

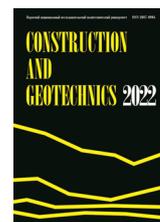


**пермский
политех**

CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 15, № 1, 2024

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2024.1.01

УДК 628.356

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАССОПЕРЕНОСА КИСЛОРОДА ПРИ АЭРАЦИИ СТОЧНЫХ ВОД

И.И. Павлов, М.Ю. Дягелев, В.Г. Исаков

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
Ижевск, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 02 сентября 2023

Одобрена: 22 января 2024

Принята к публикации:

05 февраля 2024

Ключевые слова:

сточные воды, аэротенк, система аэрации, аэратор, массоперенос кислорода, концентрация растворенного кислорода, взвешенные вещества.

АННОТАЦИЯ

На сегодняшний день в процессах биологической очистки сточных вод наиболее распространена пневматическая система аэрации, которая предполагает подачу кислородсодержащего газа (воздуха, технического кислорода) под определенным давлением по магистральным и воздухораспределительным трубопроводам к различного рода диспергаторам, установленным в соответствующих точках аэрационных сооружений для поддержания процессов жизнедеятельности активного ила и перемешивания сточных вод с активным илом. Все типы аэраторов оцениваются по такому интегральному показателю, как эффективность переноса кислорода воздуха. Данный параметр представляет собой отношение количества воздуха, израсходованного для окисления массы загрязнений, поступивших в сооружение биологической очистки, к общему расходу воздуха, подаваемого в сооружение, выраженному в процентах. В данной работе были проведены исследования эффективности массопереноса кислорода воздуха в воду в зависимости от расхода подаваемого воздуха и концентрации взвешенных веществ в воде. Воздух в разработанную экспериментальную установку нагнетался при нормальных условиях, расход регулировался игольчатым клапаном на расходомере. Изменение концентрации кислорода в воде измерялось датчиком Multi 340i. В качестве взвешенных веществ использовался очищенный и прокаленный керамзитовый песок с крупностью фракций от 1 до 2 мм. В сериях опытов с расходом воздуха 1 л/мин по времени насыщения воды кислородом воздуха в водопроводной воде и в воде с концентрацией взвешенных веществ 0,25 г/л происходит увеличение эффективности аэрации воды на 16,67 %. В сериях опытов с расходом воздуха 5 л/мин по времени насыщения воды кислородом воздуха в водопроводной воде и в воде с концентрацией взвешенных веществ 0,25; 0,75; 1,25 г/л рост эффективности аэрации составляет 25; 18,75 и 6,25 % соответственно.

© Павлов Иван Игоревич – магистрант, e-mail: pavlovistu@gmail.com.

Дягелев Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: m.yu.dyagelev@istu.ru.

Исаков Виталий Германович – доктор технических наук, профессор, e-mail: isakovvg@istu.ru.

Ivan I. Pavlov – Master's Student, e-mail: pavlovistu@gmail.com.

Mikhail Yu. Dyagelev – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: m.yu.dyagelev@istu.ru.

Vitaly G. Isakov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: isakovvg@istu.ru.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

STUDIES OF OXYGEN MASS TRANSFER EFFICIENCY DURING WASTEWATER AERATION

I.I. Pavlov, M.Yu. Dyagelev, V.G. Isakov

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 02 September 2023
Approved: 22 January 2024
Accepted for publication:
05 February 2024

Keywords:

wastewater, aerotank, aeration system, aerator, oxygen mass transfer, dissolved oxygen concentration, suspended solids.

ABSTRACT

To date, in the processes of biological wastewater treatment the most common pneumatic aeration system, which involves the supply of oxygen-containing gas (air, technical oxygen) under a certain pressure through the main and air distribution pipelines to various kinds of dispersants installed at the appropriate points of aeration facilities to support the processes of life activity of activated sludge and mixing of waste water with activated sludge. All types of aerators are evaluated by such an integral indicator as the oxygen transfer efficiency of air. This parameter is the ratio of the amount of air consumed to oxidize the mass of pollutants entering the biological treatment facility to the total air flow to the facility, expressed as a percentage. In this work, the efficiency of oxygen mass transfer of air into water depending on the flow rate of air fed and the concentration of suspended solids in the water was investigated. Air was pumped into the developed experimental setup under normal conditions, the flow rate was regulated by the needle valve on the flow meter. The change in oxygen concentration in the water was measured with a Multi 340i sensor. Purified and calcined keramzite sand with a fraction size of 1 to 2 mm was used as suspended solids. In a series of experiments with an air flow rate of 1 l/min for the time of water saturation with air oxygen in tap water and in water with a suspended solids concentration of 0.25 g/l there is an increase in water aeration efficiency by 16.67 %. In the series of experiments with the air consumption of 5 l/min for the time of water saturation with air oxygen in tap water and in water with the concentration of suspended solids of 0.25, 0.75, 1.25 g/l the aeration efficiency increases by 25, 18.75 and 6.25 % respectively.

Введение

Очистные сооружения сточных вод являются одной из отраслей промышленности с высоким энергопотреблением. Обеспечение высокого качества очистки сточных вод требует больших затрат электроэнергии. Очистные сооружения при этом решают проблему между энергосбережением, снижением потребления и повышением эффективности очистки сточных вод. Аэрационные сооружения являются основной составляющей биологической очистки, обеспечивающей подачу и распределение кислорода воздуха в аэротенке, поддержание активного ила во взвешенном состоянии и создание благоприятных гидродинамических условий работы аэротенков [1–9]. Аэрация сточных вод – это наиболее энергозатратная часть процесса очистки сточных вод, на которую приходится от 50 до 60 % энергопотребления всей установки по очистке сточных вод. Проведенный анализ исследований научных работ в данной области [10–21] показал, что независимо от страны, географического положения наибольшая доля потребляемой электроэнергии приходится на аэрацию (рис. 1).

Повышение эффективности аэрации сточных вод имеет большое значение для энергосбережения и улучшения качества очистки сточных вод за счет регулировки расхода подаваемого воздуха и, как следствие, концентрации растворенного кислорода (КРК), необходимого для роста микроорганизмов в системе. Если расход подаваемого воздуха в аэротенк снижается, реакция нитрификации в системе будет подавлена, что приведет к низкой КРК, росту нитчатых бактерий и постоянному росту ила в аэротенке. При повышенном расходе воздуха и росте КРК снижается иловый индекс за счет сильного и интенсивного перемешивания и увеличивается потребление электроэнергии [17, 20–22].

Однако в реальных условиях эксплуатации аэротенков могут возникать разовые случаи снижения эффективности аэрации сточных вод, например, поступление АПАВ, СПАВ и ПАВ (анионоактивных, синтетических и поверхностно-активных веществ) ингибирует процесс перехода кислорода из пузырьков воздуха в воду, также может происходить вынос взвешенных веществ из песколовков и первичных отстойников в аэротенки (при росте расхода поступающих стоков, аварии на этапе механической очистки, неправильной регулировке работы скребковых механизмов песколовков и первичных отстойников и т.д.) [10, 11, 23], что может также влиять на эффективность работы аэрирующих систем и ухудшить процессы массопереноса кислорода воздуха в воду.

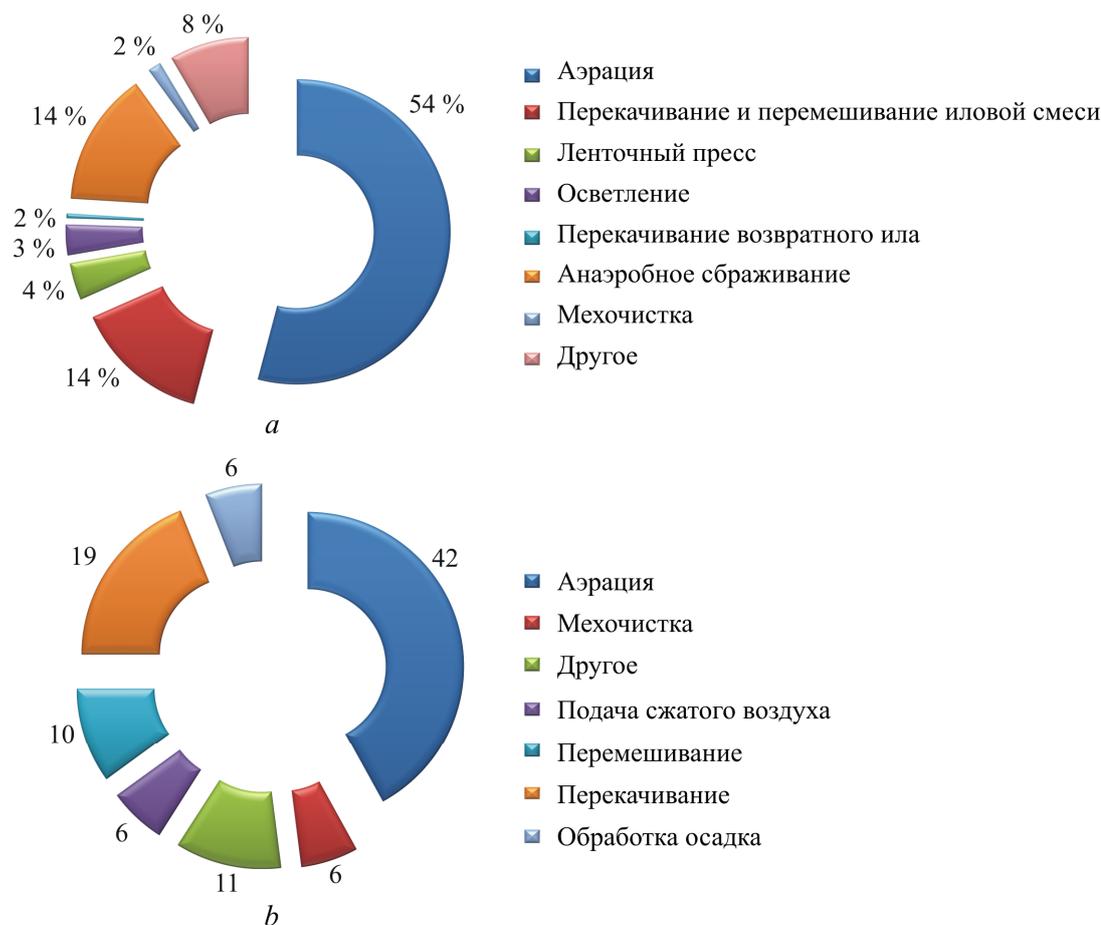


Рис. 1. Процентное распределение электропотребления на очистных сооружениях канализации: *a* – в России; *b* – США

Fig. 1. Percentage distribution of electricity consumption at sewage treatment plants: *a* – in Russia; *b* – the United States

Целью данной работы является экспериментальное определение изменения эффективности массопереноса кислорода воздуха в воду при добавлении взвешенных веществ.

Основная часть

Для определения зависимости эффективности работы аэрационных систем от содержания взвешенных веществ была составлена схема и разработана экспериментальная установка, представленная на рис. 2.

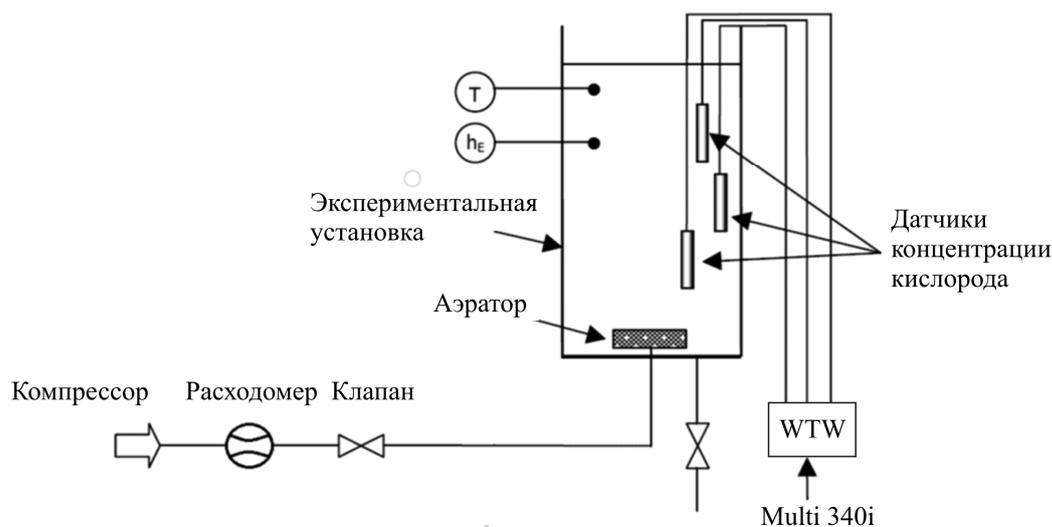


Рис. 2. Схема экспериментальной установки
Fig. 2. Schematic of the experimental setup

Экспериментальная установка состояла из круглой трубы ПВХ (поливинилхлорид) с внешним диаметром 110, толщиной стенки 2,2 и высотой 1500 мм. Подача воздуха осуществлялась компрессором TORNADO 580 с постоянным расходом воздуха 35 л/мин на мелкопузырчатый мембранный аэратор. Аэратор диаметром 50 мм был установлен в основании трубы и закреплен хомутами к основанию, дисперсность пузырьков воздуха на аэраторе составляла $0,35 \pm 0,15$ мм. Для регулировки расхода подаваемого воздуха к напорному воздуховоду через штуцер был присоединен расходомер с возможностью регулирования подачи воздуха от нуля до 5 л/мин.

Перед началом каждой серии опытов проводился пробный запуск системы с установкой постоянных значений расхода воздуха на расходомере, после чего перекрывался вентиль, расположенный между расходомером и аэратором, для создания положительного давления в подводящем воздуховоде и исключения возможности поступления воды из вертикальной части установки в воздуховод.

Для изменения концентрации растворенного кислорода в воде использовались датчики кислорода мультипараметрового анализатора Multi 340i. В качестве взвешенных веществ использовался очищенный и прокаленный керамзитовый песок с крупностью фракций от 0,01 до 0,1 мм.

Для определения эффективности работы аэратора в чистой воде в экспериментальную установку добавлялась водопроводная вода объемом 40 л и проводилась реагентная деаэрация с помощью сульфита натрия Na_2SO_3 . При достижении значения концентрации кислорода в воде ближе к нулю включался компрессор и измерялось время, за которое в воде достигалась начальная концентрация кислорода. Опыты повторялись при разных расходах воздуха.

Для оценки влияния взвешенных веществ на эффективности массопереноса кислорода воздуха в воду в экспериментальной установке в водопроводную воду дополнительно добавлялся керамзитовый песок (при сохранении остальных параметров опыта) навесками 10, 20, 30, 40 и 50 г, при этом была достигнута концентрация песка в воде 0,25; 0,5; 0,75; 1 и 1,25 г/л.

В ходе первой серии опытов были получены данные, отражающие зависимость содержания кислорода в воде от времени. Результаты измерений представлены в табл. 1 и на рис. 3.

Таблица 1

Динамика изменения концентрации кислорода в чистой воде при разных значениях расхода воздуха

Table 1

Dynamics of changes in oxygen concentration in pure water at different values of air consumption

Время, с	Содержание кислорода в чистой воде, мг/л				
	расход воздуха				
	1 л/мин	2 л/мин	3 л/мин	4 л/мин	5 л/мин
0	0,01	0,01	0,02	0,01	0,05
30	0,1	0,15	0,41	0,72	0,95
60	0,3	0,4	1,1	1,12	1,5
90	0,8	1,02	1,51	1,7	2,2
120	1,01	1,3	1,8	2,1	2,4
150	1,45	1,8	2,07	2,5	3,12
180	2,09	2,3	2,4	3,2	3,72
210	2,67	3	3,51	4,01	4,22
240	3,2	3,51	4,15	4,5	4,51
270	4,02	4,3	4,7	5,2	5,8
300	4,33	4,8	5,3	5,8	6,1
330	5,1	5,3	5,69	5,77	6,21
360	5,36	5,75	6,01	6,01	6,44
390	5,72	5,98	6,23	6,33	6,5
420	5,99	6,48	6,48	6,49	6,69
450	6,3	6,51	6,61	6,58	6,77
480	6,48	6,5	6,78	6,88	7,01
510	6,77	6,87	7	6,99	7,03
540	6,87	7,02	7,02	7,02	7
570	7	7	7,01	7	7
600	7,01	7,01	7,01	7,01	7

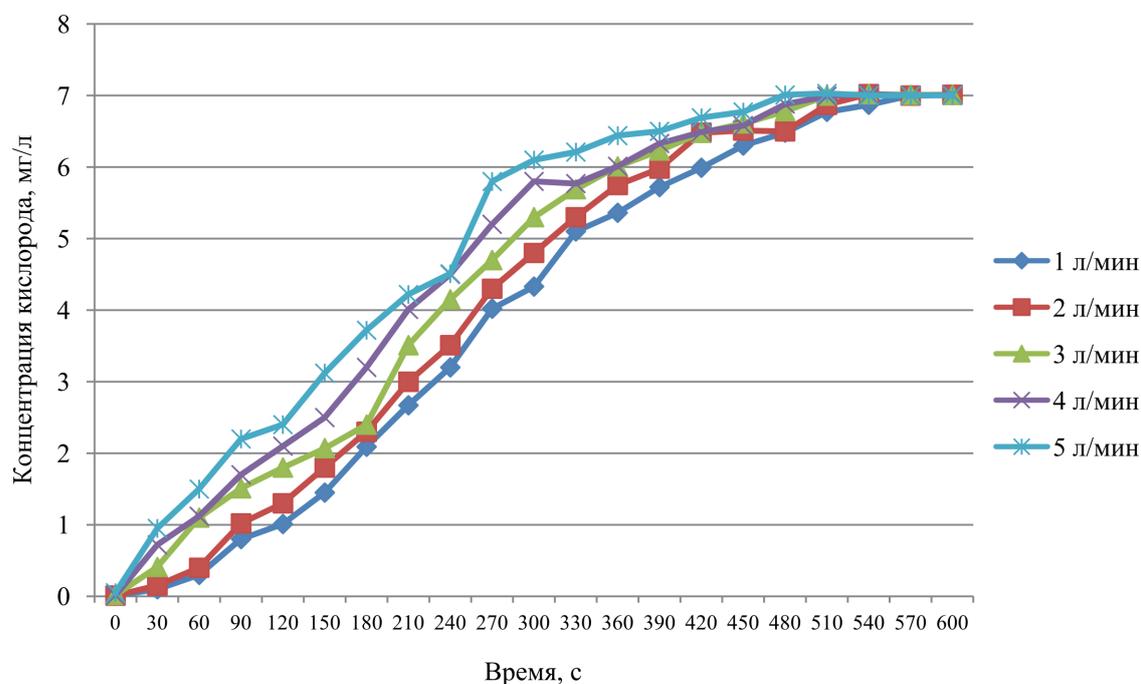


Рис. 3. Динамика изменения концентрации кислорода в чистой воде при разных значениях расхода воздуха

Fig. 3. Dynamics of changes in oxygen concentration in pure water at different values of air consumption

Анализ полученных данных показывает достаточно тривиальный результат – при увеличении расхода воздуха, пропускаемого с помощью аэратора через объем чистой воды, скорость насыщения кислородом воды увеличивается. Если сравнивать опытные данные с расходом воздуха 1 л/мин и 5 л/мин, то в последнем случае предельное значение концентрации кислорода в воде достигается уже через 480 с, а при расходе воздуха 1 л/мин предельное значение было достигнуто на 570 с.

При добавлении навески керамзитового песка в данный объем воды полученные результаты изменения концентрации кислорода в воде начинают отличаться (табл. 2 и рис. 4). При проведении данной серии опытов расход воздуха был постоянен – 1 л/мин.

Полученные данные показывают, что при минимальной концентрации песка – 0,25 г/л – и расходе поступающего воздуха 1 л/мин насыщение воды кислородом наступает значительно быстрее. Уже на 420 с было достигнуто плато концентрации кислорода в воде. При росте концентрации песка скорость насыщения воды кислородом снижалось. Так, при концентрации песка 1,25 г/л плато насыщения достигалось лишь на 570 с.

Для оценки влияния концентрации песка в воде на скорость насыщения воды кислородом был увеличен расход воздуха до 5 л/мин. Полученные результаты представлены ниже в табл. 3 и на рис. 5.

Таблица 2

Динамика изменения концентрации кислорода в воде при разных значениях
 концентрации взвешенных вещества

Table 2

Dynamics of changes in oxygen concentration in water at different values of suspended
 solids concentration

Время, с	Содержание кислорода в чистой воде, мг/л				
	концентрация взвешенных веществ				
	0,25 г/л	0,5 г/л	0,75 г/л	1 г/л	1,25 г/л
0	0,01	0,02	0,03	0,01	0,03
30	1,3	0,99	0,62	0,35	0,22
60	1,3	1,51	1,23	0,62	0,45
90	2,41	1,9	1,71	1,34	1,14
120	2,66	2,42	1,9	1,62	1,14
150	2,78	2,77	2,18	1,88	1,75
180	3,72	3,44	2,61	2,52	2,35
210	4,99	4,51	3,72	3,12	2,98
240	5,69	4,9	4,45	3,78	3,12
270	6,21	5,58	5,01	4,39	4,02
300	6,33	5,91	5,56	4,92	4,69
330	6,42	5,81	5,76	5,42	5,21
360	6,72	6,21	6,12	5,78	5,48
390	6,72	6,42	6,33	6,12	5,88
420	6,98	6,66	6,51	6,34	6,02
450	6,99	6,78	6,72	6,59	6,4
480	7,01	6,91	6,86	6,69	6,59
510	7	7,01	7	6,99	6,84
540	7,03	7,02	7,02	7,02	6,92
570	7	7	7,01	7	7
600	7	7,01	7,01	7,01	7,01

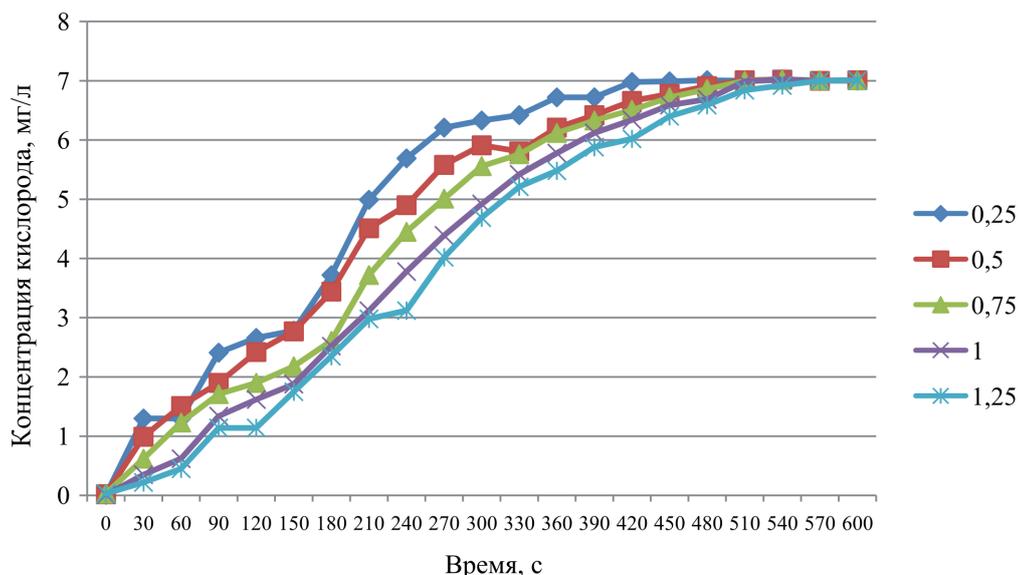


Рис. 4. Динамика изменения концентрации кислорода в воде при разном содержании взвешенных веществ

Fig. 4. Dynamics of changes in oxygen concentration in water at different contents of suspended solids

Таблица 3

Динамика изменения концентрации кислорода в воде при расходе воздуха 5 л/мин и разных значениях концентрации взвешенных вещества

Table 3

Dynamics of changes in oxygen concentration in water at an air flow rate of 5 l/min and different values of suspended solids concentration

Время, с	Содержание кислорода в чистой воде, мг/л				
	концентрация взвешенных веществ				
	0,25 г/л	0,5 г/л	0,75 г/л	1 г/л	1,25 г/л
0	0,01	0,02	0,03	0,01	0,03
30	1,75	1,29	0,92	0,62	0,55
60	2,15	2,01	1,52	1,01	0,92
90	2,48	2,23	2,05	1,72	1,52
120	2,98	2,78	2,62	1,87	1,72
150	3,62	3,22	2,77	2,2	2,12
180	4,22	3,99	3,01	2,99	2,75
210	5,42	4,74	4,15	3,45	3,33
240	5,99	5,33	4,88	4,22	3,78
270	6,62	6,01	5,62	4,72	4,52
300	6,72	6,52	6,45	5,32	5,25
330	6,87	6,62	6,57	5,87	5,78
360	7,01	6,98	6,75	6,58	5,99
390	6,99	6,99	6,98	6,65	6,65
420	6,99	7	6,99	6,87	6,78
450	7	6,98	7,01	7,01	6,99
480	7,02	6,98	7	7	7,01
510	7,01	7,01	7,01	6,99	7,02
540	7,01	7,02	7,01	7	7,01
570	7,01	7	7,01	7	7
600	7	7,01	7,01	7,01	7,01

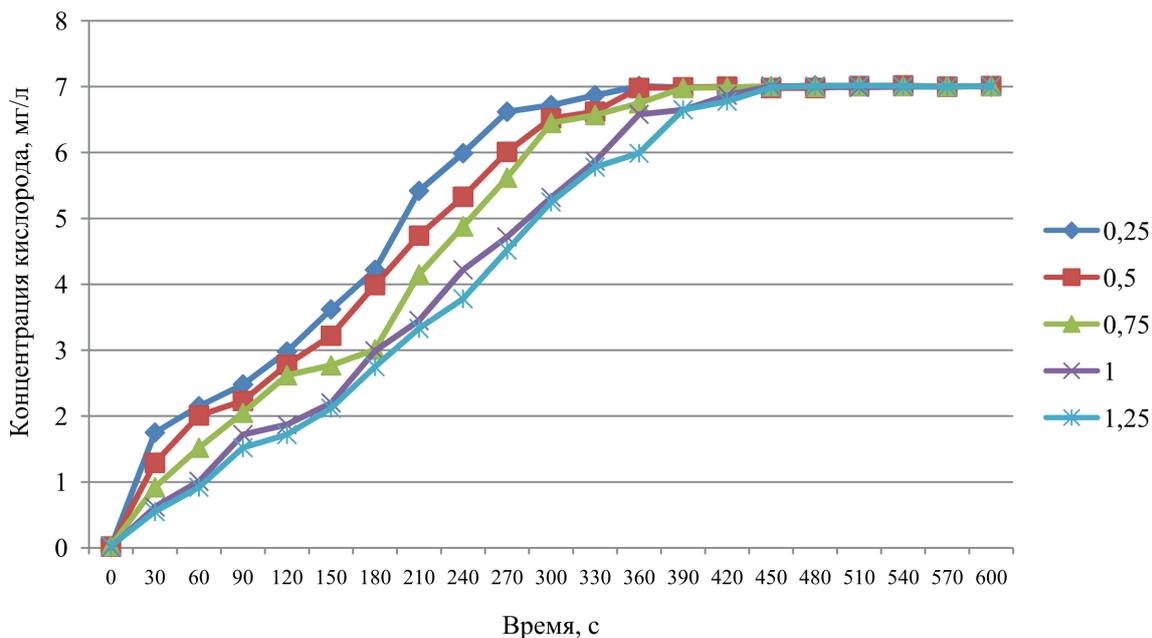


Рис. 5. Динамика изменения концентрации кислорода в воде при расходе воздуха 5 л/мин и разном содержании взвешенных веществ

Fig. 5. Dynamics of changes in oxygen concentration in water at an air flow rate of 5 l/min and different suspended solids content

Увеличение расхода воздуха показало, что при малой концентрации взвешенных веществ в виде песка 0,25 насыщение воды кислородом наступает раньше по сравнению с другими сериями, где концентрация песка была выше. Так, при концентрации песка 0,25 г/л и расходе воздуха 5 л/мин концентрация кислорода в воде была достигнута уже на 360 с, схожие результаты были получены при концентрации песка 0,5 г/л, а при концентрации песка 0,75 г/л исходные значения концентрации были получены на 390 с, с концентрацией песка 1 и 1,25 г/л на 450 с.

Заключение

Полученные результаты исследований эффективности массопереноса кислорода в воду в зависимости от расхода воздуха и концентрации взвешенных веществ дали разноплановые значения. Если в чистой воде, без добавления керамзитового песка, скорость насыщения воды кислородом зависела от расхода подаваемого в экспериментальную установку воздуха, то при добавлении керамзитового песка получилась следующая зависимость – скорость насыщения была больше при меньших концентрациях керамзитового песка в воде.

При проведении серии опытов с добавлением керамзитового песка была выявлена следующая особенность – рост насыщения воды кислородом был выше, чем в опытах с водопроводной водой. Так, в сериях опытов с расходом воздуха 1 л/мин максимальное значение концентрации кислорода в воде было достигнуто в водопроводной воде на 540 с, а при добавлении керамзитового песка концентрацией 0,25 г/л уже на 450 с было достигнуто максимальное значение концентрации кислорода в воде при аналогичном расходе воздуха в аэрационной системе. Таким образом, с точки зрения времени насыщения воды кислородом происходит увеличение эффективности аэрации воды на 16,67 %, если в воде присутствуют взвешенные вещества концентрацией 0,25 г/л.

Увеличение расхода воздуха до 5 л/мин также привело к росту эффективности массопереноса кислорода воздуха в воду при минимальных концентрациях взвешенных веществ. Сравнивая время насыщения воды кислородом до максимальных значений в водопроводной воде – 480 с с результатами опытов с присутствием в воде керамзитового песка – 360 с (при концентрации взвешенных веществ 0,25 и 0,5 г/л), 390 с (0,75 г/л), 450 с (1 и 1,25 г/л), выявили, что рост эффективности составляет 25; 18,75 и 6,25 % соответственно.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Янцен, О.В. Обзор современных методов снижения энергопотребления на канализационных очистных сооружениях / О.В. Янцен, П.И. Еремеев // *Естественные и технические науки*. – 2015. – № 11 (89). – С. 594–596.
2. Oxygen transfer dynamics and activated sludge floc structure under different sludge retention times at low dissolved oxygen concentrations / Н. Fan, X. Liu, Н. Wang, Y. Han, L. Qi, Н. Wang // *Chemosphere*. – 2017. – Vol. 169. – P. 586–595. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.10.137
3. Дягелев, М.Ю. Повышение эффективности биологической очистки промышленных стоков в составе городских сточных вод / М.Ю. Дягелев // *Теоретическая и прикладная экология*. – 2023. – № 2. – С. 96–103. DOI: 10.25750/1995-4301-2023-2-096-103
4. Владимирова, В.С. Совершенствование биологических очистных сооружений города Красновишерска / В.С. Владимирова // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. – 2015. – № 1. – С. 185–197. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.1.13
5. Ozturk, M.C. Optimization of aeration profiles in the activated sludge process / M.C. Ozturk, F.M. Serrat, F. Teymour // *Chemical Engineering Science*. – 2016. – Vol. 139. – P. 1–14. DOI: 10.1016/j.ces.2015.09.007
6. Зверева, С.М. Развитие технологии очистки сточных вод малых населенных пунктов / С.М. Зверева, Л.В. Бартова // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. – 2017. – Т. 8, № 2. – С. 64–74. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.2.06
7. Wastewater treatment aeration process optimization: A data mining approach / A. Asadi, A. Verma, K. Yang, B. Mejabi // *Journal of Environmental Management*. – 2017. – Vol. 203, iss. 2. – P. 630–639. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.07.047
8. The review of aeration systems for biological wastewater treatment / M.Yu. Dyagelev, I.I. Pavlov, A.M. Nepogodin, E.V. Grakhova, A.A. Lapina // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – Vol. 839. – P. 42035. DOI: 10.1088/1755-1315/839/4/042035
9. Бартова, Л.В. Определение продолжительности обработки сточных вод в аэротенках по различным методикам / Л.В. Бартова, М.А. Авдеева, Я.С. Луферчик // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. – 2018. – Т. 9, № 3. – С. 99–107. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.10
10. Rosso, D. Surfactant effects on a-factors in aeration systems / D. Rosso, M. Stenstrom // *Water Research*. – 2006. – Vol. 40. – P. 1397–1404. DOI: 10.1016/j.watres.2006.01.044

11. Dyagelev, M.Yu. α -factor experimental determination of aeration system in aeration tanks / M.Yu. Dyagelev, V.G. Isakov, E.V. Grakhova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 687. – P. 066071. DOI: 10.1088/1757-899X/687/6/066071
12. Environmental and economic life cycle assessment for sewage sludge treatment processes in Japan / J. Hong, J. Hong, M. Otaki, O. Jolliet // Waste Management. – 2009. – Vol. 29, iss. 2. – P. 696–703. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.03.026
13. Khatri, N. Enhanced Energy Saving in Wastewater Treatment Plant using Dissolved Oxygen Control and Hydrocyclone / N. Khatri, K.K. Khatri, A. Sharma // Environmental Technology & Innovation. – 2020. – Vol. 18. – P. 100678. DOI: 10.1016/j.eti.2020.100678
14. Моделирование оптимального распределения воздуха в коридорном аэротенке / Н.С. Попов, В.А. Лузгачев, О.В. Пещерова, М.Т. Чан // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2016. – № 1 (59). – С. 19–28. DOI: 10.17277/voprosy.2016.01.pp.019-028
15. Carbon neutral and techno-economic analysis for sewage treatment plants / Q. Zhang, Y. Yang, X. Zhang, F. Liu, G. Wang // Environmental Technology & Innovation. – 2022. – Vol. 26. – P. 102302. DOI: 10.1016/j.eti.2022.102302
16. Comparative analysis of energy intensity and carbon emissions in wastewater treatment in USA, Germany, China and South Africa / H. Wang, Y. Yang, A.A. Keller, X. Li, S. Feng, Y.-N. Dong, F. Li // Applied Energy. – 2016. – Vol. 184. – P. 873–881. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.07.061
17. Березин, С.Е. Регулирование подачи воздуха при очистке сточных вод / С.Е. Березин, Б.В. Овсейчук, А.В. Устюжанин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2014. – № 12. – С. 41–47.
18. Nowak, O. Ways to optimize the energy balance of municipal wastewater systems: lessons learned from Austrian applications / O. Nowak, P. Enderle, P. Varbanov // Journal of Cleaner Production. – 2015. – Vol. 88. – P. 125–131. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.08.068
19. Żyłka, R. Structure and indicators of electric energy consumption in dairy wastewater treatment plant / R. Żyłka, B. Karolinczak, W. Dąbrowski // Science of The Total Environment. – 2021. – Vol. 782. – P. 146599. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146599
20. Энергоэффективный принцип реконструкции воздухоподводящей станции городских очистных канализационных сооружений Самары / Д.С. Ракицкий, Ю.А. Егорова, Д.И. Левин, С.А. Гордеев, С.Л. Нагорный, В.И. Баженов, В.И. Петров, А.В. Устюжанин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2016. – № 8. – С. 52–62.
21. Харьковина, О.В. Эффективная эксплуатация и расчет сооружений биологической очистки сточных вод / О.В. Харьковина. – Волгоград: Панорама, 2015. – 433 с.
22. Smart energy savings for aeration control in wastewater treatment / Y. Chen, H. Zhang, Y. Yin, F. Zeng, Z. Cui // Energy Reports. – 2022. – Vol. 8. – P. 1711–1721. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.02.038
23. Dyagelev, M.Y. Determination of the flotation effectiveness of industrial waste water in a laboratory / M.Y. Dyagelev, A.M. Nepogodin, E.V. Grakhova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 962. – P. 042077. DOI: 10.1088/1757-899X/962/4/042077

References

1. Yantsen O.V., Ereemeev P.I. Obzor sovremennykh metodov snizheniia energopotrebleniia na kanalizatsionnykh ochistnykh sooruzheniakh [Review of modern methods of reducing energy consumption at sewage treatment facilities]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2015, no. 11 (89), pp. 594-596.

2. Fan H., Liu X., Wang H., Han Y., Qi L., Wang H. Oxygen transfer dynamics and activated sludge floc structure under different sludge retention times at low dissolved oxygen concentrations. *Chemosphere*, 2017, no. 169, pp. 586-595. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.10.137.
3. Dyagelev M.Yu. Povyshenie effektivnosti biologicheskoi ochistki promyshlennykh stokov v sostave gorodskikh stochnykh vod [Improving the efficiency of biological treatment of industrial effluents in urban wastewater]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2023, no. 2, pp. 96–103. DOI: 10.25750/1995-4301-2023-2-096-103.
4. Vladimirova V.S. Sovershenstvovanie biologicheskikh ochistnykh sooruzhenii goroda Krasnovisherska [Improvement of biological treatment facilities of the city of Krasnovishersk]. *Vestnik Permskogo natsional'no issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2015, no. 1, pp. 185–197. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.1.13.
5. Ozturk M.C., Serrat F.M., Teymour F. Optimization of aeration profiles in the activated sludge process. *Chemical Engineering Science*, 2016, no. 139, pp. 1-14. DOI: 10.1016/j.ces.2015.09.007.
6. Zvereva S.M., Bartova L.V. Razvitie tekhnologii ochistki stochnykh vod malykh naselennykh punktov [Development of wastewater treatment technology in small settlements]. *Vestnik Permskogo natsional'no issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2017, vol. 8, no. 2, pp. 64–74. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.2.06.
7. Asadi A., Verma A., Yang K., Mejabi B. Wastewater treatment aeration process optimization: A data mining approach. *Journal of Environmental Management*, 2017, no. 203, part 2, pp. 630-639. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.07.047.8.
8. Dyagelev M.Yu., Isakov V.G., Grakhova E.V. α -factor experimental determination of aeration system in aeration tanks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, no. 687, pp. 066071. DOI: 10.1088/1757-899X/687/6/066071.
9. Bartova L.V., Avdeeva M.A., Luferschik Y.S. Opredelenie prodolzhitel'nosti obrabotki stochnykh vod v aerotenkakh po razlichnym metodikam [Determination of wastewater treatment duration in aeration tanks by different methods]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2018, vol. 9, no 3, pp. 99–107. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.10
10. Rosso D., Stenstrom M. Surfactant effects on α -factors in aeration systems. *Water Research*, 2006, no. 40, pp. 1397–1404. DOI: 10.1016/j.watres.2006.01.044.
11. Dyagelev M.Yu., Isakov V.G., Grakhova E.V. α -factor experimental determination of aeration system in aeration tanks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, no. 687, pp. 066071. DOI: 10.1088/1757-899X/687/6/066071.
12. Hong J., Hong J., Otaki M., Jolliet O. Environmental and economic life cycle assessment for sewage sludge treatment processes in Japan. *Waste Management*, 2009, no. 29, iss. 2, pp. 696-703. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.03.026.
13. Khatri N., Khatri K.K., Sharma A. Enhanced Energy Saving in Wastewater Treatment Plant using Dissolved Oxygen Control and Hydrocyclone. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, no. 18, pp. 100678. DOI: 10.1016/j.eti.2020.100678.
14. Popov N.S., Luzgachev V.A., Pescherova O.V., Chan M.T. Modelirovanie optimal'nogo raspredeleniia vozdukh v koridornom aerotanke [Modeling of optimal air distribution in corridor aeration tank]. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernad'skogo*, 2016, no. 1 (59), pp. 19-28. DOI: 10.17277/voprosy.2016.01.pp.019-028.
15. Zhang Q., Yang Y., Zhang X., Liu F., Wang G. Carbon neutral and techno-economic analysis for sewage treatment plants. *Environmental Technology & Innovation*, 2022, no. 26, pp. 102302. DOI: 10.1016/j.eti.2022.102302.

16. Wang H., Yang Y., Keller A.A., Li X., Feng S., Dong Y.-N., Li F. Comparative analysis of energy intensity and carbon emissions in wastewater treatment in USA, Germany, China and South Africa. *Applied Energy*, 2016, no. 184, pp. 873-881. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.07.061.
17. Berezin S.E., Ovseichuk B.V., Ustyuzhanin A.V. Regulirovanie podachi vozdukha pri oчитstke stochnykh vod [Regulation of air supply during wastewater treatment]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaia tekhnika*, 2014, no. 12, pp. 41-47.
18. Nowak O., Enderle P., Varbanov P. Ways to optimize the energy balance of municipal wastewater systems: lessons learned from Austrian applications. *Journal of Cleaner Production*, 2015, no. 88, pp. 125-131. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.08.068.
19. Żyłka R., Karolinczak B., Dąbrowski W. Structure and indicators of electric energy consumption in dairy wastewater treatment plant. *Science of The Total Environment*, 2021, no. 782, pp. 146599. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146599.
20. Rakitskiy D.S., Egorova Yu.A., Levin D.I., Gordeev S.A., Nagorny S.L., Bazhenov V.I., Petrov V.I., Ustyuzhanin A.V. Energoeffektivnyi printsip rekonstruktsii vozdukhoduvnoi stantsii gorodskikh oчитstnykh kanalizatsionnykh sooruzhenii Samary [Energy-efficient principle of reconstruction of the blower station of Samara city sewage treatment facilities]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaia tekhnika*, 2016, no. 8, pp. 52-62.
21. Kharkina O.V. Effektivnaia ekspluatatsiia i raschet sooruzhenii biologicheskoi oчитstki stochnykh vod [Effective operation and calculation of biological wastewater treatment facilities]. Volgograd, Panorama, 2015. – 433 p.
22. Chen Y., Zhang H., Yin Y., Zeng F., Cui Z. Smart energy savings for aeration control in wastewater treatment. *Energy Reports*, 2022, no. 8, pp. 1711-1721. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.02.038.
23. Dyagelev M.Y., Nepogodin A.M., Grakhova E.V. Determination of the flotation effectiveness of industrial waste water in a laboratory. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, no. 962, pp. 042077. DOI: 10.1088/1757-899X/962/4/042077.