

## **ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ МАССООБМЕНА И ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ ПРИ ПНЕВМОМЕХАНИЧЕСКОЙ АЭРАЦИИ СТОЧНЫХ ВОД**

Процесс аэрации в очистке сточных вод является самым энергоемким. Затраты на обеспечение биологической очистки кислородом составляют около 60 % в структуре себестоимости очистки. Таким образом, эффективность массообмена, снижение расхода воздуха представляются весьма актуальными задачами для предприятий, которые все чаще сталкиваются с проблемой увеличения экономической эффективности своей деятельности.

В настоящий момент применение различных типов аэраторов и пневматической системы (когда при помощи воздуходувок кислород подается на барботеры, установленные на дне аэротенка) является самым распространенным методом. Имеется множество литературных источников, описывающих способы расчета пневматических систем, они общеизвестны и доступны. Несмотря на это существуют самые распространенные проблемы в процессе эксплуатации – забивание пор, сложность обнаружения забитых аэраторов, высокая трудоемкость монтажа, обслуживания и демонтажа аэрационных модулей.

Одной из перспективных систем аэрации для решения вышеперечисленных проблем является применение комбинированной системы, основанной на сочетании пневматической аэрации с перемешивающими механическими устройствами. Известно, что самое энергоемкое оборудование в очистке сточных вод – воздуходувки. Кроме того, энергия, вводимая с газом в аппарат, используется крайне нерационально, поскольку работа газа на перемешивание определяется силой тяжести и силой Архимеда при всплывании пузырей. Следовательно, если подавать воздух в аэротенк в количестве, необходимом только для насыщения бактерий кислородом, а поддерживать активный ил во взвешенном состоянии при помощи мешалок, можно ожидать существенного снижения энергозатрат [1]. Еще одним преимуществом подобной схемы является отсутствие в ее составе аэраторов с мелкими порами, которые подвержены засорению, так как 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 70-х гг. прошлого столетия и подробно описана в [2]. Перемешивание в системе газ – жидкость рассмотрено в работах [3–5]. Практически все авторы отмечают, что самой эффективной для целей диспергирования газа является турбинная мешалка, поэтому в работе для сравнения выбран данный тип перемешивающего устройства.

Компания «Астерион» провела исследование с целью определения эффективности пневмомеханической системы аэрации с использованием турбинной мешалки, рассчитанной в соответствии с [6], и разработанной нами новой конической мешалки, а также сравнения эффективности диспергирования газа при пневматической и пневмомеханической системах аэрации. В качестве критерия для сравнения выбран показатель SOTE (Standard Oxygen Transfer Efficiency), который является основной технологической характеристикой, позволяющей сравнивать эффективности различных аэрационных систем [1]. Вторым критерий эффективности – показатель SAE (Standard Aeration Efficiency) – отношение количества растворенного в жидкости кислорода к количеству используемой электроэнергии.

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

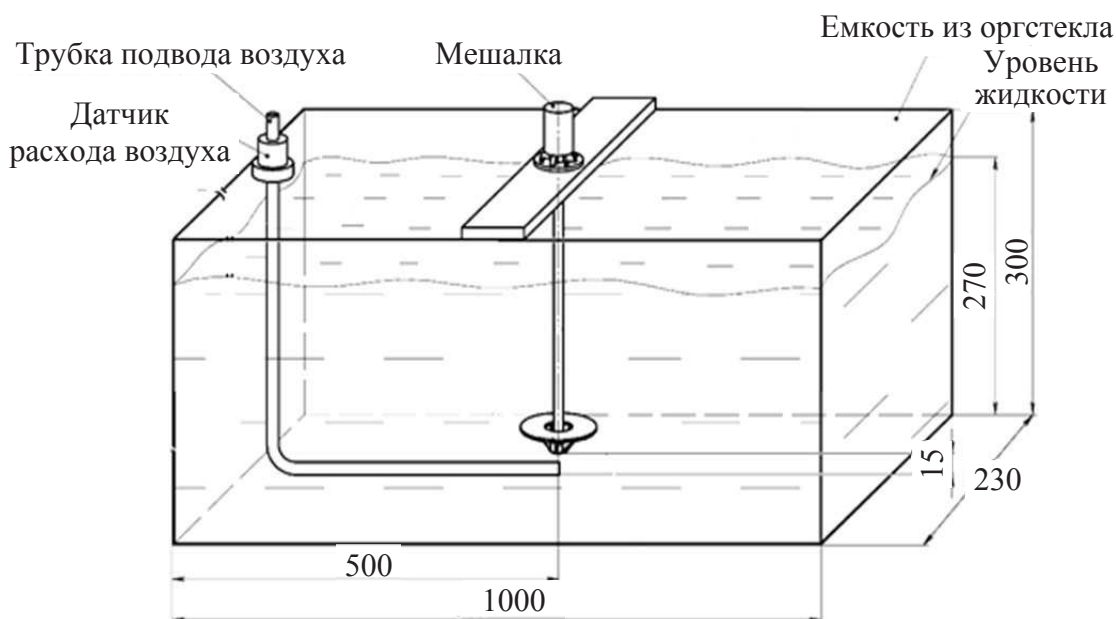


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

В ходе эксперимента измерялась эффективность массообмена при работе следующих моделей мешалок:

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

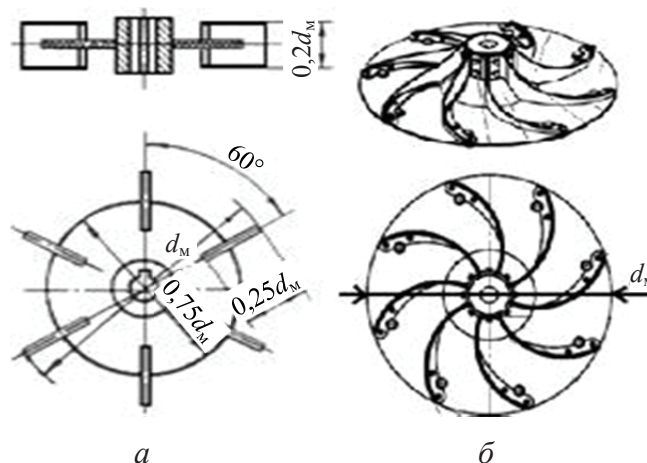


Рисунок 2 – Схема турбинной (а) и конической мешалки (б)

В ходе проведения эксперимента по сульфитной методике были получены графики зависимости концентрации растворенного кислорода в воде от времени для каждой мешалки.

Полученные результаты представлены в таблице.

Таблица – Результаты эксперимента

Показатель	Коническая мешалка диаметром 100 мм	Коническая мешалка диаметром 70 мм	Турбинная мешалка диаметром 100 мм	Турбинная мешалка диаметром 50 мм
Частота вращения, об/мин	600	1200	300	1200
$K_{La}$ , 1/ч	26,98	23,08	24,65	21,90
$K_{La}$ , 1/с	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$6,847 \cdot 10^{-3}$	$6,083 \cdot 10^{-3}$
$Re_{ц}$	$1 \cdot 10^5$	$9,8 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$
SOTR, кг/см <sup>3</sup>	$1,544 \cdot 10^{-5}$	$1,321 \cdot 10^{-5}$	$1,411 \cdot 10^{-5}$	$1,253 \cdot 10^{-5}$
Мощность, Вт	3,8	5,1	10,25	20,5
SOTE, %/м	0,036	0,03	0,032	0,029
SAE, кг/кВт·ч	$4,063 \cdot 10^{-6}$	$2,585 \cdot 10^{-6}$	$1,376 \cdot 10^{-6}$	$0,6113 \cdot 10^{-6}$

По критерию эффективности SOTE все сравниваемые мешалки имеют незначительные различия. Хотя можно наблюдать тенденцию роста коэффициента массообмена  $K_{La}$  при увеличении диаметра мешалки. Если проанализировать теоретический расчет  $K_{La}$  в статье

Вант Рита [7], на величину коэффициента массообмена влияет площадь аэрации, т. е. размер зоны жидкости, в которой распределены пузырьки. При большем диаметре мешалки площадь распространения пузырьков выше, это и объясняет рост SOTE. Полученные показатели SOTE исследованных рабочих колес показывают низкую эффективность переноса кислорода по сравнению с привычными данными промышленных систем аэрации. Это связано с тем, что использованная экспериментальная пилотная установка небольшая, и поэтому время пребывания пузырьков является коротким, вследствие чего сокращается время для массопереноса. Конечно, в аппарате промышленного размера, где время пребывания пузырька будет намного больше, можно ожидать более высоких значений SOTE. В результате проведенной работы получены интересные данные по показателю SAE. Если сравнивать турбинные мешалки диаметром 100 и 50 мм при приблизительно одинаковых числах Рейнольдса  $Re_{\text{ц}}$  и при практически равном энергопотреблении, можно отметить, что по критерию SAE турбинная мешалка диаметром 100 мм превосходит турбинную диаметром 50 мм в 2,25 раза. Наиболее выгодной к применению 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 у турбинной диаметром 100 мм на 10 %, при этом энергопотребление в 2,7 раза меньше. Этот факт объясняется более обтекаемой геометрией мешалки.

С одной стороны, 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 обеспечивает более полную передачу момента импульса вращающейся жидкости и сниженное потребление энергии, поскольку форма лопаток приближается к форме линий тока жидкости. Кроме того, особая форма лопаток конической мешалки (близкая к форме лопаток центробежных 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 пузырьков в зоне активного перемешивания.

В результате проведенной работы установлено, что коническая мешалка по скорости насыщения воды кислородом работает так же 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. Кроме того, применение новой системы пневмомеханической аэрации позволит избежать достаточно трудоемкого процесса монтажа и обслуживания барботеров, уйти от проблемы периодического забивания отверстий в них. С внедрением системы пневмомеханической аэрации сточных вод появится возможность подавать кислород в объемах, необходимых для насыщения иловой смеси, а перемешивание производить мешалками. Таким образом, удастся снизить мощность воздуходувок – самого энергоемкого оборудования на водоканалах. В заключение необходимо отметить, что зависимость эффективности массообмена от геометрических размеров аппарата и диаметра мешалки в предложенной системе аэрации сточных вод является предметом дальнейших исследований.

### Литература

1. Харькина, О.В. Эффективная эксплуатация и расчет сооружений биологической очистки сточных вод / О.В. Харькина. – Волгоград: Панорама, 2015. – 433 с.
2. Брагинский, В.И. Моделирование аэрационных сооружений для очистки сточных вод / В.И. Брагинский, Л.Н. Евилевич, М.А. Бегачев. – Л.: Химия: Ленингр. отд-ние, 1980. – 143 с.
3. Paul, Edward L. Handbook of industrial mixing: science and practice / Edward L. Paul, Victor A. Atiemo-Obeng, Suzanne M. Kresta. – Canada: John Wiley & Sons, Inc., 2004. – 1448 p.
4. Барабаш, В.М. Обзор работ по теории и практике перемешивания / В.М. Барабаш, Р.Ш. Абиев, Н.Н. Кулов // Теоретические основы химической технологии. – 2018. – Т. 52, № 4. – С. 367–383.
5. Брагинский, Л.Н. Перемешивание в жидких средах / Л.Н. Брагинский, В.И. Бегачев, В.М. Барабаш. – Л.: Химия: Ленингр. отд-ние, 1984. – 336 с.
6. Аппараты с механическими перемешивающими устройствами. Общие технические условия: ГОСТ 20680–2002. – Введ. 01.07.2003. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. – 20 с.
7. Sardeing, R. Gas-liquid mass transfer: a comparison of down- and up-pumping axial flow impellers with radial impellers / R. Sardeing, J. Aubin, X. Xuereb // Chemical Engineering Research and Design. – 2004. – Vol. 82 (12). – P. 1589–1596.