

УДК 628.2; 628.14

**Н.С. СЕРПОКРЫЛОВ**доктор технических наук, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения  
Ростовский государственный строительный университет**А.С. СМОЛЯНИЧЕНКО**кандидат технических наук, ассистент кафедры водоснабжения и водоотведения  
Ростовский государственный строительный университет**И.И. ЛЕСНИКОВ**аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения  
Ростовский государственный строительный университет**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА АЭРАТОРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ  
СТОЧНЫХ ВОД ПО ОБОБЩЕННОМУ КРИТЕРИЮ АЭРАЦИИ***COMPARATIVE ANALYSIS OF AERATORS FOR WASTEWATER PURIFICATION  
AND UNIFIED AERATION CRITERIA*

*Обосновано предложение проводить сравнительную оценку и выбор аэраторов для биологической очистки сточных вод по обобщенному критерию аэрации, учитывающему коэффициент массопередачи кислорода, окислительную способность и эффективность аэрации.*

**Ключевые слова:** коэффициент массопередачи кислорода, окислительная способность, эффективность аэрации, обобщенный критерий аэрации.

Появление новых современных материалов и оборудования для диспергирования воздуха отечественного [1] и зарубежного производства [2,3], имеющих повышенную надежность и энергетические показатели, ставит задачу их сравнительного анализа перед внедрением в практику.

В российской практике биологической очистки сточных вод наибольшее распространение получила пневматическая система аэрации [2]. В то же время многим типам пневматических мелко- и среднепузырчатых аэраторов свойственны кольматация пор и связанные с ней увеличение сопротивления выходу воздуха и, соответственно, рост давления в системе, необходимого для диспергирования одного и того же количества воздуха. Особую сложность для эксплуатации представляет собой периодическое отключение электроэнергии с прекращением аэрации, поскольку через поры и каналы аэраторов в воздухораспределительную систему поступает иловая смесь, которая оседает внутри аэраторов, повышая сопротивление трубопроводов и снижая количество подаваемого воздуха. Данную смесь при повторном включении воздухоудного оборудования следует выпускать, что приводит к ручному труду, гидравлическим ударам и, как следствие, - к разрушению отдельных аэраторов. Через них выходит основной расход воздуха, влияя на неравномерность аэрации, создавая застойные зоны и т. п. Восстановление поврежденных аэраторов требует опорожнения аэротенков. В итоге все это приводит к существенным экономическим и временным затратам, даже если не принимать во внимание снижение качества очистки вод.

*The article shows that it is only reasonable to compare and choose aerators for biological wastewater purification using a set of unified aeration criteria, based on oxygen mass transfer coefficient, oxidizing capacity and aeration efficiency.*

**Key words:** oxygen mass transfer coefficient, oxidizing capacity, efficient aeration, unified aeration criteria.

Как известно, при массовом всплывании пузырьков воздуха в аэротенках возможны пузырьковый, факельный и струйный режимы, во многом определяющие эффективность системы аэрации [4,5].

Площадь поверхности контакта фаз, время и скорость массопередачи кислорода из воздушных пузырьков в жидкость являются важнейшими показателями эффективности процесса барботажной аэрации, что, в первую очередь, зависит от конструктивных особенностей аэраторов.

Процесс растворения кислорода в аэротенках условно можно подразделить на четыре одновременно протекающих стадии: 1 - образование, 2 - подъем, 3 - выход на поверхность пузырьков, 4 - поступление кислорода через поверхность жидкости (реаэрация). При этом значения объемных коэффициентов массопередачи различны на каждой стадии, причем в момент образования пузырьков массопередача наиболее эффективна и может достигать 30 % общей величины (по Каунтсу) [2].

Таким образом, технологическую оценку аэраторов и выбор их рекомендуется производить на основе комплексной оценки массообменных, энергетических, а также эксплуатационных характеристик аэраторов. К последним мы предлагаем относить, помимо прочих (обрастание, засорение пор, механическую прочность, всплывание и т. п.), также поступление иловой смеси в аэрационную систему.

Проведена экспериментальная оценка некоторых технологических показателей современных аэраторов, широко применяемых или рекомендуемых разработчиками к использованию в практике

биологической очистки сточных вод в аэротенках: 1 - перфорированные пластмассовые аэраторы (диаметром 60 мм, отверстия размером 2 мм) длиной 0,75 м; 2 - сетчатые аэраторы (диаметром 60 мм, отверстия - 2 мм, сетка с размерами ячеек 1x1 мм) длиной 0,75 м; 3 - аэраторы фирмы «Экополимер» (Россия) диаметром 100 мм, длиной 0,87 м; 4 - тканевый аэратор длиной 0,75 м, диаметром 60 мм (полотно иглопробивное термоскрепленное с двух сторон, артикул 380.400.03/169).

Оценены технологические характеристики трех типов трубчатых мембранных аэраторов 5 - RAUBIOXON фирмы Rehau (ФРГ) диаметром 64 мм, длиной 0,5, 0,75 и 1,0 м (мембраны из этиленпропилендиен-каучука или силикон-каучука) [4]; 6 - фирмы Vodni energie s. r. o. (Чешская республика) диаметром 64 мм, длиной 0,75 м (мембрана ПУМ - 68 полиуретана [7]; 7 - фирмы FORTEGS – AGS a.s (Чешская республика) диаметром 68 мм, длиной 0,75 м (мембрана АМЕ-Т из модифицированного полиуретана [8]).

Выбор указанных мембранных аэраторов для оценки был обусловлен тем, что, по данным их производителей, они имеют высокие энергетические показатели производства кислорода от 2,5 до 6,5 кг O<sub>2</sub> на 1 кВт·ч израсходованной электроэнергии. В то же время они практически не применяются в практике очистки сточных вод в России.

В качестве критериев эффективности аэрации рассматривали: объемный коэффициент массопередачи кислорода  $k_{VT}$ , ч<sup>-1</sup>, КПД, %, окислительную способность (ОС), кг/ч·м<sup>3</sup>, эффективность аэрации (ЭА) - производства кислорода, кгO<sub>2</sub>/кВт·ч.

Исследования проведены по методике переменного дефицита кислорода на обескислороженной водопроводной воде с сульфитом натрия и катализатором (хлористым кобальтом) [4] на модели аэро-

тенка с прозрачными стенками с высотой слоя воды 0,45 м и на реальных сточных водах г. Ростова-на-Дону на модели аэротенка со слоем иловой смеси 3,6 м.

При изучении физической картины визуально было выявлено, что пузырьковый режим аэрации наблюдается на всех исследованных аэраторах, за исключением сетчатого (факельный) и тканевого (переходной между факельным и струйным).

Подтверждено [1-3], что длительность насыщения жидкости по методике переменного дефицита кислорода зависит от расхода воздуха, типа и габаритных размеров аэратора.

Сравнивая показатели насыщения кислородом обескислороженной водопроводной воды (рис. 1),

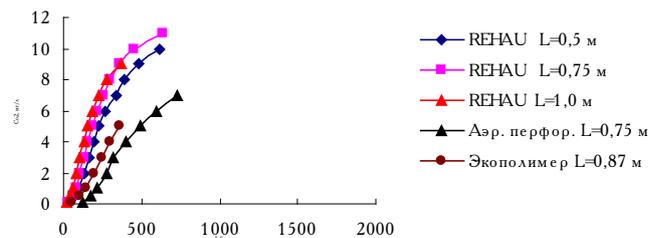


Рис. 1. Показатели насыщения кислородом обескислороженной воды некоторыми аэраторами при расходе воздуха 7,8 м³/ч (на фактическую длину аэраторов)

можно увидеть, что длительность достижения равных концентраций кислорода, характеризующая окисление сульфита и растворение кислорода в жидкости, при равных расходах воздуха зависит от типа и размеров аэратора. По времени достижения равной концентрации растворенного кислорода (например, 5 мг/л) в обескислороженной водопроводной воде для одинаковых исходных условий можно судить об эффективности данного типа аэратора (табл. 1).

Таблица 1

**Время, с, достижения растворенным кислородом концентрации 5 мг/л в обескислороженной водопроводной воде**

Тип аэратора при его длине 0,75 м	Время достижения концентрации, с, при расходе воздуха, м³/ч		Поступление жидкости в систему аэрации
	3,9	7,8	
Перфорированная труба	1192	488	+
Сетчатый	898	406	+
Тканевый	1740	890	- +
«Экополимер»	760	362	+
RAUBIOXON	314	158	-
Vodni energie	670	210	+
FORTEGS – AGS	780	440	+

Следует отметить (табл. 1), что при отключении подачи воздуха только в аэраторы RAUBIOXON и частично в тканевые жидкость в аэрационную систему не поступает, а это весьма существенно для практики.

На первой стадии процесса аэрации – образования пузырьков воздуха – получены массообменные характеристики ряда аэраторов (табл. 1) при высоте слоя жидкости 0,45 м. Изучение второй стадии процесса аэрации – подъема пузырьков – выполнено на модели аэротенка с высотой слоя воды 3,6 м на аэраторах Raubioxon на водопроводной воде (рис. 2, табл. 2).

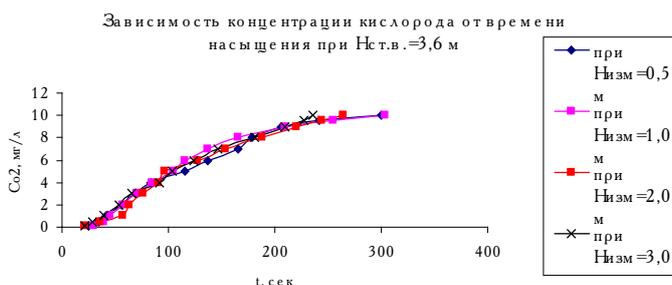


Рис. 2. Показатели насыщения кислородом обескислороженной воды по высоте слоя при расходе воздуха 7,8 м³/ч аэраторами Raubioxon (на 1 м аэратора)

**Технические и массообменные характеристики аэраторов Raubioxon при высоте слоя воды 1,3 – 3,6 м**

Высота слоя воды, м	Глубина измерения от поверхности воды, м	$k_{VT}$ , ч <sup>-1</sup>	КПД, %	Окислительная способность, кг/ч·м <sup>3</sup>	Эффективность, кгO <sub>2</sub> /кВт ч
1,3	0,5	23,17	6,24	5,2	9,74
1,8	0,5	25,68	9,6	4,18	3,56
	1,0	28,39	10,37	4,86	4,14
2,3	0,5	29,36	12,17	3,27	3,62
	1,0	28,73	11,23	3,078	3,39
	1,5	27,48	11,48	2,89	3,19
2,8	0,5	24,81	10,37	1,91	2,54
	1,0	30,74	17,48	3,81	5,08
	2,0	29,53	16,84	3,54	4,73
3,3	0,5	29,74	18,28	2,49	3,94
	1,5	31,24	19,24	2,75	4,36
	2,5	41,0	22,18	3,66	5,39
3,6	0,5	33,25	19,65	2,28	3,9
	1,0	32,85	19,39	2,22	3,79
	2,0	37,8	22,32	2,96	5,06
	3,0	41,81	24,97	3,73	6,38

В условиях реальных высот жидкости в аэротенках наблюдается равномерность распределения воздуха (рис. 2), хотя расхождение между временем достижения насыщающих концентраций кислорода по высоте столба жидкости составляет 6 – 9%, что находится в интервале ошибки измерений содержания O<sub>2</sub>.

Характеристические показатели аэраторов Raubioxon при высоте столба жидкости 1.3 – 3.6 м при расходе воздуха 7.8 м<sup>3</sup>/ч на 1 п. м рекомендуется рассчитывать по статистически достоверным зависимостям ( $R^2 \geq 0,97$ ):

- коэффициент массопередачи

$$K_v = 10,28 h^5 - 95,63 h^4 + 327 h^3 - 503,99 h^2 + 346,95 h - 55,31, \text{ ч}^{-1};$$

- КПД массопередачи

$$\eta = 5,28 h^5 - 47,46 h^4 + 155,72 h^3 - 228,53 h^2 + 151,51 h - 23,023, \text{ \%};$$

- окислительная способность

$$OC = 1,86 h^5 - 17,31 h^4 + 59,63 h^3 - 93,48 h^2 + 64,81 h - 11,94, \text{ кг / ч} \cdot \text{м}^3;$$

- эффективность массопередачи

$$\Theta = 2,81 h^5 - 25,46 h^4 + 85,21 h^3 - 129,25 h^2 + 87,34 h - 16,47, \text{ кгO}_2/\text{кВт} \cdot \text{ч}.$$

На практике вследствие потребления O<sub>2</sub> на химическое и биохимическое окисления загрязнений имеются существенные расхождения между содержанием растворенного кислорода в чистой и загрязненной жидкостях [4,8], что потребовало уточнения массообменных параметров на реальных сточных водах (микрорайон «Стройгородок» г. Ростова-на-Дону).

Экспериментальный аэротенк располагался у аэротенка-нитрификатора очистных сооружений микрорайона, в который автоматически (один раз в час) подавали хозяйственно-бытовую сточную воду после песколовков в количестве, необходимом для того, чтобы гидравлическое время пребывания в модели составило 10 часов, как в реальных условиях. Расход воздуха через аэраторы Raubioxon в модели варьировали соответственно реальным параметрам в аэротенке: интенсивность воздуха по объему 8.1 – 15 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> сточных вод, интенсивность воздуха по площади аэрации 5.3 - 9.4 м<sup>3</sup>/ (м<sup>2</sup>·ч). После установления режима в модели (10 суток)

определяли содержание кислорода в иловой смеси и окислительную способность биомассы в течение 6 часов, одновременно контролируя эти показатели в работающем аэротенке. При этом температура иловой смеси в аэротенках колебалась от 11 до 23 °С.

Установлено, что при меньших расходах воздуха концентрация растворенного кислорода в иловой смеси в модели составляла 3.2 – 4.5 мг/л, что на 0.2 – 0.8 мг/л выше, чем в работающем аэротенке. При больших расходах, соответственно 4.1 – 6.2 и на 1.0 – 2.5, окислительная способность биомассы модели на 15 – 22 % больше, чем в аэротенке. Видовое разнообразие биомассы по индикаторным микроорганизмам, в модели больше, чем в работающем аэротенке. Для условий городских сточных вод Ростова-на-Дону при проведении исследований величина фактических затрат электроэнергии на перенос кислорода составила: в модели  $N = 2.86 - 3.96 \text{ кг O}_2/\text{кВт} \cdot \text{ч}$ , в аэротенке 1.22 – 1.64 (сочетание пневматических и механических аэраторов).

Техническое совершенство систем аэрации, как уже отмечалось [4], характеризуется тремя основными показателями:  $OC$ ,  $k_v$  и  $E$ , при этом чем выше каждый показатель, тем лучше в целом система. Основываясь на этом положении, комплексную оценку аэраторов разного типа, независимо от конструктивных особенностей, предлагается вести на базе безразмерного обобщенного критерия аэрации  $K_{aэр} = OC \times k_v \times E$ , учитывающего окислительную способность, коэффициент массопередачи и энергетическую эффективность производства кислорода. Проведем сравнение по  $K_{aэр}$  рабочих параметров различных аэраторов, используя литературные и наши экспериментальные данные [1, 2, 5, 10], после чего составим ранжировочный ряд (табл. 3).

Ранжирование по величине обобщенного критерия аэрации  $K_{aэр}$  позволяет рекомендовать вести выбор аэраторов для биологической очистки сточных вод в последовательности: I – мембранные (1 - Raubioxon, 2 – «Водные энергии», 3 - FORTEGS – AGS); II – пневматические (1 - «Экополимер», 2 - перфорированные, 3 - сетчатые, 4 – тканевые); III – механические; IV – пневмомеханические; V – эрлифтные; VI – эжекторные.

## Комплексная оценка аэраторов для биологической очистки сточных вод

Типы аэраторов, длина (L), высота слоя воды (H)	ОС / среднее, кг O <sub>2</sub> / (м <sup>3</sup> ·ч)	E / среднее, кг O <sub>2</sub> / (кВт · ч)	K <sub>v</sub> / среднее, ч <sup>-1</sup>	Обобщенный критерий аэрации K <sub>аэр</sub>	Ранг
Пневматические	0,015 – 0,18 / 0,98	0,8 – 2,0 / 1,4	1,1 – 7,3 / 4,2	5,76	6
Механические	0,06 – 0,225 / 0,143	2,5 – 3,0 / 2,75	3,2 – 7,0 / 5,1	2,75	7
Пневмомеханические	0,9 – 0,2 / 0,145	1,6 – 1,8 / 1,7	6,0 – 8,0 / 7,0	1,73	8
Эжекторные	0,70 – 0,120 / 0,95	<1,0 / 0,5	2,5 – 5,0 / 3,75	0,178	11
Эрлифтные	0,03 – 0,065 / 0,048	1,0 – 1,6 / 1,3	1,6 – 5,4 / 3,5	0,216	10
Raubioxon, L=0,75 м, H = 0,45 м	0,27-5,67 / 2,97	1,69-9,74 / 5,72	17,66 -78,10 / 47,88	813,4	3
Перфорированный, L=0,75 м, H = 0,45 м	0,054-0,31 / 0,182	0,1-0,61 / 0,36	1,22-4,61 / 2,92	0,191	12
Сетчатый, L=0,75 м, H = 0,45 м	0,04 - 0,229 / 0,135	0,08-0,43 / 0,26	1,12-4,24 / 2,68	0,09	13
Водные энергии, L=0,75 м, H = 0,45 м	0,5 -5,67 / 3,085	0,56 -6,69 / 3,61	26,63-68,10 / 47,37	528.4	4
FORTEGS – AGS L=0,75 м, H = 0,45 м	0,39-1,31 / 0,85	0,24-5,16 / 2,70	12,85-43,01 / 27,93	68.7	5
«Экополимер», L=0,87 м, H = 0,45 м	0,13 - 0,442 / 0,28	0,24 – 0,83 / 0,64	1,37 – 5,94 / 2,16	0.39	9
Тканевый L=0,75 м	До 0,01	До 0,019	1,65-3,37 / 2,51	0,001	14
Raubioxon, H=3,3м	3,66	5,39	41.0	976.3	2
Raubioxon, H=3,6м	3,73	6,38	41,81	995.0	1

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Мешенгиссер, Ю. М. Теоретическое обоснование и разработка новых полимерных аэраторов для биологической очистки сточных вод [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Ю.М. Мешенгиссер. – М.: НИИ ВОДГЕО, 2005.
- Серпокрылов, Н. С. Экспериментальная оценка некоторых технологических показателей современных аэраторов [Текст] / Н.С. Серпокрылов, А.С. Смоляниченко, и др. // Вода: технология и экология. – 2007 - № 3. С. 78 – 83.
- Ingenieria de aguas residuales: tratamiento, vertido i reutilizacion. – Mexico: Metcalf & Eddy. – 1996. - 1485 p.
- Cornel, P. Sauerstoffzufurvermogen und Sauerstoffvertag der RAUBIOXON – Rohrbelufter [Text] / P. Cornel, M. Wagner, U. Rutze. – Darmstadt: Technische Universitet Darmstadt, 1999. 15 с.
- Худенко, Б. М. Аэраторы для очистки сточных вод [Текст] / Б.М. Худенко, Е.А. Шпирт. – М.: Стройиздат, 1973. – 112 с.
- Гришин, Б. М. Кинетика процесса массопередачи кислорода в жидкость при всплывании одиночного пузырька [Текст] / Б.М. Гришин, С.Ю. Андреев, и др. // Совершенствование систем водоснабжения и водоотведения по очистке природных и сточных вод: межвуз. сборник научн. тр. / СГАСУ. – Самара, 2005. – С. 97 – 99.
- Aeration elemente. Рекламный проспект фирмы Vodni energie s. r. o. (Чешская республика).
- Аэрационные системы АМЕ. Рекламный проспект фирмы FORTEGS – AGS a.s (Чешская республика)
- Яковлев, С. В. Водоотведение и очистка сточных вод [Текст] / С.В. Яковлев, Ю.И. Воронов. – М.: АСВ, 2002. – 704 с.
- Михайлов, М.М. Обоснование применения аэраторов струйного типа для биологической очистки сточных вод [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.М. Михайлов. – М., 1984. – 16с.

© Серпокрылов Н.С., Смоляниченко А.С., Лесников И.И., 2011