

## ОЦЕНКА ГИДРОДИНАМИКИ ЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ И ПРОЦЕССЫ МАССОПЕРЕНОСА КИСЛОРОДА В АЭРАЦИОННЫХ СООРУЖЕНИЯХ

*Абдукодирова Малахат Нориджоновна*

*доцент, Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства,  
Узбекистан, г. Ташкент*

*Радкевич Мария Викторовна*

*д-р техн. наук, доцент, и.о. профессора Ташкентский институт инженеров ирригации  
и механизации сельского хозяйства,  
Узбекистан, г. Ташкент  
E-mail: [maria7878@mail.ru](mailto:maria7878@mail.ru)*

## EVALUATION OF FLUID FLOW HYDRODYNAMICS AND OXYGEN MASS TRANSFER PROCESSES IN AERATION STRUCTURES

*Malakhat Abdukodyrova*

*Associate Professor, Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers,  
Uzbekistan, Tashkent*

*Maria Radkevich*

*Doctor of tech. Sci., Associate Professor, Acting Professor of Tashkent Institute  
of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers,  
Uzbekistan, Tashkent*

### АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются рабочие характеристики гибких аэрационных трубок, выполненных из пористой резины. Выявлена зависимость между физическими характеристиками трубок и их гидродинамическими показателями. Также выявлено, что размер образующихся пузырьков не зависит от расхода воздуха, но связан с жесткостью отверстия.

### ABSTRACT

The article discusses the performance of flexible aeration tubes made of porous rubber. The relationship between the physical characteristics of the tubes and their hydrodynamic indices is revealed. It was also revealed that the size of the bubbles formed does not depend on the air flow, but is associated with the rigidity of the hole.

**Ключевые слова:** аэротенк, система аэрации, гибкий диффузор, твердость, размер пузырька.

**Keywords:** aeration tank, aeration system, flexible diffuser, hardness, bubble size.

Аэрационные сооружения являются основной составляющей биологической очистки, обеспечивающей подачу и распределение кислорода в аэротенке, поддержание активного ила во взвешенном состоянии и создание благоприятных гидродинамических условий работы аэротенков.

Ранее проведенная оценка работы Саларской станции аэрации г. Ташкента [1] показала, что существующая система аэрации (через фильтровые пластины) не обеспечивает достаточного качества очистки. Таким образом, возникла необходимость разработки более совершенной конструкции аэраторов. В настоящее время наиболее эффективными считаются пневматические трубчатые аэраторы [3, 5]. Для оценки возможностей применения гидропневматических аэраторов на Саларской станции

аэрации рассмотрим свойственные им процессы гидродинамики жидкостных потоков и массопереноса кислорода.

В зависимости от способа подачи и распределения воздуха различают аэраторы пневматического, механического, гидравлического и комбинированного типа [2]. В настоящее время наиболее широкое распространение получили пневматические аэраторы [3], хотя вопрос о создании оптимальной конструкции аэратора до сих пор не решен. Все многообразные по размеру и форме устройства пневматической аэрации подразделяются мелкопузырчатые ( $d = 1-4$  мм), среднепузырчатые ( $d = 5-10$  мм) и крупнопузырчатые ( $d > 10$  мм). К мелкопузырчатым относятся, например, аэраторы форсуночного и ударного типа, а также керамические, тканевые и пластиковые аэраторы; к среднепузырчатым – перфорированные

трубы, щелевые и др.; к крупнопузырчатым – открытые трубы, сопла и т.п.

Основным недостатком пористых мелкопузырчатых аэраторов является их засорение пылью, поступающей с воздухом. Содержание пыли в воздухе не должно превышать  $0,05 \text{ мг/м}^3$ . Перерывы в аэрации приводят к фильтрованию жидкости через пористые аэраторы и забиванию их частицами активного ила. Эффекты обрастания снижают эффективность массопереноса кислорода и требуют большего рабочего давления, которое снижает их энергетические характеристики [6].

Среднепузырчатые аэраторы (перфорированные трубы диаметром  $d = 6 \dots 10 \text{ мм}$ ) менее эффективны, но и меньше засоряются. В процессе массопереноса кислорода в аэрационных сооружениях газ может выделяться в виде небольших пузырьков для обеспечения их наибольшей поверхности.

Считается, что наилучшими характеристиками обладают пузырьки, генерируемые на гибком отверстии [5, 6]. Поэтому нами были проанализированы гидродинамические характеристики массопереноса кислорода [4] при использовании гибких аэрационных трубок.

Гибкие трубки различаются по таким физическим свойствам, как толщина стенки, прочность на растяжение, размер отверстия, твердость и удлинение, которые влияют на характеристики переноса кислорода. Учитывая свойства гибких трубок, их пористая стенка может образовывать мелкий пузырь, что приводит к увеличению межфазной области и ускоряет скорость переноса кислорода. Благодаря

своей гибкости трубка может быть установлена и смонтирована на различных поверхностях, причем возникающее в трубке усилие сдвига помогает уменьшить накопление загрязняющих веществ на трубчатом диффузоре и увеличить продолжительность его использования [5].

При очевидных достоинствах гибких аэраторов на сегодняшний день нет точных методов их проектирования, а также отсутствуют достоверные данные о характеристиках различных видов и форм трубок и оптимизации выпускаемой гибкой трубки диффузора аэрации, а также для оценки ее характеристик [4, 6]. Чтобы заполнить этот пробел, необходимо изучить различные гибкие трубки диффузора аэрации, используемые в городских системах очистки сточных вод. Кроме того, стоимость имеющихся на рынке аэрационных трубок составляет 70-75 долларов за 1 м. Поэтому необходим поиск более дешевых материалов и технологий изготовления. Предполагается в дальнейшем изготавливать гибкие аэраторы из резиновых отходов, что позволит повысить коэффициент рециклинга и уменьшить проблему накопления отходов резины.

Для исследования было изготовлено несколько образцов гибких аэраторов длиной по 100 мм (рис. 1), имеющих множество мелких пор в стенках. Эксперименты проводились при следующих рабочих условиях: подача газа  $Q_{\Gamma} = 0,5-5 \text{ л/мин}$ , объем жидкости 10 л, высота слоя жидкости 0,25 м и температура  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . В качестве рабочей жидкости использовалась водопроводная вода.



Рисунок 1. Гибкая аэрационная трубка из резины

К главным физическим характеристикам, влияющим на гидродинамику жидкостных потоков и процессы массопереноса кислорода в аэрационных сооружениях, относятся: 1) коэффициент объемного массопереноса кислорода ( $k_{L0}$ ) и эффективность массопереноса кислорода (ЭМК); 2) эффективность аэрации (ЭА); 3) основные свойства гибкости аэрационных трубок (толщина стенки трубок, их прочность на растяжение, размер отверстия, устойчивость при относительном удлинении); 4) гидродинамические параметры пузырьков (диаметр пузырьков  $d_{п}$ ), частота образования пузырьков и скорость образования пузырьков  $U_{п}$ ); 5) оценка межфазной площади ( $S_{м}$ ) и

коэффициент объемного массопереноса жидкости ( $k_L$ ).

Коэффициент массопереноса кислорода ( $k_{L0}$ ) можно рассчитать по ф-ле (1), которую в свою очередь можно перестроить в линейную ф-лу (2):

$$\frac{C_s - C_t}{C_s - C_0} = e^{-k_{L0} \cdot t} \quad (1)$$

$$\ln(C_s - C_t) = \ln(C_s - C_0) - k_{L0} \cdot t \quad (2),$$

где  $C_s$  – растворенный кислород в жидкой фазе в равновесии (или насыщенный растворенный кислород);  $C_t$  – растворенный кислород во время аэрации;  $C_0$  – изначальный уровень растворенного кислорода;  $k_{L0}$  –

коэффициент массопереноса кислорода;  $t$  – время аэрации.

$$U_n = \frac{\Delta D}{t} \tag{7}$$

ЭМК может быть рассчитана по формуле (3):

$$\text{ЭМК} = \frac{O_2 \text{ перенесенный}}{O_2 \text{ добавленный}} = \frac{k_{L,O} \times C_s \times V}{\rho_G \times Q_G} \tag{3}$$

где  $k_{L,O}$  – коэффициент массопереноса кислорода;  $C_s$  – растворенный кислород в жидкой фазе в равновесии;  $V$  – объем аэрированной воды;  $\rho_G$  – плотность воздуха;  $Q_G$  – расход воздуха.

Энергоэффективность диффузоров можно оценить по эффективности аэрации (ЭА), которая связана с потреблением энергии  $P_G$ , как представлено в формулах (4) и (5).

$$P_G = Q_G \times \Delta P_{\text{общая}} = Q_G \times \rho_L \times g \times H_L + \Delta P \tag{4}$$

$$\text{ЭА} = \frac{k_{L,O} \times C_s \times V}{\rho_G} \tag{5}$$

где  $P_G$  – потребление энергии;  $Q_G$  – введенный показатель расхода воздуха;  $\Delta P_{\text{общая}}$  – потеря энергии через диффузор;  $\rho_L$  – плотность жидкости;  $g$  – ускорение из-за силы тяжести;  $H_L$  – высота жидкости;  $k_{L,O}$  – коэффициент массопереноса кислорода;  $C_s$  – растворенный кислород в жидкой фазе в равновесии (или насыщенный растворенный кислород);  $V$  – объем аэрированной воды;  $\rho_G$  – введенный показатель плотности воздуха.

Принимая во внимание гидродинамические параметры пузырька, а именно диаметр пузырька ( $d_n$ ) и скорость образования пузырьков ( $U_n$ ) были получены формулы (6) и (7).

$$d_n = \sqrt[3]{I_n^2 \cdot h_n} \tag{6}$$

где  $d_n$  – диаметр пузырька;  $l_n$  – длина пузырька;  $\Delta D$  – пространственное смещение пузырьков в течение фиксированного временного периода;  $h_n$  – высота пузырька;  $t$  – временной период.

Для исследования основных показателей, характеризующих гидродинамику жидкостных потоков, а именно: коэффициент массопереноса кислорода ( $k_{L,O}$ ) и эффективность массопереноса кислорода (ЭМК), были проведены испытания 20 вариантов аэрационных трубок с различными физическими свойствами. Толщина образцов колебалась от 2,5 до 3,6 мм, твердость – от 50 до 72 единиц, прочность при растяжении – от 1100 до 3200 МПа, удлинение – от 22 до 80 %. В процессе эксперимента определены зависимости от которых зависят от характеристик трубок. Результаты для некоторых трубок представлены в табл. 1.

Как видно из представленной таблицы, показатели массопереноса кислорода для различных типов трубок взаимосвязаны с их физическими свойствами. Наилучшим показателем эффективности аэрации обладает трубка № 12 со следующими физическими параметрами: толщина стенки 3,15 мм; твердость 63 единицы, предел прочности 1000 Па, удлинение 19 %.

Выявлено, что изменение различных гидродинамических показателей аэрационных систем зависит от физических свойств трубок. С увеличением толщины стенки трубки увеличивает коэффициент массопереноса кислорода  $k_{L,O}$  в среднем от  $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  до  $4,0 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  в зависимости от расхода газа. При этом расход газа изменяется в среднем от 1 до 4 л/мин.

**Таблица 1.**

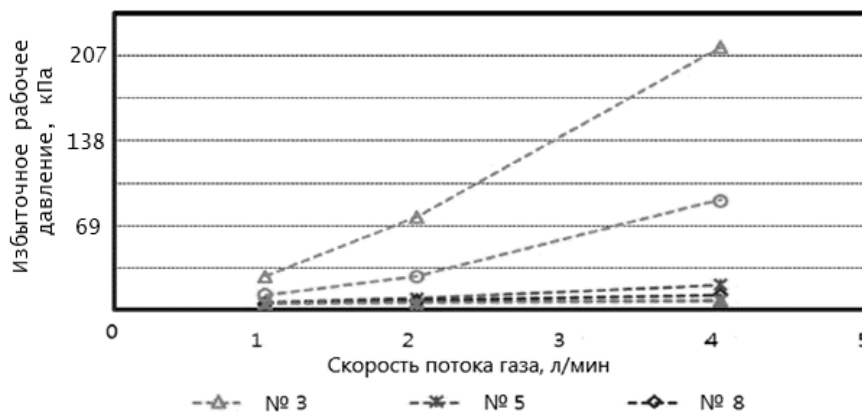
**Показатели массопереноса кислорода в зависимости от типа аэрационных трубок**

№ трубки	$k_{L,O}$ , $\times 10^{-3} \text{ л/с}$	ЭМК, %	Рабочее давление, кПа	Эффективность аэрации, мг-О <sub>2</sub> /кВт·с
1	1,2-5,4	2,1-2,4	121,68-183,74	79-287
2	1,3-3,2	1,4-2,3	107,9-110,65	402-904
3	1,1-2,7	1,2-2,0	106,52-109,27	391-989
5	1,2-3,0	1,3-2,1	108,9- 121,68	178-833
8	1,1-3,7	1,6-2,1	106,52-113,4	366-936
9	1,1-3,8	1,7-1,9	107,9-114,8	334-742
11	1,4-3,4	1,5-2,4	113,4 - 142,37	99-538
12	1,4-3,9	1,7-2,4	106,52-108,58	631-1210
13	1,2-3,6	1,6-2,2	113,4 - 190,7	49-475
16	1,3-12,2	2,2-5,4	128,6-314,9	69-226
18	1,3-3,3	1,4-2,2	106,52-109,27	480-1104

Кроме того, толщина стенки трубки напрямую связана с использованием рабочего давления ( $P$ ), потребляемой мощностью ( $P_G$ ) и, следовательно, с эффективностью аэрации.

Физические характеристики трубки необходимы для описания механизма массопереноса кислорода и для выбора подходящей трубки-диффузора для аэрации. Например, самый высокий коэффициент  $k_{L,O}$  и

самая низкая ЭА, полученные при использовании трубок с толщиной стенки и прочностью на растяжение соответственно 3,4 мм 3100 Па и 2,8 мм и 3000 Па. На рис. 2 на примере трех видов трубок, которые характеризуются средними показателями толщины стенки и прочности на растяжение, показана зависимость рабочего давления и скорости потока газа, увеличивающаяся по экспоненте.



**Рисунок 2.** Зависимость рабочего давления от скорости потока газа

Твердость трубки в различных диффузорах находится в диапазоне от 50 до 72 единиц, что влияет на гибкость структуры трубки и модификацию размера отверстий при различной скорости потока газа. Многочисленные неоднородные поры и каналы (средний диаметр около 0,19 мм) в стенках трубок служат отверстиями для образования пузырьков. Было выявлено, что размер образующихся пузырьков не зависит от расхода воздуха, однако связан с жесткостью отверстия. Следовательно, характеристики твердости трубки играют важную роль в изменении размеров пузырьков. Размеры пузырьков также связаны со статическим поверхностным натяжением. Скорость образования пузырьков варьируется в диапазоне 0,22 – 0,27 м/с и увеличивается с ростом расхода газа. Поэтому можно заключить, что гидродинамические параметры пузырьков (диаметр и скорость образования) связаны между собой. Очевидно, что нет необходимости создавать много мелких пузырьков для

увеличения объема массопереноса, так как при этом резко возрастает потребление энергии и снижается коэффициент массопереноса в жидкой фазе.

Таким образом, физические параметры (толщина стенки трубки, прочность трубки на растяжение, а также ее твердость и удлинение) следует рассматривать как ключевой фактор для управления потреблением энергии, эксплуатационными расходами, гидродинамическими параметрами пузырьков и, следовательно, эффективностью массопереноса кислорода в гибком диффузоре. Задачей будущих исследований является анализ характеристик гибких резиновых аэраторов при работе в сточных водах, а также экономические показатели производства аэрационных трубок из резиновых отходов. Кроме того, необходима разработка теоретических моделей прогнозирования параметров гидродинамики и массопереноса пузырьков в реальных условиях аэрационного резервуара.

#### Список литературы:

1. Абдукодирова М.Н. О возможностях интенсификации биологической очистки стоков в г. Ташкенте // *Universum: технические науки*. 2018. № 5 (50). С. 54-56.
2. Аэрационное оборудование. (Эл. ресурс). URL: <http://www.sbm-mega.ru/aeration-equipment>. Дата обращения 5.12.2018.
3. Мешенгиссер Ю.М. Теоретическое обоснование и разработка новых полимерных аэраторов для биологической очистки сточных вод. Дис. ... д-ра техн. наук. 05.23.04. – М.: ФГУП «НИИ ВОДГЕО», 2005. – 340 с.
4. Фомин Д.П., Заславский Ю.А. Моделирование процесса струйной аэрации жидкости // *Успехи современного естествознания*. 2004. № 4. С. 77-78
5. Low SL, Ong SL, Ng HY. Characterization of membrane fouling in submerged ceramic membrane photobioreactors fed with effluent from membrane bioreactors. *Chem. Eng. J.* 2016; 290: 91-102.
6. Narapong Hongprasith, Natchanok Dolkittikul et al. Study of different flexible aeration tube diffusers: Characterization and oxygen transfer performance. *Environmental Engineering Research* 21(3). 233-240