

DOI 10.35776/MNP.2020.06.

УДК 628.356.24

Влияние конструкции перемешивающего устройства на эффективность массообмена при пневмомеханической аэрации сточных вод

А. Н. Григорьева¹, Р. Ш. Абиев²

¹ Григорьева Анастасия Николаевна, генеральный директор АО «Астерион»; аспирант кафедры «Оптимизация химической и биотехнологической аппаратуры», Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет)

195197, Россия, Санкт-Петербург, проспект Просвещения, 85, тел.: +7 (812) 490-75-03, e-mail: an@td-elma.ru

² Абиев Руфат Шовкетович, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Оптимизация химической и биотехнологической аппаратуры», Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет)

190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, 26, тел.: +7 (812) 494-93-39, e-mail: rufat.abiev@gmail.com

Аэрация при очистке сточных вод является самым энергоёмким процессом. Затраты на обеспечение биологической очистки кислородом составляют около 60% в структуре себестоимости очистки. Таким образом, эффективность массообмена и снижение расхода воздуха является актуальной задачей для предприятий, которые стремятся повысить экономическую эффективность своей деятельности. Цель данной работы – определить эффективность пневмомеханической системы аэрации с использованием турбинной мешалки и разработанной авторами новой конической мешалки, а также сравнить эффективность диспергирования газа в пневматической и пневмомеханической системах аэрации. В качестве критерия для сравнения выбран показатель *SOTE* (*Standard Oxygen Transfer Efficiency*), который является основным технологическим параметром, позволяющим сравнивать эффективность различных аэрационных систем. Второй кри-

терий эффективности – показатель *SAE* (*Standard Aeration Efficiency*) – отношение количества растворенного в жидкости кислорода к количеству используемой электроэнергии. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что коническая мешалка по скорости насыщения воды кислородом работает также эффективно, как и турбинная, потребляя при этом гораздо меньше электроэнергии. С разработкой конического колеса вследствие низкого сопротивления лопастей перемешивание в системе «газ – жидкость» возможно в аппаратах больших размеров, что особенно актуально для аэротенков с небольшой глубиной при биологической очистке сточных вод в условиях, когда эффективность пневматической системы существенно снижается.

Ключевые слова: очистка сточных вод, пневмомеханическая аэрация, перемешивающее устройство, массообмен, сульфитная методика, критерий эффективности аэрации.

WASTEWATER TREATMENT

The influence of the design of the mixing device on the efficiency of mass transfer during pneumo-mechanical aeration of wastewater

A. N. Grigor'eva¹, R. Sh. Abiev²

¹ Grigor'eva Anastasiia, General Director, Asterion JSC, Graduate Student of the «Optimization of Chemical and Biotechnological Equipment» Department, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University) 85 Prosveshcheniia Ave., 195197, Saint-Petersburg, Russian Federation, tel.: +7 (812) 490-75-03, e-mail: an@td-elma.ru

² Abiev Rufat, Doctor of Engineering, Head of the «Optimization of Chemical and Biotechnological Equipment» Department, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University) 26 Moskovskii Ave., 190013, Saint-Petersburg, Russian Federation, tel.: +7 (812) 494-93-39, e-mail: rufat.abiev@gmail.com

Aeration is the most energy-intensive process in wastewater treatment. The expenditures for air oxygen supplied for biological treatment are about 60% in the treatment cost structure. Thus, the efficiency of mass transfer and reduction of air consumption is an urgent task for the enterprises that look for improving the economic efficiency of their activities. The purpose of this work is to determine the effectiveness of a pneumo-mechanical aeration system using a turbine mixer and a new conical mixer designed by the authors, as well as to compare the efficiency of gas dispersion in pneumatic and pneumo-mechanical aeration systems. As a criterion for comparison, SOTE (Standard Oxygen Transfer Efficiency) indicator that is the main process parameter that provides for comparing the effectiveness of different aeration systems, is selected. The second efficiency criterion is SAE (Standard Aeration Efficiency) indicator, i. e. the ratio of the amount of oxygen dissolved in liquid to the amount of the electrical energy consumed. As a result of experimental studies, it was found that the conical mixer was as efficient as the turbine one in the rate of saturation of water with oxygen, while consuming much less electrical energy. With the development of a bevel wheel mixing in the «gas-liquid» system in large-sized apparatus became possible owing to the low resistance of the blades, which is especially important for aeration tanks with a small depth in the process of biological wastewater treatment under the conditions of the significant reduction in the effectiveness of the pneumatic system.

Key words: wastewater treatment, pneumo-mechanical aeration, mixing device, mass transfer, sulfite method, criterion of the aeration efficiency.

Введение

Процесс аэрации в очистке сточных вод является самой энергоемкой стадией. Затраты на обеспечение биологической очистки кислородом составляют около 60% в структуре себестоимости очистки. Поэтому обеспечение эффективности массообмена, приводящей к снижению расхода воздуха, является весьма актуальной задачей для предприятий, которые все чаще стремятся повысить экономическую эффективность своей деятельности.

Актуальность выбора аэрационной системы подтверждается множеством исследований, опубликованных в последнее время. В статье [1] описано применение новых аэрационных элементов на Люберецких очистных сооружениях г. Москвы. Сравнение эффективности систем проводилось на основании расчета следующих параметров:

скорость переноса кислорода в стандартных условиях в чистой воде *SOTR* (массовый расход кислорода в чистой воде, отечественный термин: ОС – окислительная способность в стандартных условиях), кгO₂/ч;

эффективность переноса кислорода в стандартных условиях в чистой воде *SOTE*, %;

энергоэффективность аэрации в стандартных условиях в чистой воде *SAE*, кгO₂/(кВт·ч).

В работе [2] сформулированы следующие критерии сравнения аэрационных систем:

количество аэраторов;
площадь активной поверхности мембраны, м²;
плотность раскладки, % (отношение площади поверхности мембраны к площади аэрируемой зоны);

количество вертикальных воздухопроводов в аэротенке;

соотношение площади «аэрационной решетки» и площади аэрируемой зоны;

ОС – окислительная способность в стандартных условиях на чистой воде, кгO₂/(м³·ч);

объемный расход воздуха, необходимый для обеспечения требуемой подачи кислорода, м³/ч;

объемный расход воздуха на один аэратор (м³/ч на 1 м² поверхности мембраны);

удельный расход воздуха, м³/ч на 1 м³ объема аэротенка.

Группа авторов из Воронежского технического университета также занималась сравнительным анализом современных систем аэрации природных и сточных вод, результаты которого приведены в [3]. Основные критерии выбора: эффективность аэрации; окислительная способность аэратора; стоимость аэрационной системы, приходящаяся на единицу объема жидкости в единицу времени; размер зоны действия аэратора; простота обслуживания, ремонт и замена аэрационного оборудования; надежность и долговечность при эксплуатации.

В настоящее время применение аэраторов различных типов и пневматической системы аэрации (когда при помощи воздуходувок кислород подается на барботеры, установленные на дне аэротенка) является самым распространенным методом. Методы расчета пневматических систем общеизвестны и доступны [4; 5]. Однако в процессе эксплуатации пневматических систем аэрации появляются проблемы, среди которых самые распространенные – забивание пор, сложность обнаружения забитых аэраторов, высокая трудоемкость монтажа, обслуживания и демонтажа аэрационных модулей. В статье [1] автор отмечает: «... обследование аэрационной системы показало, что все мембраны аэраторов в результате растяжения приобрели остаточную деформацию выгнутой формы. Отмечена высокая степень биообрастания (кольматации) поверхности мембран. На ряде аэраторов мембраны имели разрывы различной степени. Вследствие перечисленных причин рабочая площадь мембран аэраторов сократилась на 25–40%».

Одной из перспективных систем аэрации для решения вышеобозначенных проблем является применение комбинированной системы, в которой воздух подводится

непосредственно под перемешивающее механическое устройство лишь в количестве, необходимом для питания кислородом активного ила. Известно, что самое энергоемкое оборудование в очистке сточных вод – воздуходувка. Кроме того, энергия, вводимая с газом в аппарат, используется крайне неэкономично, поскольку работа газа на перемешивание определяется силой Архимеда за вычетом силы тяжести при всплывании пузырей. Следовательно, если подавать воздух в аэротенк в количестве, необходимом только для снабжения бактерий кислородом, а поддерживать активный ил во взвешенном состоянии при помощи мешалок, то можно ожидать определенного снижения энергозатрат [6]. Еще одним преимуществом подобной схемы является отсутствие в ее составе аэраторов с мелкими порами, которые подвержены засорению, поскольку размер пузырей будет определяться не размером пор диспергатора, а скоростью диссипации энергии турбулентности, которая в свою очередь связана с геометрией мешалки и частотой ее вращения.

Пневмомеханическая аэрация использовалась в очистке сточных вод еще в 1970-х годах и подробно описана в [7]. Процесс перемешивания в системе «газ – жидкость» описан в работах [8–10]. Практически все авторы отмечают, что самой эффективной для целей диспергирования газа является турбинная мешалка, поэтому в данной работе для сравнения выбран именно такой тип перемешивающего устройства.

Цель данной работы – определить эффективность пневмомеханической системы аэрации с использованием турбинной мешалки, рассчитанной в соответствии с ГОСТ 20680-2002 «Аппараты с перемешивающими устройствами. Общие технические условия», и разработанной авторами новой конической мешалки, а также сравнить эффективность диспергирования газа в пневматической и пневмомеханической системах аэрации. В качестве критерия сравнения выбраны показатели *SOTR* (*Standard Oxygen Transfer Rate*), *SOTE* (*Standard Oxygen Transfer Efficiency*), позволяющие сравнивать эффективность различных аэрационных систем [5]. Третий критерий эффективности – показатель *SAE* (*Standard Aeration Efficiency*) – отношение количества кислорода, растворенного в чистой воде, к количеству используемой электроэнергии.

Теоретическая часть

Процессы массопередачи в аппаратах с механическим перемешиванием характеризуются

крайне сложной гидродинамической обстановкой. Теоретические методы анализа гидродинамики и массообмена в таких аппаратах разработаны в классических работах [6; 8]. Однако на практике, особенно при изучении новых перемешивающих устройств, применение экспериментальных и численных методов неизбежно, поскольку именно эксперименты позволяют определить адекватность теории и получить неизвестные коэффициенты. По этой причине экспериментальные исследования остаются сегодня основным методом изучения массообмена, наибольшее распространение из которых получил сульфитный метод.

Сульфитный метод основан на каталитическом окислении сульфита натрия кислородом воздуха в присутствии ионов меди. Важнейшей массообменной характеристикой биореакторов (например, для оценки скорости потребления кислорода) принято считать объемный коэффициент массопередачи $K_L A$. Для определения массы растворившегося вещества (кислорода) в жидкости воспользуемся основным уравнением массопередачи:

$$M = KA \Delta C, \quad (1)$$

где M – масса вещества, переходящего из одной фазы в другую в единицу времени, кг/с; K – коэффициент массопередачи, м/с; A – полная поверхность контакта фаз в аппарате, м²; ΔC – средняя движущая сила процесса (разность концентраций), кг/м³.

Полагая, что процесс массопередачи лимитируется массоотдачей по жидкой фазе (а сопротивление по газовой фазе пренебрежимо мало), скорость растворения (сорбции) кислорода в чистой воде можно описать уравнением:

$$SOTR = \frac{dC}{dt} = OC = K_L a [C_{np} - C(t)], \quad (2)$$

где $K_L a$ – объемный коэффициент массоотдачи в жидкость от поверхности пузырей, 1/с; C_{np} – предельная растворимость кислорода в воде при заданных значениях температуры T и давления P , кг/м³; $C(t)$ – концентрация растворенного кислорода в момент времени t , кг/м³.

Интегрируя выражение (2) с начальными условиями $C(t) = 0$ при $t = 0$, получим:

$$\ln[C_{np} - C(t)] = \ln(C_{np}) - K_L a t. \quad (3)$$

Тогда при построении графика в координатах $\ln[C_{np} - C(t)] - t$ тангенс угла наклона определит значение $K_L a$. Анализируя формулу (2), можно отметить, что определяющее влияние на эффективность аэрации оказывает скорость массопе-

редачи кислорода, определяемая значением K_L , а также удельная поверхность контакта фаз a . В настоящей статье будет исследоваться только скорость массопередачи, так как удельная поверхность контакта фаз была рассмотрена ранее [11].

При оценке эффективности аэрации скорость переноса кислорода в чистой воде при стандартных условиях $SOTR$ рассчитывалась по формуле [12]:

$$SOTR = K_L A_{20} C_{np20} V_L, \quad (4)$$

где $K_L A_{20}$ – объемный коэффициент массопередачи, приведенный к 20 °С; C_{np20} – концентрация насыщения кислорода в воде при 20 °С; V_L – объем жидкости в аппарате, м³.

Расчет $K_L A_{20}$ производился по формуле [12]:

$$K_L A_{20} = K_L A \theta^{(20 - T)}, \quad (5)$$

где $\theta = 1,024$; T – температура воды при проведении экспериментов.

Показатель эффективности переноса кислорода $SOTE$ (%) вычисляется как соотношение количества растворившегося кислорода к количеству поданного кислорода, которое в свою очередь является произведением расхода воздуха Q_{air} на удельное содержание кислорода в воздухе C_{O_2} , принимаемое 0,2765 кг/м³ [5]:

$$SOTE = \frac{SOTR}{Q_{air} C_{O_2}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где $SOTR$ – скорость растворения кислорода dC/dt , определяется по формуле (4), кг/ч.

Показатель SAE , кг/(кВт·ч), рассчитывается в соответствии с немецким стандартом Merkblatt DWA (Deutscher Wasser Assoziation) M 229-1 «Systeme zur Belueftung und Durchmischung von Belebungsanlagen»:

$$SAE = SOTR/N, \quad (7)$$

где N – мощность, затрачиваемая на диспергирование воздуха, кВт.

Потребляемая мощность мешалки, Вт, рассчитывается по формуле [8]:

$$N = K_N \rho n^3 d_m^5, \quad (8)$$

где K_N – коэффициент мощности рабочего колеса мешалки; ρ – плотность жидкости, кг/м³; n – частота вращения мешалки, об/с; d_m – диаметр мешалки, м.

Показатели $SOTE$ и SAE являются своеобразными аналогами коэффициента полезного действия системы, который определяется отношением полезной энергии к затраченной энергии.

Экспериментальная часть

Эксперименты по оценке массообмена проводились в прямоугольном сосуде из оргстекла (полиметилметакрилата) с плоским днищем. Форма емкости близка к реальным сооружениям (аэротенкам). Схема и размеры экспериментального аппарата представлены на рис. 1.

Уровень жидкости составил $H = 210$ мм. Расход воздуха контролировался при помощи термоанемометрического расходомера с цифровой индикацией сигнала PFM725-F01-D фирмы SMC (Япония). Предел измерений датчика от 0,5 до 25 л/мин, точность $\pm 2\%$. Характеристика мощности, потребляемой мешалками, рассчитывалась по формуле (8). Коэффициент мощности K_N для конической мешалки и турбинного рабочего колеса был определен дополнительным экспериментом: методом 3D-печати были изготовлены рабочие колеса диаметром 100, 120 и 150 мм с соблюдением геометрического подобия. Мешалка с данными рабочими колесами была установлена в еврокуб с объемом воды 900 л, после чего производились измерения крутящего момента при помощи датчика крутящего момента M40-1к (производства ООО «Тилком», Минск), точность которого составляет $\pm 0,1$ Н·м. Коэффициент мощности K_N для конической мешалки составил 0,38, в то время как для турбинной мешалки данный коэффициент составляет 8,2 (РД 26-01-90-85 «Механические перемешивающие устройства. Метод расчета»).

В ходе эксперимента измерялась эффективность массообмена при работе следующих моделей мешалок: турбинная тип 03 (рис. 2, а); коническая многолопастная нового типа (рис. 2, б).

Подробное описание конической многолопастной мешалки представлено в [13]. В исследованиях было найдено, что энергопотребление конической мешалки меньше, поэтому для срав-

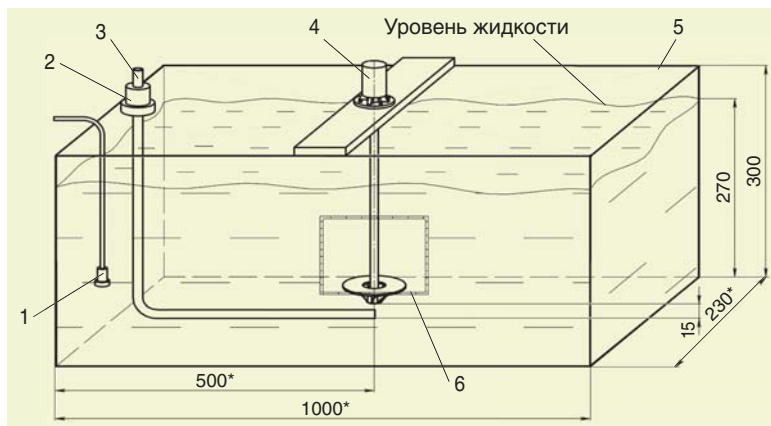


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

1 – датчик кислорода; 2 – датчик расхода воздуха; 3 – трубка подвода воздуха; 4 – мешалка; 5 – емкость из оргстекла; 6 – фотокамера

нения были выбраны коническая и турбинная мешалки одинакового диаметра 100 мм, но при различной частоте вращения. То есть целью эксперимента было сравнение эффективности аэрации при работе мешалок с приблизительно равным энергопотреблением. Фотография аппарата представлена на [рис. 3](#).

Исследования проводились при различных скоростях вращения мешалок, при высоте установки рабочих колес над дном $h = 50$ мм. Изменения концентрации кислорода фиксировались с помощью анализатора кислорода Эксперт-009 (Россия), включающего оптический датчик кислорода, электронный датчик температуры и микропроцессор, позволяющий подключить систему к персональному компьютеру и выводить графики изменения кислорода и температуры на монитор в режиме реального времени. Датчик анализатора был расположен вне активной «пузырьковой» зоны на глубине 100 мм.

Основные параметры проведения эксперимента: расход воздуха 5 л/мин; объем жидкости 48 л (водопроводная вода с проводимостью 308 мкСм) измерен с помощью кондуктометра; масса навески сульфита натрия 19,2 г (из расчета 0,4 г/л); масса навески катализатора (CuSO_4) 1,92 г.

Порядок проведения эксперимента:

1) установить трубку для подвода воздуха, включить компрессор и определить требуемый расход воздуха, а также требуемую частоту вращения мешалки;

2) включить заранее подключенный к компьютеру анализатор кислорода в режиме «термооксиметр»;

3) добавить заранее растворенный в горячей воде катализатор в емкость;

4) добавить заранее растворенный в горячей воде сульфит натрия в емкость;

5) отслеживая процесс окисления дозы сульфита натрия по компьютеру, дождаться снижения концентрации растворенного в воде кислорода до 0;

б) включить подачу воздуха и наблюдать восстановление концентрации кислорода до исходного уровня.

Описанная выше методика определения коэффициента массообмена $K_L a$ была проверена дополнительным экспериментом с условиями, описанными в [14]: частота вращения 300 об/мин; расход воздуха 2 л/мин; объем жидкости 4 л;

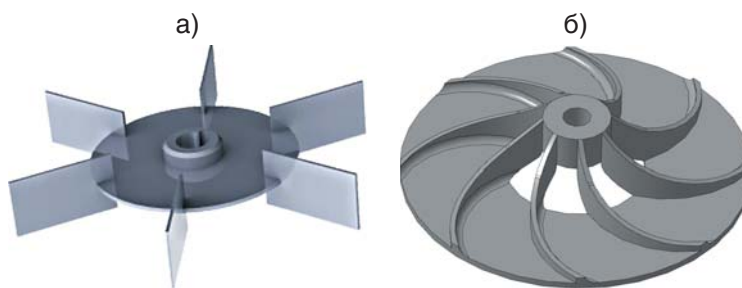


Рис. 2. Турбинная (а) и коническая (б) мешалки



Рис. 3. Экспериментальная установка

масса навески сульфита натрия 1,6 г (из расчета 0,4 г на 1 л жидкости); масса навески катализатора (CuSO_4) 0,16 г. В результате проверочного эксперимента было получено значение $K_L a = 0,0168$ /с, что по сравнению со значением из статьи [14] 0,017 1/с ниже на 1%. Различия малы и можно утверждать, что применяемая методика определения коэффициента массопередачи достаточно хорошо согласуется с литературными данными.

Результаты и обсуждение

В ходе проведения эксперимента по сульфитной методике были получены графики зависимости концентрации растворенного кислорода в воде от времени для каждой мешалки. Пример представлен на [рис. 4](#).

Результаты проведенного эксперимента и расчета основных показателей представлены в [таблице](#).

По критерию эффективности $SOTE$ все сравниваемые мешалки имеют незначительные различия, хотя можно наблюдать тенденцию роста коэффициента массообмена $K_L a$ при увеличении диаметра мешалки. Если проанализировать теоретический расчет $K_L A$ в статье [14], то на величину коэффициента массообмена жидкости влияет площадь аэрации, т. е. размер зоны, в которой распределены пузырьки. При большем диаметре мешалки площадь распространения пузырьков возрастает, что и объясняет рост $SOTE$.

Полученные показатели $SOTE$ исследованных рабочих колес свидетельствуют о низкой

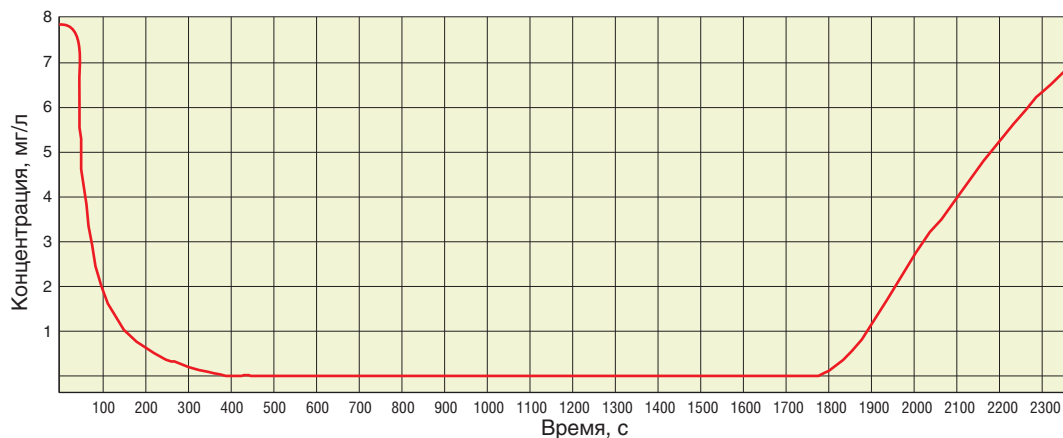


Рис. 4. График зависимости концентрации растворенного кислорода в воде от времени для турбинного рабочего колеса диаметром 50 мм

эффективности переноса кислорода по сравнению с данными производителей промышленных систем аэрации. Это связано с тем, что в экспериментах использовалась небольшая пилотная установка, и поэтому время пребывания пузырьков невелико, что сокращает время для массопереноса. Безусловно, в аппарате промышленного размера, где время пребывания пузырька будет намного больше, можно ожидать более высокие значения *SOTE*. Для сравнения пневматической системы с пневмомеханической целесообразно использовать показатель удельной эффективности *SSOTE* (%/м), равной отношению *SOTE* к глубине погружения барботера. В нашем исследовании глубина погружения составила 0,27 м, соответственно, для конической мешалки диаметром 100 мм удельная эффективность составляет 52,6 %/м. В статье [1] было измерено значение *SSOTE* для системы аэрации Люберецких очистных сооружений, наилучшие показатели которой составляли 6,3%, что в 10 раз ниже по сравнению с предложенной пневмомеханической системой.

Необходимо отметить, что при расчете *SAE* для пневмомеханической аэрации в настоящем исследовании принималась только мощность, потребляемая мешалкой, так как затра-

ты энергии на подачу кислорода ничтожно малы. С увеличением диаметра мешалки замечен некоторый рост показателя *SAE*. Сравнение промышленной пневматической системы с пневмомеханической по данным, полученным в настоящей работе в лабораторных условиях, производить некорректно. Для получения точных данных требуется промышленная апробация, что является предметом дальнейших исследований.

Однако при сравнении мешалок различной геометрии получены интересные данные по показателю *SAE*. Если сравнивать турбинные мешалки диаметром 100 и 50 мм при приблизительно одинаковых числах Рейнольдса $Re_{\text{д}}$ и при практически равном энергопотреблении, можно отметить, что по критерию *SAE* турбинная мешалка диаметром 100 мм превосходит турбинную мешалку диаметром 50 мм в 2,25 раза. Наиболее выгодной для применения является коническая мешалка диаметром 100 мм, которая превосходит турбинную того же диаметра по показателю *SAE* в 2,95 раза. Коэффициент массообмена $K_L a$ конической мешалки диаметром 100 мм выше, чем турбинной диаметром 100 мм на 10%, при этом энергопотребление в 2,7 раза меньше. Этот

Показатель	Коническая мешалка		Турбинная мешалка	
	диаметр 100 мм	диаметр 70 мм	диаметр 100 мм	диаметр 50 мм
Частота вращения, об/мин	600	1200	300	1200
$K_L a$, 1/ч	26,98	23,08	24,65	21,9
$Re_{\text{д}}$	$1 \cdot 10^5$	$9,8 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$
Потребляемая мощность, Вт (кВт)	3,8 (0,0038)	5,1 (0,0051)	10,25 (0,01025)	20,5 (0,0205)
<i>SOTR</i> , кг/ч	0,012	0,01	0,011	0,0096
<i>SOTE</i> , %	14,2	12,1	13	11,5
<i>SAE</i> , кг/(кВт·ч)	1,98	0,5	1,05	0,467

факт объясняется более обтекаемой геометрией мешалки.

Указанные выше преимущества конической мешалки можно объяснить увеличением времени контакта лопаток с элементарным объемом жидкости с газом, что обусловлено их значительной длиной. С другой стороны, несмотря на большие размеры лопаток конической мешалки, их изогнутая форма способствует и более полной передаче момента импульса вращающейся жидкости, и снижению потреблению энергии, поскольку форма лопаток приближается к форме линий тока жидкости. Кроме того, особая форма лопаток конической центробежной мешалки (близкая к форме лопаток насосов) способствует увеличению насосного эффекта, что приводит к увеличению размера зоны распределения пузырьков в жидкости. Таким образом, при использовании конической мешалки складывается ряд условий, благоприятно влияющих как на увеличение удельной поверхности контакта фаз, так и на коэффициент массоотдачи, а также на время пребывания пузырей в зоне активного перемешивания.

Выводы

В результате экспериментальных исследований установлено, что коническая мешалка по скорости насыщения воды кислородом работает также эффективно, как и турбинная, потребляя при этом гораздо меньше электроэнергии. С разработкой конического колеса вследствие низкого сопротивления лопастей перемешивание в системе «газ — жидкость» возможно в аппаратах больших размеров, что особенно актуально для аэротенков с небольшой глубиной при биологической очистке сточных вод, когда эффективность пневматической системы существенно снижается. Применение новой системы пневмомеханической аэрации позволит избежать достаточно трудоемкого процесса монтажа и обслуживания барботеров, а также решить проблему периодического забивания отверстий в них. Кроме того, появляется возможность подавать кислород в объемах, необходимых для насыщения иловой смеси, а перемешивание производить мешалками и, соответственно, снизить мощность воздуходувок — самого энергоемкого оборудования на водоканалах. Следует отметить, что зависимость эффективности массообмена от геометрических размеров аппарата и диаметра мешалки в предложенной системе аэрации сточных вод является предметом дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилович Д. А. Практика сравнения современных аэрационных систем // Наилучшие доступные технологии. 2015. № 2. С. 38–52.
2. Федорова А. В., Гарипова С. А. Критерии выбора аэрационной системы для биологических очистных сооружений // Экология производства. 2014. Т. 8. С. 41–45.
3. Титков А. А. Компоративный анализ современных систем аэрации природных и сточных вод: Материалы Международной научно-практической конференции студентов и аспирантов «Наука, технология, техника: перспективные исследования и разработки». — Воронеж, 2014. С. 414–423.
4. Мишуков Б. Г., Соловьева Е. А. Расчет и подбор аэрационного и перемешивающего оборудования для биологической очистки сточных вод: Учебное пособие. — СПб., СПбГАСУ, 2007. 40 с.
5. Zhen H., Anurak P., Warawitya M. Oxygen-transfer measurement in clean water // The Journal of KMITNB. 2003. V. XIII. № 1. P. 14–19.
6. Харькина В. О. Эффективная эксплуатация и расчет сооружений биологической очистки сточных вод. — Волгоград: Панорама, 2015. 433 с.
7. Брагинский В. И., Евилевич Л. Н., Бегачев М. А. Моделирование аэрационных сооружений для очистки сточных вод. — Л.: Химия, 1980. 144 с.
8. Edward L. Paul, Victor A. Atiemo-Obeng, Suzanne M. Kresta. Handbook of industrial mixing: Science and practice. — Canada: A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2004. 1440 p.
9. Барабаш В. М., Абиев Р. Ш., Кулов Н. Н. Обзор работ по теории и практике перемешивания // Теоретические основы химической технологии. 2018. Т. 52. № 4. С. 67–383.
10. Брагинский Л. Н., Бегачев В. И., Барабаш В. М. Перемешивание в жидких средах. — Л.: Химия, 1984. 336 с.
11. Григорьева А. Н., Абиев Р. Ш. Влияние формы рабочего колеса на диаметр пузырьков воздуха при перемешивании в системе газ — жидкость // Химическая промышленность сегодня. 2019. № 5. С. 18–22.
12. Stenstrom M. Measurement of oxygen transfer in clean water. — Virginia: American Society of Civil Engineers, 2007. P. 3–6.
13. Григорьева А. Н., Абиев Р. Ш. Сравнительный анализ влияния геометрической формы рабочих колес перемешивающих устройств на эффективность суспендирования в системе жидкость — твердое // Известия СПбГТИ (ТУ). 2018. № 45. С. 94–97.
14. Sardeing R., Aubin J., Xuereb X. Gas-liquid mass transfer: a comparison of down- and up-pumping axial flow impellers with radial impellers // Trans IChem Engineering. 2004. № 82 (12). P. 1589–1596.

REFERENCES

1. Danilovich D. A. [The practice of comparing modern aeration systems]. *Nailuchshchie Dostupnye Tekhnologii*, 2015, no. 2, pp. 38–52. (In Russian).
2. Fedorova A. V., Garipova S. A. [Criteria for choosing an aeration system for biological treatment plants]. *Ekologiya Proizvodstva*, 2014, v. 8, pp. 41–45. (In Russian).
3. Titkov A. A. [Comparative analysis of modern aeration systems for natural and waste water]. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of students and postgraduates «Science, Technology, Equipment: Advanced Research and Development». Voronezh, 2014, pp. 414–423. (In Russian).
4. Mishukov B. G., Solov'eva E. A. *Raschet i podbor aeratsionnogo i peremeshivaiushchego oborudovaniia dlia biologicheskoi ochistki stochnykh vod: Uchebnoe posobie* [Calculation and selection of aeration and mixing equipment for biological wastewater treatment: Study Guide. St. Petersburg, SPbGASU, 2007. 40 p.].
5. Zhen H., Anurak P., Warawitya M. Oxygen-transfer measurement in clean water. *The Journal of KMITNB*, 2003, v. XIII, no. 1, pp. 14–19.
6. Khar'kina V. O. *Effektivnaia ekspluatatsiia i raschet sooruzhenii biologicheskoi ochistki stochnykh vod* [Effective operation and calculation of biological wastewater treatment facilities. Volgograd, Panorama Publ., 2015. 433 p.].
7. Braginskii V. I., Evilevich L. N., Begachev M. A. *Modelirovanie aeratsionnykh sooruzhenii dlya ochistki stochnykh vod* [Simulation of aeration facilities for wastewater treatment. Leningrad, Khimiia Publ., 1980. 144 p.].
8. Edward L. Paul, Victor A. Atiemo-Obeng, Suzanne M. Kresta. Handbook of industrial mixing: Science and practice. Canada, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2004. 1440 p.
9. Barabash V. M., Abiev R. Sh., Kulov N. N. [Review of works on the theory and practice of mixing]. *Teoreticheskie Osnovy Khimicheskoi Tekhnologii*, 2018, v. 52, no. 4, pp. 367–383. (In Russian).
10. Braginskii L. N., Begachev V. I., Barabash V. M. *Peremeshivanie v zhidkikh sredakh* [Mixing in liquid environment. Leningrad, Khimiia Publ., 1984. 336 p.].
11. Grigor'eva A. N., Abiev R. Sh. [The influence of the shape of the impeller on the diameter of air bubbles during mixing in the gas-liquid system]. *Khimicheskaiia Promyshlennost' Segodnia*, 2019, no. 5, pp. 18–22. (In Russian).
12. Stenstrom M. Measurement of oxygen transfer in clean water. Virginia, American Society of Civil Engineers, 2007, pp. 3–6.
13. Grigor'eva A. N., Abiev R. Sh. [Comparative analysis of the influence of the geometric shape of the impellers of mixing devices on the suspending effectiveness in the liquid – solid system]. *Izvestiia SPbGTI (TU)*, 2018, no. 45, pp. 94–97. (In Russian).
14. Sardeing R., Aubin J., Xuereb X. Gas-liquid mass transfer: a comparison of down- and up-pumping axial flow impellers with radial impellers. *Trans IChem Engineering*, 2004, no. 82 (12), pp. 1589–1596.