

Н. И. Болонов, д-р техн. наук профессор, А. И. Барыбин

Донецкий национальный университет, г. Донецк

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АЭРАТОРОВ

Описано новую конструкцию аэратора, альтернативного струйным устройствам газонасыщения. Приведены результаты экспериментальных исследований эффективности аэрации промышленного образца предлагаемого аэратора. Выявлено, что для данной конструкции эффективность аэрации достигает 1,4 кгО₂/кВт·час. Показано, что выражения, применяемые на сегодняшний день для вычисления коэффициента объемного массопереноса $K_L a$ при использовании метода переменного дефицита кислорода, не могут быть корректно использованы для сравнения характеристик аэраторов при значении конечной концентрации растворенного кислорода C_{∞} близкого к равновесной концентрации кислорода C_s .

Ключевые слова: очистка сточных вод, пневматическая аэрация, метод переменного дефицита кислорода, окислительная способность, эффективность аэрации

Введение

Вода занимает особое место среди всех соединений в самых разнообразных процессах и явлениях живой и неживой природы, а также в практическом использовании ее человеком [1]. Все большее значение приобретает проблема рационального использования воды и особенно очистка всевозрастающих объемов сточных вод.

Одним из перспективных направлений, которые применяются в системах очистки сточных вод, являются газожидкостные струйные технологии. Они представлены различными конструкциями устройств для насыщения сточных вод пузырьками воздуха – струйными аэраторами, которым присущи как преимущества, так и недостатки.

Основным преимуществом струйных аэраторов является их простота. При использовании в качестве рабочей жидкости воды, не содержащей механических примесей, они довольно надежны в работе. Ввод газожидкостной смеси в очистной резервуар в виде струи способствует предотвращению загрязнения биофильтров [2] и образованию как аэрированных, так и неаэрированных областей, что позволяет проводить процессы нитрификации и денитрификации в одном резервуаре при биологической очистке сточных вод [3]. Такой способ ввода газожидкостной смеси так же дает возможность интенсифицировать очистку (особенно для флотационного процесса), что приводит к уменьшению размеров очистных сооружений и, соответственно, уменьшению потребности в земельных площадях.

К недостаткам струйных аэраторов относят, прежде всего, повышенный расход энергии [4] и то, что на расход засасываемого воздуха влияют давление рабочей жидкости и геометрические параметры аэратора [5]. Следует также отметить недостаточно фундаментальные исследования распространения газожидкостных струй в очистном резервуаре, что не позволяет в некоторых случаях производить инженерные расчеты параметров, существенных для процессов очистки.

Несмотря на преимущества, перечисленные недостатки, на сегодняшний день, не позволяют повсеместному распространению газожидкостных струйных технологий. Таким образом, создание и апробация новых конструкций аэраторов, которые сохраняли бы преимущества и были бы лишены недостатков, которые свойственны струйным аэраторам, является актуальной задачей.

Устройства газонасыщения, альтернативные струйным аэраторам

На сегодняшний день создание принципиально новых конструкций струйных аэраторов практически не представляется возможным из-за большого количества уже существующих технических решений. Поэтому задача создания устройства газонасыщения, альтернативного струйным аэраторам, решалась путем использования пневматического метода диспергации газа, так как пневматическая аэрация является одним из самых распространенных и простых методов аэрации.

В основу предлагаемого аэратора (рисунок 1) положена техническая идея, которая используется для устранения необходимости периодической очистки диспергаторов и интенсификации процесса аэрации. Она основана на том, что поток воды срывает пузырьки воздуха с поверхности диспергатора прежде, чем пузырьки примут значительные размеры [6].

Устройство состоит из патрубка для подвода рабочей жидкости 1 и патрубка для подвода газа 2, втулки(ок) из пористого материала 3, которые установлены согласно с корпусом 4, и выпускной насадки 5 для вывода газожидкостной смеси в очистной резервуар. Для того, чтобы после входа рабочей жидкости в выпускную насадку не было резкого перепада давления, к втулке(ам) 3 присоединен конус 6. Количество втулок 3 может изменяться в зависимости от необходимой степени насыщения воды пузырьками газа.

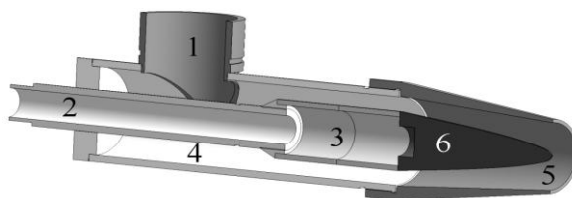


Рисунок 1 – Принципиальная схема аэратора

Устройство работает следующим образом. Газ с помощью компрессора подается через патрубок 2 на внутреннюю поверхность втулки(ок) из пористого материала 3. На внешней поверхности втулки(ок) 3 образуются пузырьки и сносятся рабочей жидкостью, которая с помощью насоса подается через патрубок 1 в корпус 4. Газожидкостная смесь, которая образуется в зазоре между внутренней поверхностью корпуса 4 и внешней поверхностью втулки(ок) 3 попадает через зазор между внешней поверхностью конуса 6 и внутренней поверхностью выпускной насадки 5 в очистной резервуар в виде струйного течения.

На основании того, что для флотационной очистки зачастую необходим ввод дополнительных химических реагентов для увеличения гидрофобности частиц загрязнителя, был предложен вариант пневматического аэратора, который позволяет ввод химических реагентов (рисунок 2).

Для этого, по сравнению с устройством, указанным на рисунке 1, в предлагаемом устройстве дополнительно устанавливается патрубок для ввода химического реагента 1, втулка из пористого или перфорированного материала 2 и шайба 3, разделяющая ввод газа и химического реагента.

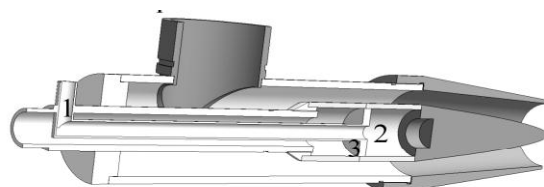


Рисунок 2 – Принципиальная схема аэратора с возможностью ввода химического реагента

Предложенные устройства защищены патентами Украины [7, 8].

Естественным образом, возникает задача оценки эффективности предлагаемых конструкций, для которой применяют эффективность аэрации E – количество кислорода, растворимого в аэротенке, при энергозатратах на аэрацию в 1 кВтч.

Эффективность аэрации E вычисляется как

$$E = OC / (N_{ном}t) \quad (1)$$

где OC – окислительная способность;

$N_{ном}$ – номинальная потребляемая мощность, кВт/час;

t – время процесса аэрации, час.

Как известно из [9], окислительная способность аэратора определяется по формуле

$$OC = K_L a \cdot C_S \cdot V_6, \quad (2)$$

где $K_L a$ – объемный коэффициент массопереноса 1/с;

C_S – концентрация насыщения воды кислородом при данных атмосферного давления и температуры воды, мг/л;

V_6 – объем аэрируемой воды, м³.

Объем аэрируемой воды вычисляется по формуле

$$V_6 = V + V_c, \quad (3)$$

где V – объем резервуара с аэрируемой водой, м³;

V_c – объем воды, прошедшей через сопло за время t , м³.

Определение объемного коэффициента массопереноса кислорода $K_L a$ в настоящее время осуществляется экспериментально следующими методами [9]: 1) прямым окислением сульфита натрия; 2) с переменным дефицитом кислорода; 3) с переменным дефицитом кислорода для сточной воды с активным илом; 4) с постоянным дефицитом кислорода; 5) определение баланса кислорода в воздухе.

Наиболее применяемым среди них является метод переменного дефицита кислорода. Для его реализации в резервуар с водопроводной водой вводят сульфит натрия в количестве 7,9 мг сульфита натрия на 1 мг/л кислорода. После этого воду аэрируют и через определенные промежутки времени фиксируют уровень растворенного кислорода. Объемный коэффициент массопереноса кислорода определяется по формуле [9]

$$K_L a = \frac{2,303 [\lg(C_S - C_H) - \lg(C_S - C_K)]}{t}, \quad (4)$$

где C_H и C_K – начальная и конечная концентрации кислорода соответственно.

Результаты экспериментальных исследований

Для исследования эффективности аэрации был спроектирован и реализован в соответствии с принципиальной схемой, указанной на рисунке 1, промышленный образец предлагаемого аэратора.

Экспериментальные исследования проводились на базе лотка специальной градуировочно-испытательной установки СГИУ-1. Для измерения растворенного в воде кислорода использовался кислородомер ДК-404.

Характер поведения для представленных на рисунке 3 графиков зависимости эффективности аэрации E от времени аэрации, на первый взгляд, может говорить о том, что наиболее эффективной является аэрация при высоких и при низких градиентах концентрации растворенного кислорода в жидкости.

Действительно, при больших градиентах высокую эффективность можно объяснить высокой скоростью переноса кислорода. Причем, если учесть, что в начале аэрации фактическая скорость выше чем расчетная, то расчетная эффективность тоже может быть занижена.

Однако, очевидно, что эффективность аэрации не может расти, когда увеличение количества потребляемой энергии уже не приводит к насыщению воды кислородом. Таким образом, при низких градиентах рост эффективности, как и рост окислительной способности и объемного коэффициента массопереноса, может быть объяснен только видом формулы (4) для вычисления $K_L a$, по которой при $C_S - C_i \rightarrow 0$ происходит резкий рост значения логарифма.

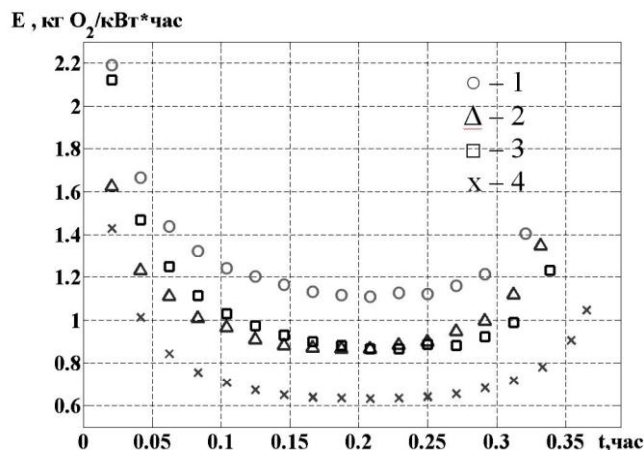


Рисунок 3 – Зависимость изменения эффективности аэрации от времени:

- 1 – $Q_{\text{воды}} = 9,2$ и $Q_{\text{возд}} = 4,5$ м³/час;
- 2 – $Q_{\text{воды}} = 9,2$ и $Q_{\text{возд}} = 2,3$ м³/час;
- 3 – $Q_{\text{воды}} = 7,7$ и $Q_{\text{возд}} = 4,5$ м³/час;
- 4 – $Q_{\text{воды}} = 7,7$ и $Q_{\text{возд}} = 1,9$ м³/час

Это ставит под сомнение достоверность получаемых исследователями результатов, так как они, приводя данные об эффективности аэрации, не указывают при каком значении $C_S - C_K$ проводились вычисления.

Однако, предполагая, что для расчетов E берется последнее по времени значение концентрации C_K , получаем для режимов P1, P2, P3 и P4 значения $E_{P1} = 1,4$; $E_{P2} = 1,35$; $E_{P3} = 1,23$; и $E_{P4} = 1,05$, соответственно. Для конструкций струйных аэраторов по данным [6, 9, 11, 12], характерны величины E для чистой воды в пределах 0,36–1,3. При этом, если учесть, что для струйных аэраторов соотношение расходов воздуха и воды может достигать до $K = 1,2$, а в наших исследованиях значение K не превышало 0,6, то существует достаточно существенный запас по увеличению эффективности аэрации.

Выводы

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Предложены и запатентованы оригинальные конструкции устройств для насыщения сточных вод пузырьками газа (аэраторов), альтернативных струйным аэраторам, которые основаны на пневматическом методе диспергации газа. В одном из вариантов устройств предусмотрена возможность ввода химических реагентов. Основными достоинствами предлагаемых устройств по сравнению со струйными аэраторами являются простота конструкции, отсутствие движущихся частей, высокая степень турбулентности и перемешивания, отсутствие зависимости расхода подаваемого газа от расхода жидкости.

2. Спроектирован и реализован образец промышленного аэратора, основанный на первой предложенной конструкции. Исследования эффективности аэрации E этого устройства, проведенные с помощью общепринятого метода переменного дефицита кислорода в воде, показали значения E до 1,4 кгO₂/кВт· час, которые несущественно отличаются от значений E у существующих промышленных конструкций СА.

3. Выражения, применяемые на сегодняшний день для вычисления коэффициента объемного массопереноса $K_L a$ (и соответственно окислительной способности OC и эффективности аэрации E) при использовании метода переменного дефицита кислорода, не могут быть корректно использованы для сравнения характеристик аэраторов при значении конечной концентрации растворенного кислорода C_k , полученного в результате эксперимента, близкого к равновесной концентрации кислорода C_S . Поэтому, учитывая, что повышение содержания растворенного кислорода выше 3,5–4 мг/л мало влияет на эффективность биохимического окисления загрязняющих веществ [13], рекомендуется проводить вычисления эффективности аэрации при $C_k = 2,3$ и 4 мг/л.

Список литературы

1. Комарова Л. Ф. Инженерные методы защиты окружающей среды. Техника защиты атмосферы и гидросферы от промышленных загрязнений: учебное пособие / Л. Ф. Комарова, Л. А. Кормина. – Барнаул, 2000. – 391 с.
Komarova L. F. Inzhenernyye metody zashchity okruzhayushchey sredy. Tekhnika zashchity atmosfery i gidrosfery ot promyshlennykh zagryazneniy: uchebnoye posobiye (Engineering methods of environmental safety. The method of atmosphere and hydrosphere protection from industrial pollution: study guide) / L. F. Komarova, L. A. Kormina. – Barnaul, 2000. – 391 s.
2. Chang I. S. Air sparging of a submerged MBR for municipal wastewater treatment / I. S. Chang, S. J. Judd // Process Biochemistry. – 2002. – Vol. 37. – P. 915–920.
3. Whittaker A. Wastewater treatment: Advanced suspended growth technology / A. Whittaker // Filtration & Separation. – 2007. – Vol. 44, № 9. – P. 19–21.
4. Черных С. И. Создание флотационных машин пневматического типа и опыт их применения на обогатительных фабриках / С. И. Черных. – М.: ЦНИИЭИ-цветмет, 1995. – 296 с.
Chernykh S. I. Sozdaniye flotatsionnykh mashin pnevmaticheskogo tipa i opyt ikh primeneniya na obogatitelnykh fabrikakh (The development of flotation machines of pneumatic type and the experience of their use at coal-preparation plants) / S. I. Chernykh. – M.: TSNIIEI-tsvetmet, 1995. – 296 s.
5. Мешеряков Н. Ф. Кондиционирующие и флотационные аппараты и машины / Н. Ф. Мешеряков. – М.: Недра, 1990. – 237 с.
Mesheryakov N. F. Konditsioniruyushchiye i flotatsionnyye apparaty i mashiny (Conditioning and flotation apparatuses and machines) / N. F. Mesheryakov. – M.: Nedra, 1990. – 237 s.
6. Попкович Г. С. Системы аэрации сточных вод / Г. С. Попкович, Б. Н. Репин. – М.: Стройиздат, 1986. – 136 с.
Popkovich G. S. Sistemy aeratsii stochnykh vod (Sewage waters aeration systems) / G. S. Popkovich, B. N. Repin. – M.: Stroyizdat, 1986. – 136 s.
7. Пат. 43579 Україна, МПК2009 B03D 1/14, C02F 1/24. Пристрій для пневматичного насичення стічних вод бульбашками газу / О. І. Барибін; власник Донецький національний університет. – № u 2009 02271; заявл. 16.03.2009; опубл. 25.08.2009, Бюл. № 16.
Pat. 43579 Ukraina, MPK (2009) B03D 1/14, C02F 1/24. Prystriy dlya pnevmatichnogo nasychennya stichnykh vod bulbashkamy gazu (Pat. 43579 Ukraine, IPC (International Patent Classification) 2009 B03D 1/14, C02F 1/24. The device for sewage waters pneumatic saturation with gas bubbles) / O. I. Barybin; vlasnyk Donetskyy natsionalnyi universytet. – № u 2009 02271; zayavl. 16.03.2009; opubl. 25.08.2009, Byul. № 16.
8. Пат. 57941 Україна, МПК (2011.01) B01F 3/00, B03D 1/00, C02F 1/24. Пневматичний аератор-змішувач / О. І. Барибін, М. І. Болонів; власник Донецький національний університет. – № u 2010 08800; заявл. 15.07.2010; опубл. 25.03.2011, Бюл. № 6.
Pat. 57941 Ukraina, MPK (2011.01) B01F 3/00, B03D 1/00, C02F 1/24. Pnevmatychnyi aerator-zmishuvach (Pat. 57941 Ukraine, IPC (International Patent Classification) (2011.01) B01F 3/00, B03D 1/00, C02F 1/24. Pneumatic mixer aerator) / O. I. Barybin, M. I. Bolonov; vlasnyk Donetskyy natsionalnyi universytet. – № u 2010 08800; zayavl. 15.07.2010; opubl. 25.03.2011, Byul. № 6.
9. Сивак В. М. Аэраторы для очистки природных и сточных вод / В. М. Сивак, Н. Е. Янушевский. – Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1984. – 124 с.
Sivak V. M. Aeratory dlya ochistki prirodnykh i stochnykh vod (Aerators for natural and sewage waters purification) / V. M. Sivak, N. Ye. Yanushevskiy. – Lvov: Vyshcha shkola. Isd-vo pri Lvov. Un-te. – 124 s.
10. Барыбин А. И. Газожидкостные струйные технологии в системах очистки сточных вод / А. И. Барыбин, Н. И. Болонів // Проблемы экологии и техногенно-экологической безопасности: монография; под общ. ред. д.т.н., проф. А. Б. Ступина. – Донецк: ДонНУ, 2010. – Разд. 3. – С. 73–105.

Barybin A. I. Gazozhidkostnyye struynnye tekhnologii v sistemakh ochistki stochnykh vod (Liquid gas jetting technology in sewage waters purification systems) / A. I. Barybin, N. I. Bolonov // Problemy ekologiy i tekhnogenno-ekologicheskoy bezopasnosti: monografiya; pod obshch. red. d.t.n., prof. A. B. Stupina. – Donetsk: DonNU, 2010. – Razd. 3. – S. 73–105.

11. Яворский В. П. Исследования эжекторной аэрации для биохимической очистки сточных вод: автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.483 «Водоснабжение и канализация» / В. П. Яворский. – Каунас, 1971. – 31 с.

Yavorskiy V. P. Issledovaniya ezhektornoy aeratsii dlya biokhimicheskoy ochistki stochnykh vod: avtoref. diss. na soiskaniye uchenoy stepeni kand. tekhn. nauk: spets. 05.483 “Vodosnabzheniye i kanalizatsiya” (Ejector aeration analysis for biochemical sewage waters purification: abstract of Ph.D. thesis in Engineering Science: speciality 05.483 “Water supply and canalization”) / V. P. Yavorskiy. – Kaunass, 1971. – 31 s.

12. Jet aerator, 50 Hz: Technical specification. – ITT Flyght AB, 2005. – 20 p.

13. Жмур Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Н. С. Жмур. – М.: АКВАРОС, 2003. – 512 с.

Zhmur N. S. Tekhnologicheskkiye i biokhimicheskkiye protsessy ochistki stochnykh vod na sooruzheniyakh s aerotenkami (Technological and biochemical sewage waters purification processes on constructions with aerotanks) / N. S. Zhmur. – M.: AKVAROS, 2003. – 512 s.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С. П. Висоцький, АДІ ДонНТУ.

Стаття надійшла до редакції 10.07.12

М. І. Болонов, О. І. Барибін
Донецький національний університет, м. Донецьк
Підвищення ефективності роботи аераторів

Описано нову конструкцію пневматичного аератора, що є альтернативою струминним пристроям газо-насичення. Наведено результати експериментальних досліджень ефективності аерації промислового зразка аератора, що пропонується. Виявлено, що для цієї конструкції ефективність аерації досягає $1,4 \text{ kgO}_2/\text{kWh} \cdot \text{год}$. Показано, що вирази, що застосовуються на сьогоднішній день для обчислення коефіцієнта об'ємного масопереносу $K_L a$ при використанні методу змінного дефіциту кисню, не можуть бути коректно використані для порівняння характеристик аераторів при значенні кінцевої концентрації розчиненого кисню C_K , що близьке до рівноважної концентрації кисню C_s .

ОЧИСТКА СТОЧНИХ ВОД, ПНЕВМАТИЧНА АЕРАЦІЯ, МЕТОД ЗМІННОГО ДЕФІЦИТУ КИСНЮ, ОКИС-ЛЮВАЛЬНА ЗДАТНІСТЬ, ЕФЕКТИВНІСТЬ АЕРАЦІЇ

N. I. Bolonov, A. I. Barybin
Donetsk National University, Donetsk
Improving of Aerator Performance Efficiency

The gas-liquid jetting technologies are one of the perspective trends which are used in the sewage treatment systems. They are presented by various designs of the devices to saturate the sewage with air-bubbles, namely, jetting aerators, which have both advantages and disadvantages. The creation and testing the new design of aerators which could save the advantages and lack disadvantages which are attached to the jetting aerators are urgent at present.

There is an engineering idea in the basis of the proposed pneumatic aerator. The idea is used for obviation of the periodical cleaning of dispersators and for intensification of the aeration process. The point is that the water flow tears the air bubble away from the surface of the dispersator before the bubble becomes sizeable.

To evaluate the performance of the proposed constructions there is a need to use the aeration method. E is amount of oxygen which is dissolved in the aerotank at power consumption of the aeration per 1 kWh.

In order to study the aeration efficiency the industrial model of the proposed pneumatic aerator has been designed and implemented specifically in accordance with the basic diagram shown in Figure 1.

The experimental studies have been carried out on the basis of the tray of the special graduating-testing equipment СГИУ-1 (SGIU-1). The dissolved oxygen device ДК-404 (DK-404) has been used to measure oxygen dissolved in water.

According to the results of the studies the aeration efficiency obtains $1,4 \text{ kgO}_2/\text{kWh}$ for the given design, and the expression used nowadays for calculation of $K_L a$ (the coefficient of volumetric mass transfer) while using the variable oxygen deficit method cannot be used correctly for the comparison of aerator characteristics at the value of C_f (the final concentration of the dissolved oxygen) which is close to C_s , (the equilibrium concentration of oxygen).

SEWAGE TREATMENT, PNEUMATIC AERATION, VARIABLE OXYGEN DEFICIT METHOD, OXIDIZING ABILITY, AERATION EFFICIENCY