ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ДИАМЕТР ПУЗЫРЬКОВ ВОЗДУХА ПРИ ПЕРЕМЕШИВАНИИ В СИСТЕМЕ ГАЗ-ЖИДКОСТЬ

Григорьева А.Н., Абиев Р.Ш. Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет

ПРЕДСТАВЛЕН СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДРОБЛЕНИЯ ПУЗЫРЬКОВ ВОЗДУХА ТУРБИННОЙ И НОВОЙ КОНИЧЕСКОЙ МЕШАЛОК. В КАЧЕСТВЕ КРИТЕРИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИНЯТО СООТНОШЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА ФАЗ К ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ. УСТАНОВЛЕНО, ЧТО КОНИЧЕСКАЯ МЕШАЛКА ПО РАЗМЕРАМ СОЗДАВАЕМЫХ ПУЗЫРЬКОВ НЕМНОГО УСТУПАЕТ ТУРБИННОЙ, ОДНАКО ПОТРЕБЛЯЕТ ГОРАЗДО МЕНЬШЕ ЭНЕРГИИ. ПО ПРИНЯТОМУ КРИТЕРИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЕ ВНОВЬ РАЗРАБОТАННОЙ КОНИЧЕСКОЙ МЕШАЛКИ БОЛЕЕ ВЫГОДНО.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АЭРОТЕНК, ГИДРОДИНАМИКА, ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО.

Введение

Перемешивание в системе газ-жидкость в основном проводится для интенсификации массообмена [1]. В настоящее время в очистке сточных вод широкое распространение получила пневматическая система аэрации при помощи дисковых аэраторов, основными недостатками которых является [2]:

- изменения в материале мембраны в процессе эксплуатации:
- снижение эффективности с увеличением расхода воздуха;
- наличие отдельного воздуховода;
- потребность в большом количестве аэраторов, расположенных по площади аппарата;
- чрезмерно высокая длительность и сложность монтажа аэраторов, особенно при большом их количестве;
- необходимость в специальных водосбросных стояках.

Одним из решений проблемы забивания пневматической аэрации является переход на пневмомеханическую систему. Подобные системы применялись еще с 80-х годов [3], причем в качестве перемешивающего устройства исполь-

зовалась турбинная мешалка. Использование дополнительного механического перемешивания при пневматической аэрации приводит к увеличению ее эффективности и позволяет снизить расход воздуха, необходимого для биологической очистки сточных вод [4].

Авторы статьи [5] исследовали комбинированную систему с применением вихревого эрлифтного устройства. При производственном внедрении технологии перемешивания на канализационных очистных сооружениях (КОС) г. Кузнецк-12 Пензенской области удалось снизить удельный расход воздуха, поступающего в аэротенк, с 9,9 до 7,0 м³/м³. Эффективность системы аэрации после проведенной реконструкции увеличилась с 1,9 до 2,7 кг/(кВт.ч).

Для выбора диаметра рабочего колеса мешалки и частоты вращения необходимо знать, какой диаметр пузырька воздуха требуется получить для достижения эффективной очистки воды. Авторы статьи [6] пришли к выводу о том, что независимо от расхода сточных вод эффект очистки достигает максимума при диаметре пузырьков $(1,45-2)\times10^{-3}$ м. При дальнейшем увеличении диаметра эффект очистки уменьшается, достигая минимума при $d=8,6\times10^{-3}$ м, а затем начинает возрастать. Данный эффект

связан с самопроизвольным дроблением пузырьков, приводящим к увеличению поверхности контакта фаз. В данный момент большинство предприятий по очистке сточных вод используют предпочтительно мелкопузырчатую систему аэрации, так как она позволяет экономить на расходе воздуха. Таким образом, исходя из исследования, приведенного в статье [6], для эффективной очистки сточных вод необходимым условием является создание пузырьков воздуха диаметром не более 2,5×10-3 м.

Цель данной работы – сравнить эффективность диспергирования газа при работе разработанной нами конической мешалки с турбинной, которая достаточно хорошо изучена и признана многими авторами как наиболее эффективная для перемешивания в системе газ-жидкость [7], [8], [9].

В качестве критерия для сравнения перемешивающих устройств выбран показатель «отношение удельной поверхности контакта фаз к количеству используемой электроэнергии».

В ходе работы выявлено, что турбинная мешалка превосходит коническую по количеству создаваемых пузырьков воздуха, это связано с большим вводом энергии в жидкость, однако по соотношению

удельной поверхности контакта фаз и потребляемой мощности разработанная нами мешалка нового типа существенно выгодно отличается от турбинной.

Теоретическая часть

Пневмомеханические системы аэрации предполагают подачу воздуха в аппарат посредством нагнетателей и диспергирование его в воде с помощью механических перемешивающих устройств. Барботер устанавливается непосредственно под рабочее колесо перемешивающего устройства. Пузырьки интенсивно диспергируются под действием турбулентных пульсаций, создаваемой мешалкой.

Для разрыва пузырька необходимо, чтобы сила турбулентного потока была выше, чем сила поверхностного натяжения пузырька. В тоже время в объёме перемешиваемой газожидкостной смеси происходит процесс коалесценции. Для данного процесса пузыри должны находиться в контакте в течение определенного периода времени, пока поверхность пограничного слоя пленки не достигнет критической толщины. Если пузырьки отделяются входящим вихрем до достижения этой толщины, коалесценция не происходит. С одной стороны, турбулентность способствует столкновению пузырьков, а с другой снижает коалесценцию [10].

Для определения массы растворившегося вещества (кислорода) в жидкости воспользуемся основным уравнением массопередачи:

$$M = K_i \ a\Delta c \tag{1}$$

rде M – масса вещества, перешедшего из одной фазы в другую в единицу времени, κr /c;

 K_{L} - коэффициент массопередачи, м/с; a – полная поверхность контакта фаз в аппарате, м²;

 Δc – средняя движущая сила процесса, разность концентраций, кг/м³.

Удельная площадь поверхности одиночного пузыря $S_{_{\mathrm{уд}}}$ определяется по формуле

$$S_{yz} = \frac{A}{V_{n}} = \frac{6}{d_{32}}$$
 (2)

где ${\rm d_{32}}$ – средний поверхностно-объемный диаметр пузырька по Заутеру, м; ${\rm V_n}$ – объем пузырей в аппарате, м³; Отметим, что значения ${\it A}$ и ${\it S_{\rm уд}}$ и удельной поверхности ${\it a}$, приведенной к объе-



ТАБЛИЦА #1

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПНЕВМОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМ АЭРАЦИИ С МЕШАЛКАМИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

	Пневмомеханиче- ская система с турбинной мешалкой	Пневмомеханиче- ская система с конической мешалкой
Диаметр мешалки d _m , мм	50	70
Частота вращения мешалки п, об/с	20	20
Средний заутеровский диаметр, мм	2,3	2,5
Количество пузырей, шт	7312	5790
Удельная площадь поверхности одиночного пузыря S _{уд} , м	2608	2400
Расход воздуха Q _{аіг} , м³/час	0,3	0,3
Коэффициент мощности, К _N	8,2	0,37
Расчетная потребляемая мощность мешалкой N= $ ho$ K $_{_{N}}$ n $^{_{3}}$ d $_{_{m}}^{_{5}}$, Вт	20,5	4,97
Отношение удельной площади контакта фаз к количеству используемой электроэнергии, м-1/Вт	127,22	482,9

му V газожидкостной смеси в аппарате связаны соотношением

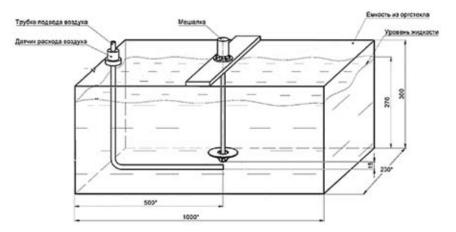
$$a = \frac{A}{V} = \frac{A}{V_{n}} \frac{V_{n}}{V} = \varphi S_{ya}, \tag{3}$$

где ϕ – объемная доля газа в аппарате.

При пневмомеханической аэрации в результате дробления воздуха мешалкой возникают пузырьки, характеризующиеся достаточно широким распределением размеров. Для расчета характеристик массопереноса средний диаметр

РИСУНОК 1.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ



пузырьков определяют по Заутеру [11] как отношение суммарного объема пузырей к суммарной площади поверхности:

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=0}^{n} N_i d_i^3}{\sum_{i=0}^{n} N_i d_i^2}$$
 (4)

где Ni – количество пузырьков в i-м классе, шт;

 $\mathrm{d}i$ – средний диаметр в і-м классе, м.

Подробная методика расчета диаметра пузырька воздуха при работе мешалки в системе газ-жидкость описана в [3]. Из анализа теоретического расчета диаметра пузырьков воздуха можно сделать вывод о том, что помимо коэффициента поверхностного натяжения и плотности

жидкости на показатель влияют диаметр мешалки, частота ее вращения, скорость подачи газа, высота и угол наклона лопасти.

Потребляемая мощность мешалки рассчитывается по формуле [7]:

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

где N – мощность, потребляемая мешалкой. Вт:

 K_N – коэффициент мощности (Ньютона);

 ρ – плотность жидкости, кг/м³;

n – частота вращения мешалки, об/с;

 d_{m} – диаметр мешалки, м.

Экспериментальная часть

Эксперименты по оценке среднего размера диаметров пузырьков проводились в прямоугольном сосуде из оргстекла (полиметилметакрилата) с плоским днищем. Форма емкости максимально приближена к реальным сооружениям (аэротенкам), а ее геометрические размеры велики по сравнению с диаметром мешалки. Схема и размеры экспериментального аппарата представлена на рисунке 1.

Уровень жидкости составил H = 0,270 м. Расход воздуха контролировался при помощи термоанемометрического расходомера с цифровой индикацией сигнала PFM725-F01-D фирмы SMC (Япония). Пределы измерений датчика от 0,03 до 1,5 м³/час, точность $\pm 2\%$. Характеристика мощности, потребляемой мешалками, рассчитывалась по формуле (5). Значение K_N для конической мешалки составляет 0,37. В то время как для турбинной мешалки данный коэффициент составляет 8,2 [13].

В ходе эксперимента измерялась эффективность дробления пузырей воздуха следующих моделей мешалок:

- 1) турбинная тип 03 (рисунок 2а),
- 2) коническая многолопастная нового типа (*рисунок 2б*).

Подробное описание конической многолопастной мешалки представлено в [12]. В исследованиях [12] было найдено, что энергопотребление конической мешалки меньше, поэтому для сравнения были выбраны коническая мешалка диаметром 0,07 м и турбинная с диаметром 0,05 м. Т.е. целью эксперимента было сравнить эффективность аэрации при работе мешалок с приблизительно равным энергопотреблением.

Основные параметры аппарата с мешалкой:

- Частота вращения мешалок n = 20 об/с;
- Число Рейнольдса центробежное рассчитывалось по формуле (6) и составило $Re_{\rm ц} = 97420$ для конической мешалки и $Re_{\rm L} = 49700$ для турбинной мешалки.

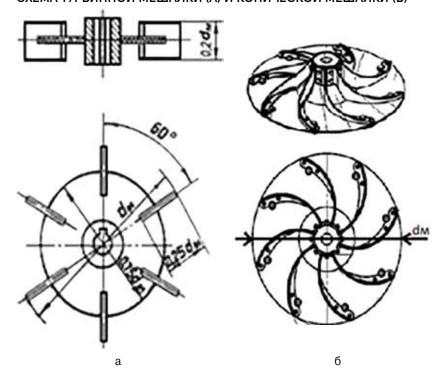
$$Re_{u} = \frac{\rho \, n \, d_{m}^{2}}{\mu} \tag{6}$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; μ – динамическая вязкость, жидкости Па \cdot с;

 d_{m} – диаметр мешалки, м.

РИСУНОК 2.

СХЕМА ТУРБИННОЙ МЕШАЛКИ (А) И КОНИЧЕСКОЙ МЕШАЛКИ (Б)



Число Рейнольдса является критерием подобия, характеризующим соотношение между силами вязкости и инерции в движущемся потоке. В реальных аэротенках конические мешалки работают при частоте вращения 0,3–0,47 об/с, однако диаметр их составляет от 0,6 м, таким образом Re_ц в реальных условиях составляет более 100000. Выбранная частота вращения 20 оборотов в секунду обосновывается тем, что в моделировании мы стремились сохранить критерий подобия течения вязкой жидкости в лабораторном аппарате с мешалкой и реальным аэротенке.

Воздух в аппарат подавался через трубку с внутренним диаметром 0,06 м непосредственно под мешалку с расходом 0,12 м3/час. После включения мешалки аппарат фотографировался при помощи фотокамеры Nikon D90 с разрешением 0,92 млн пикселей, снимки были обработаны в программе ToupView (произведен подсчет количества и диаметра пузырьков воздуха). После обработки фотографий рассчитывался средний диаметр по Заутеру в соответствии с формулой (4) и удельная поверхность раздела фаз по формуле (2).

Результаты и их обсуждение

Фотографии гидродинамической обстановки в аппарате при использовании турбинной и конической мешалки представлены на рисунке 3 и рисунке 4.

На основании данных результатов можно заключить, что область распространения пузырьков с обеими мешалками приблизительно равна и превосходит диаметр колеса по ширине приблизительно в 10 раз. Этот факт может быть еще одним серьезным преимуществом пневмомеханической аэрации и непременно станет направлением наших дальнейших исследований.

При фотографировании пузырьков воздуха при диспергировании газа конической мешалкой (рисунок 5.) и турбинной диаметр вала был использован для определения масштаба. После расчета среднего диаметра по Заутеру было установлено, что турбинная мешалка немного более эффективно диспергирует воздух, соотношение средних диаметров составляет $0.92 \ (2.3 \times 10^{-3} \ \text{м})$ у конической и $2.5 \times 10^{-3} \ \text{м}$ у турбинной). Это связано с большим вводом энергии в аппарат.

РИСУНОК 3.

ФОТОГРАФИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В АППАРАТЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОНИЧЕСКОЙ МЕШАЛКИ



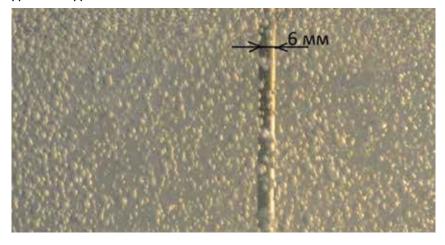
РИСУНОК 4.

ФОТОГРАФИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В АППАРАТЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТУРБИННОЙ МЕШАЛКИ



РИСУНОК 5.

ПУЗЫРЬКИ ВОЗДУХА ПРИ ДИСПЕРГИРОВАНИИ ГАЗА КОНИЧЕСКОЙ МЕШАЛКОЙ. ДИАМЕТР ВАЛА ИСПОЛЬЗОВАЛСЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАСШТАБА

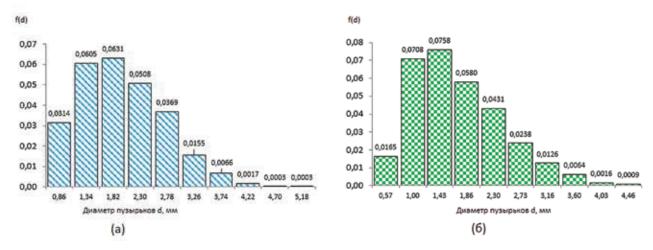


Из анализа зависимости плотности функций плотности распределения числа пузырьков по размерам f(d) от диаметра, которая представлена на рис 6, можно заключить, что при турбулентном режиме

(при высоких числах Рейнольдса) большинство создаваемых мешалкой пузырьков находится в промежутке от 1×10^{-3} до $2,5\times10^{-3}$ м. Эти размеры удовлетворяют требованиям, при которых эффект

РИСУНОК 6.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ПУЗЫРЬКОВ ВОЗДУХА ПРИ ДИСПЕРГИРОВАНИИ ГАЗА КОНИЧЕСКОЙ (A) И ТУРБИННОЙ (Б) МЕШАЛКАМИ



очистки сточных вод максимален. Таким образом, пневмомеханическая система аэрации сточных вод может быть использована как альтернатива традиционной пневматической системе. По принятому нами критерию эффективности вновь разработанная нами коническая мешалка лучше турбинной в 3,8 раза. Это объясняется малым потреблением энергии, т.к. лопасти новой мешалки скруглены, имеют более обтекаемую форму.

Выводы

Из анализа уравнения (1) можно сделать вывод, что определяющее значение эффективности аэрации имеет скорость массопередачи кислорода и удельная поверхность контакта фаз.

В результате проведенной работы установлено, что коническая мешалка разбивает воздух практически также эффективно, как и турбинная, потребляя при этом в 4,12 раза меньше электроэнергии. Соколов и Доманский [14] отмечают, что перемешивание газа с турбинной мешалкой экономически не целесообразно в аппаратах больших объемов. Действительно подобного рода мешалки становятся дорогостоящими устройствами, т.к. увеличение диаметра сопровождается резким увеличением энергопотребления самой мешалки. С разработкой конического колеса в следствии низкого сопротивления лопастей перемешивание в системе газ-жилкость возможно и в аппаратах больших размеров, что особенно актуально для аэротенков с небольшой глубиной при биологической очистке сточных вод, когда эффективность пневматической системы существенно снижается. Кроме того, применение

новой системы пневмомеханической аэрации позволит избежать достаточно трудоемкого процесса монтажа и обслуживания барботеров, уйти от проблемы периодического забивания отверстий. В заключении необходимо отметить, что анализ массообмена в предложенной системе аэрации сточных вод является предметом дальнейших исследований.

Библиография

- 1. Барабаш В.М., Абиев Р.Ш., Кулов Н.Н. «Обзор работ по теории и практике перемешивания», Теоретические основы химической технологии, 2018, том 52, № 4, р. 367-383.
- 2. Мешенгиссер Ю.М. Теоретическое обоснование и разработка новых полимерных аэраторов для биологической очистки сточных вод, Москва, 2005.
- 3. Брагинский В.И., Евилевич Л.Н., Бегачев М.А. Моделирование аэрационных сооружений для очистки сточных вод. // Л.: Химия, 1980.
- 4. Харькина О.В., Эффективная эксплуатация и расчет сооружений биологической очистки сточных вод, Волгоград: Панорама. 2015.
- 5. Андреев С.Ю., Исаева А.М., Малютина Т.В., Пантюшов И.В. «Интенсификация работы мелкопузырчатых систем аэрации аэротенков за счет использования перемешивающих эрлифных устройств», Региональная архитектура и строительство, 2008, №2.
- 6. Дихтярь Т.В., Боровский Д.И. «Исследование зависимости эффекта очистки сточных вод в аэротенке от диаметров пузырьков воздуха», Учебные записки крымского инженерно-педагогического университета, 2006, pp. 65–67.
- 7. Edward L. Paul, Victor A. Atiemo Obeng, Suzanne M. Kresta, Handbook of industrial mixing: science and practice, Canada: A John Wiley & Song, INC., publication, 2004.
 8. Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барабаш В.М., Перемешивание в жидких

средах. // Л.: Химия, 1984.

Щупляка И.А. Перемешивание и аппараты с мешалками. // Л.: Химия, 1975.

10. Bart C.H. Venneker., Jos J. Derksen, and Harrie E.A. Van den-Akker, Population Balance Modeling of Aerated Stirred Vessels Based on CFD, Netherlands: AIChE Journal, April 2002.

9. Стренк Ф. Пер. с польского под ред.

- 11. Sauter J. «Die Grössenbestimmung der in Gemischnebeln von Verbrennungskraftmaschinen brennungskraftmaschin envorhandenen Brennstoffteilchen», VDI Forschungsheft, № № 279, 1926.
- 12. 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), № № 45, 2018.

 13. Барабаш В.М., Бегачев В.И., Брагин-
- ский Л.Н., Васильцов Э.А., Вишневецкая О.Е., Горбачева Г.В., Егорова Г.Г., Козлова Е.Г., Лалакина Л.Л., Максимова С.С., Садовский В.Л., Ушаков В.Г., Черников А.В., Ярошенко В.В. РД 26-01-90-85 «Механические перемешивающие устройства. Метод расчета», 1986.
- 14. Соколов В.Н., Доманский И.В., Газожидкостные реакторы . // Л.: Машиностроение, 1976.

Краткая информация об авторах

Григорьева Анастасия Николаевна

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), аспирант кафедры «Оптимизация химической и биотехнологической аппаратуры», исполнительный директор АО «Астерион». Адрес: 195197, Санкт-Петербург, пр. Просвещения, д. 85, an@ast-pump.ru

Абиев Руфат Шовкетович

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), доктор технических наук, заведующий кафедрой оптимизации химической и биотехнологической аппаратуры, rufat.abiev@gmail.com 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 26