностное натяжение на границе газ-жидкость, Н/м;  $p_1 - p_2$  - перепад давления, Па.

Из формулы (2) следует, что размер образующихся пузырьков тем меньше, чем меньше поверхностное натяжение на границе воздух-вода и чем больше пересыщение воды воздухом или больше перепад давления при выпуске водовоздушной смеси в обрабатываемую воду, тем выше эффект очистки воды.

Другой параметр, также напрямую влияющий на эффективность флотационной очистки – температура воды [4]. Чем температуры воды больше, тем хуже растворяется воздух (рис. 2). То есть для достижения максимального эффекта следует стремиться к понижению температуры водовоздушной смеси. На рис. 3 представлена зависимость изменения концентрации воздуха в обрабатываемой воде при температуре 20<sup>0</sup>С при различных значениях давления и времени насыщения воды воздухом [3].



Рис. 2 Зависимость растворимости воздуха в воде от температуры

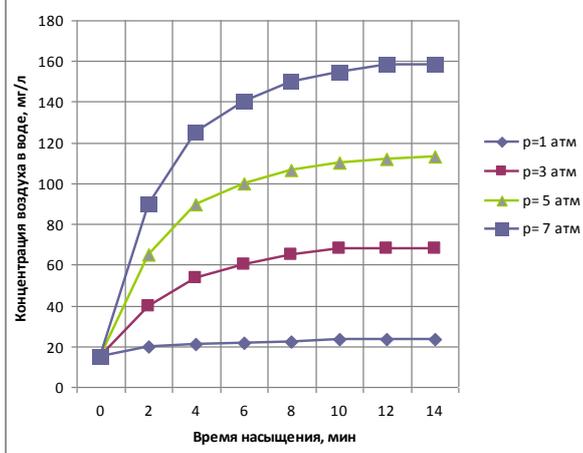


Рис. 3 Изменение концентрации воздуха в воде при температуре 20<sup>0</sup>С при различном давлении и времени насыщения

Из рис. 2 и 3 видно, что чем меньше температура воды, тем больше растворимость, что положительно влияет на эффект очистки. Оптимальное давление для флотации 4,5 – 5 атм. Основная масса воздуха при этом растворяется в течение 10 минут.

Исследования авторов [3, 4] показали, что выделение пузырьков из пересыщенного раствора происходит практически мгновенно. Для определения количества выделенных пузырьков можно воспользоваться формулой [4]:

$$N_T = 0,03 \frac{K^3 (C - C_1)^4}{p \lambda \sigma_{гж}^3} \quad (3)$$

где K – константа Генри, Па; C – C<sub>1</sub> - величина пересыщения водовоздушного раствора; Н/м<sup>2</sup>; p – плотность газа в пузырьках, Н/м<sup>3</sup>; λ - линейная скорость роста пузырьков, см/с, σ<sub>гж</sub> поверхностное натяжение на границе воздух-вода, Н/м.

Из приведенной зависимости видно, что увеличение степени пересыщения воды воздухом способствует не только уменьшению размеров пузырька, но и выделению большего их количества.

Таким образом, проведя анализ наиболее значимых факторов, влияющих на эффективность флотационной очистки, можно сделать следующий вывод. Повысить эффективность очистки напорной флотацией маломутных цветных вод поверхностных источников можно следующими путями: 1) Уменьшить размер пузырьков воздуха путем увеличения перепада давления; 2) Увеличить гидрофобизацию поверхности частиц загрязнений, тем самым изменив поверхностное натяжение σ<sub>гж</sub>; 3) Снизить температуру водовоздушной смеси.

Эффект очистки напорной флотацией возможно улучшить увеличив давление, при котором проходит насыщение воды воздухом [7]. Метод достаточно прост в реализации, однако имеется ряд определенных недостатков: возрастают затраты на электроэнергию; при увеличении давления может возникнуть необходимость в изменении параметров флотационной камеры. Давление при этом составляет 4,5 – 5 атм.

Еще одним направлением интенсификации напорной флотации есть метод увеличения гидрофобизации частиц (дозировка в исходную воду коагулянтов и флокулянтов) [8]. Сочетание напорной флотации с реагентной обработкой электролитами и полиэлектролитами позволяет рассчитывать на повышение очистки вод от нефтепродуктов до 90-95% и от механических

примесей до 85-95%. Однако этот метод также не лишен недостатков: значительные затраты на реагенты и содержание реагентного хозяйства.

Также следует отметить, что улучшить процесс флотационной очистки возможно также изменением температуры водовоздушной смеси. Но менять температуру самой воды не всегда рационально, потому логичнее будет обработка исходной воды охлажденным воздухом, благодаря чему произойдет теплообмен между водой и пузырьками, а, значит, уменьшится температура воды и улучшится эффект очистки. Этот метод также потребует дополнительных затрат на электроэнергию и обслуживание данной установки.

**Выводы.** Как видно из изложенного наиболее важными факторами являются давление, температура, время насыщения и способ взаимодействия пузырьков воздуха с загрязнениями. Метод напорной флотации достаточно перспективен. Вместе с тем, проводимые различными авторами исследований вопросов флотации маломутных цветных вод по-прежнему остаются малоизученными. В связи с этим нами поставлена задача исследовать влияние указанных выше факторов на эффективность процесса очистки маломутных вод.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Журба М.Г., Соколов Л.И., Говорова Ж.М. Водоснабжение. Проектирование

систем и сооружений. М.: Издательство АСВ, 2003.- Т.2.- 496с.  
 2. Фрог Б.Н., Левченко А.П. Водоподготовка: Учебн. пособие для вузов. М. Издательство МГУ, 1996 г. 680 с; 178 ил.  
 3. Edzwald J. K. Dissolved air flotation and me // Water Research. 2010. № 44. P. 2077–2106.  
 4. Классен В.И., Глембоцкий В.А. Флотация. М.: Недра, 1973.- 383с.  
 5. Дегремон. Технический справочник по обработке воды: в 2.т. – СПб.: Новый журнал, 2007.- 1695с.  
 6. Кофман В.Я. Напорная флотация в водоподготовке // Водоснабжение и санитарная техника.- №5.- М., 2013.- С. 23-26.  
 7. Фомина В.Ф., Фомин А.В. Эффективность внедрения напорной флотации для подготовки питьевой воды в республике коми // Известия Коми научного центра УрО РАН. Выпуск 4(16). Сыктывкар, 2013. С. 80-88.  
 8. Ивкин П.А., Латышев Н.С. Совершенствование технологии очистки высокоцветных и маломутных вод // Водоснабжение и санитарная техника.- №7.- М., 2010.- С. 38-47.  
 9. Adlan, M. N., Palaniandy, P., Aziz, H. A. Optimization of coagulation and dissolved air flotation (DAF) treatment of semi-aerobic landfill leachate using response surface methodology (RSM).Desalination, 2011, 277 (1-3), P.74-82.  
 10. Haarhoff, J. Dissolved air flotation; progress and prospects for drinking water treatment. Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua, 2008, 57 (8), P.555-567

УДК 628.168:628.35

**Нечитайло Н.П., Нагорная Е.К.**

*Государственное высшее учебное заведение*

*«Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННЫХ МЕМБРАН ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД**

**Введение.** При обработке муниципальных сточных вод на существующих городских очистных сооружениях не происходит удаление биогенных элементов на достаточном уровне, что ведёт к их

сбросу в объекты водопользования. Недостаточно очищенные сточные воды, которые обогащены органическими соединениями азотной группы и фосфатами, приводят к эвтрофикации водоемов.