

ИССЛЕДОВАНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОГО  
АЭРАТОРАТолстой<sup>1</sup> М.Ю., Туник<sup>2</sup> А.А.Иркутский Национальный Исследовательский Технический Университет,  
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
e-mail: <sup>1</sup>tolstoi@istu.edu; <sup>2</sup>alexun@mail.ru.

**Аннотация.** Пневмогидравлическое аэрирование обычно осуществляется путем совместной подачи жидкой и газовой фаз под избыточным давлением в различные устройства, близкие по своим конструкциям к эжекторам и топливным форсункам. Механизм образования пузырьков при пневмогидравлическом аэрировании до сих пор не совсем ясен и поэтому не имеет какой-либо общей теории. Такими устройствами, кроме эжекторов, являются пневматические и гидравлические форсунки. Высокая окислительная способность в сочетании с низкой степенью засоряемости и возможностью регулирования гидродинамики в сооружении делают пневмогидравлические аэраторы (ПГА) перспективными аэрирующими устройствами для процессов биологической очистки сточных вод, благодаря простоте его осуществления, достигаемому качеству аэрации и отсутствию избыточных затрат энергии для его реализации. Это свидетельствует о том, что разработанный ПГА является эффективным и конкурентоспособным и имеет оптимальные размеры для применения в разработанной и исследуемой модели многофункциональной автономной энергоустановке.

**Предмет исследования.** Окислительная способность пневмогидравлического аэратора, разработанного в Иркутском национальном исследовательском техническом университете и имеющего размеры, оптимальные для исследуемой многофункциональной автономной энергоустановки.

**Материалы и методы.** Эксперименты проводились при помощи сконструированного испытательного стенда, в котором проводилось насыщение чистой воды кислородом. Для стенда была специально разработана методика проведения эксперимента.

**Результаты:** Показано, что оптимальная концентрация кислорода 9,58 мг/дм<sup>3</sup> для процесса окисления органических веществ на модельной среде достигается при расстоянии 0,1 м от сопла аэратора температуре среды 16 °С, при этом перемешивающая способность вращающегося ПГА позволяет поддерживать во взвешенном состоянии микроорганизмы активного ила. При данных характеристиках аэратор имеет оптимальные габариты для применения в многофункциональной автономной энергоустановке.

**Выводы:** Имея разработанный аэратор, можно с уверенностью сказать, что он позволяет без применения дополнительных энергоёмких установок насыщать жидкость кислородом воздуха с одновременным её перемешиванием, благодаря чему растворённый кислород более эффективно распространяется по всему объёму и поддерживает микроорганизмы во взвешенном состоянии. Это позволяет считать его более эффективным и конкурентоспособным среди прочих устройств для аэрации жидкости и рекомендовать его для внедрения на канализационных очистных станциях и в сооружениях биологической очистки сточных вод. Важным моментом является то, что его габаритные параметры оптимальны для применения в автономных установках для очистки и утилизации сточных вод, а также в многофункциональной автономной энергоустановке.

**Ключевые слова:** Очистка сточных вод, пневмогидравлическая аэрация, *clostridium acetobutylicum* VKPM-B-4786, клостридии, растворимость кислорода, активный ил, многофункциональная автономная энергоустановка.

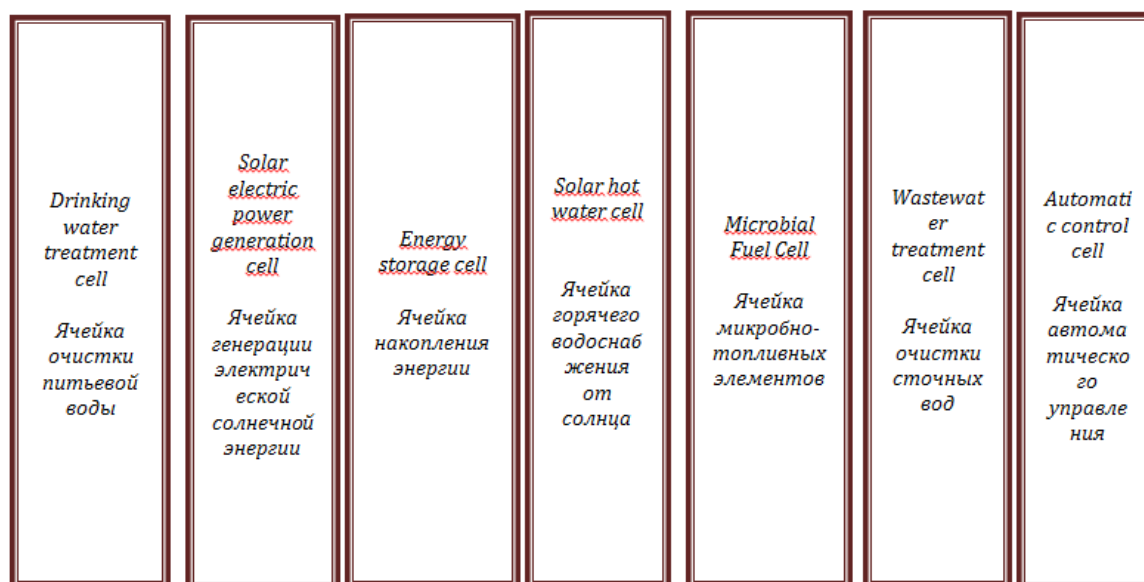
## ВВЕДЕНИЕ

Многофункциональная автономная энергоустановка, разработанная в Иркутском национальном исследовательском техническом университете, позволяет обеспечить горячее водоснабжение, электроснабжение и очистку сточных вод отдельных домов, жилых посёлков и туристических комплексов, расположенных, в том числе в водоохраных зонах, рекреационных и особо охраняемых природных территориях [1-2]. Применение возобновляемых источников энергии позволит получить экологически чистую генерацию тепловой и электрической энергии, а также обеспечить очистку сточных вод, в рамках требований к природоохраным зонам [3, 4].

Энергоустановка может составлять из себя комбинацию различного оборудования, которая

зависит от требований конечного потребителя, от природных условий зоны расположения объекта, от экологических и санитарных требований, применяемых к объектам, а также от доступных источников энергии. Она может включать в себя солнечные коллекторы и панели, ветрогенераторы, тепловой насос, микробно-топливные элементы, очистную и водоподготовительную установки, и даже дизельный или бензиновый генератор в случае, когда возобновляемые источники энергии не смогут справиться с нагрузкой. Один из вариантов многофункциональной автономной энергоустановки представлен на рис. 1.

В установке имеется современная система автоматизации, позволяющая обеспечить эффективное взаимодействие всех инженерных систем, из которых состоит установка, а также полноценный мониторинг и диспетчеризацию.



**Рис. 1.** Многофункциональная автономная энергоустановка, состоящая из 7 ячеек  
**Fig. 1.** Multifunctional independent power station consisting of 7 cells

Все элементы многофункциональной энергоустановки взаимодействуют между собой. Так, например, ячейки, генерирующие электрическую энергию, помимо потребителя, снабжают электроэнергией собственные элементы, такие как насосы, компрессоры, а также системы автоматизации и управления.

Рассмотрим ячейку системы жизнеобеспечения для очистки сточных вод.

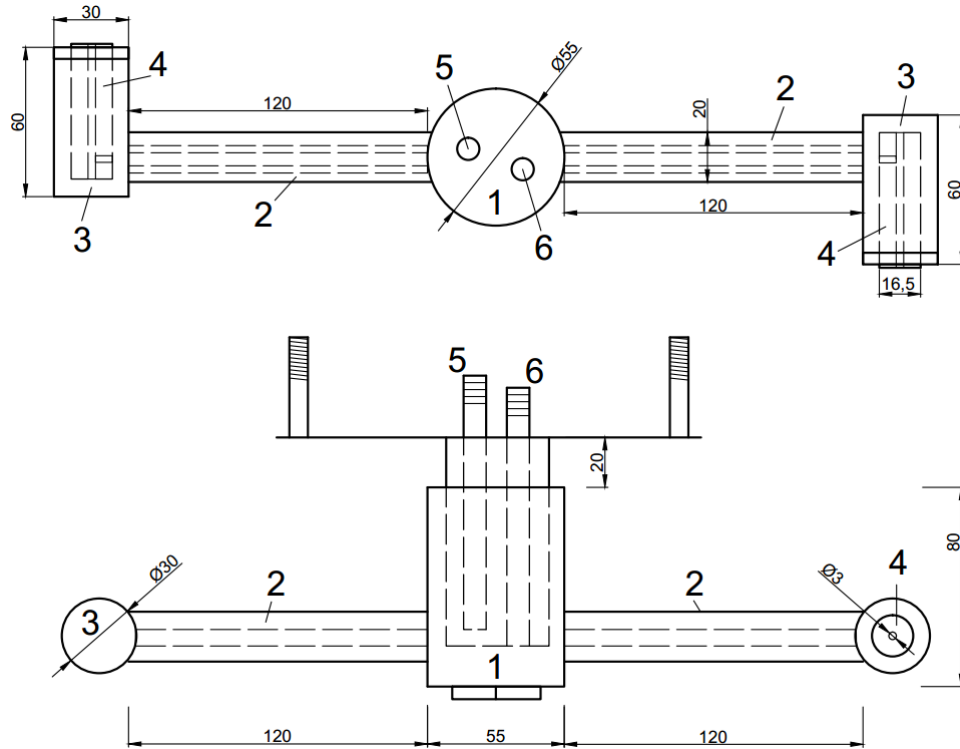
Ячейка очистки сточных вод данной установки (рис. 1) работает за счёт использования микроорганизмов, перерабатывающих органические загрязнители воды. Для поддержания жизнедеятельности микроорганизмов используется вращающийся пневмогидравлический аэратор (рис. 2), который равномерно распределяет кислород в среде их обитания, при этом за счёт своей конструкции данный аэратор вращается только под действием выпускаемой им пневматической струи большого давления, не затрачивая при этом электроэнергию («Струйная аэрация» под редакцией Ю.В. Воронова. [5]). Соединение подводящих патрубков жидкости и газа с корпусом производится посредством подшипника скольжения. Для предотвращения смешивания газа с жидкостью в корпусе аэратора применяются сальники. Струю воздуха большого давления при этом создают компрессоры, также являющиеся частью установки, в свою очередь получающие электроэнергию от аккумуляторных батарей через электропровода.

Очистная установка также служит источником осадка, необходимого для функционирования микробно-топливных элементов [6-10] со штаммом *Clostridium acetobutylicum* VKPM-B-4786. Представленные ранее исследования [11-13] показали, что наиболее эффективной питательной

средой для данного элемента является именно жидкая среда для Клостридий [14-15]. В связи с этим исследования, приведённые ниже, направлены на решение нескольких задач: обеспечение эффективного процесса сточных вод, получение необходимого осадка и определение наиболее оптимального размера ячейки очистки сточных вод.

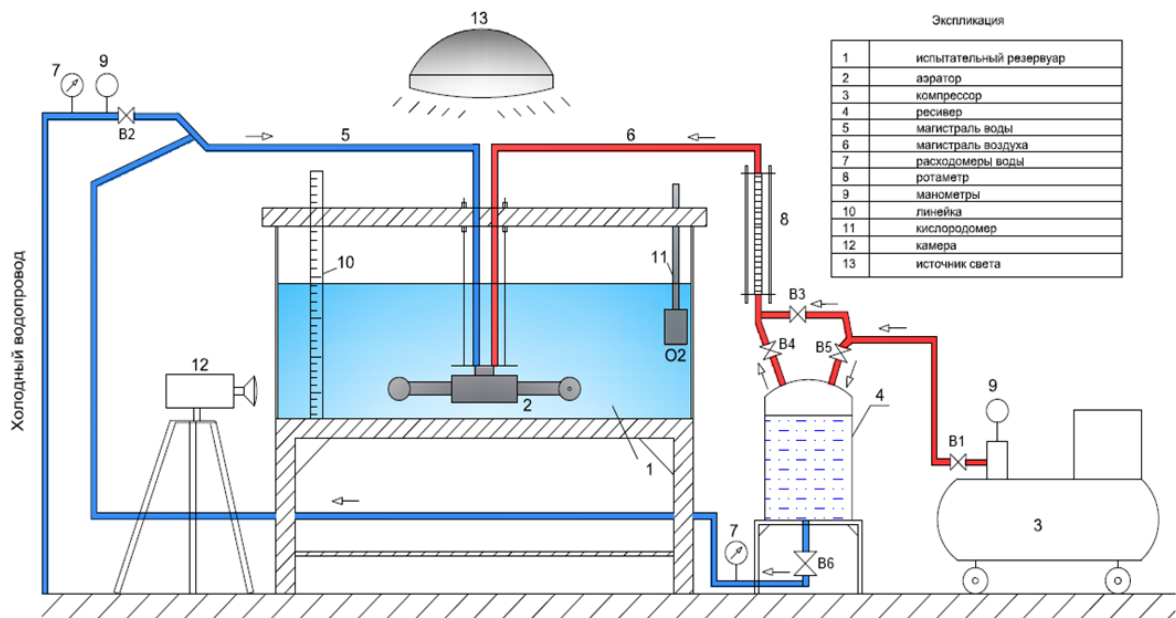
Выбор оптимальных размеров ячеек является одним из важнейших вопросов при разработке многофункциональной энергоустановки, учитывая ограниченность размеров самого энергоконтейнера. В связи с этим габариты самого пневмогидравлического аэратора также имеют большое значение. В Иркутском национальном исследовательском техническом университете было разработано несколько аэраторов разных размеров. Однако предварительные расчёты показали, что только один из вариантов имеет оптимальные размеры, при этом его окислительная способность достаточна для выживания Клостридий. Следующим шагом было экспериментальное подтверждение расчётных значений окислительной способности аэратора на экспериментальном стенде.

Стенд для испытания пневмогидравлического аэратора (рис. 3) состоит из следующего оборудования: испытательный резервуар (1) из двойного стекла; аэратор (2) погруженный в резервуар, закрепленный болтовым соединением; компрессор (3) для подачи воздуха в аэратор, соединенный с ресивером (4); магистрали воды (5) и воздуха (6) с запорной и регулирующей арматурой; измерительные приборы – расходомеры воды (7) и воздуха (ротаметр) (8), манометры (9), линейка для измерения диаметра пузырьков (10), кислородомер (11), съёмочная аппаратура для видеорегистрации испытаний (12), источник света (13).



**Рис. 2.** Пневмогидравлический вращающийся аэрактор:  
1 – корпус; 2 – штанга; 3 – камера смешения; 4 – сопло;  
5 – патрубок подвода газа; 6 – патрубок подвода жидкости

**Fig. 2.** Pneumohydraulic rotating aerator:  
1 – frame; 2 – rod; 3 – mixing chamber; 4 – nozzle;  
5 – gas supply pipe; 6 – liquid supply pipe



**Рис. 3.** Лабораторный испытательный стенд  
**Fig. 3.** Laboratory test bench

**Исследования аэрации жидкости при моделировании процесса потребления (питания) активного ила**

Растворенный кислород находится в природной воде в виде молекул  $O_2$ . На его содержание в воде влияют две группы противоположно направленных

процессов: одни увеличивают концентрацию кислорода, другие уменьшают ее.

К числу первых относятся поглощение кислорода из атмосферы, выделение кислорода водной растительностью в процессе фотосинтеза и поступление в водоемы с дождевыми и снеговыми водами, которые обычно пересыщены кислородом.

В артезианских водах все эти факторы практически не действуют и поэтому кислород в таких водах отсутствует. В поверхностных же водах содержание кислорода меньше теоретически возможного в силу протекания процессов, уменьшающих его концентрацию, а именно: потребления кислорода различными организмами, брожения, гниения органических остатков, реакций окисления и т.п.

Относительное содержание кислорода в воде, выраженное в процентах его нормального содержания, и называется степенью насыщения кислородом. Этот параметр зависит от температуры воды, атмосферного давления и уровня минерализации.

Концентрация кислорода определяет величину окислительно-восстановительного потенциала и в значительной мере направление и скорость процессов химического и биохимического окисления органических и неорганических соединений. Содержание кислорода в поверхностных водах служит характеристикой оценки качества поверхностных вод.

Для энергоконтейнера отвод сточных вод и их состав соответствует хозяйственно-бытовым стокам, где содержание кислорода относительно мало.

Проведение экспериментов для исследовательской установки позволит получить наиболее реальные геометрические размеры пневмогидравлического аэратора и определить

зависимость растворенного кислорода от среза сопла вращающегося пневмогидравлического аэратора, что приведет к увеличению окислительной способности аэратора.

Наиболее распространенным методом экспериментального определения окислительной способности аэратора и связанных с ней параметров эффективности работы является насыщение кислородом чистой воды, предварительно обескислороженной введением сульфита натрия в присутствии хлористого кобальта.

Согласно учебному изданию «Водоотведение и очистка сточных вод» под редакцией Ю.В. Воронова [16], соотношение массы сульфита натрия и растворённого кислорода составляет 8:1, то есть на «связывание» 1 мг O<sub>2</sub> необходимо 8 мг Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>. В упрощённой форме эту зависимость можно выразить формулой (1):

$$m = 8 \cdot C_0 \cdot V \quad (1)$$

где  $C_0$  – начальная концентрация растворённого кислорода, мг/дм<sup>3</sup>;

$V$  – объём обескислороживаемой воды, дм<sup>3</sup>.

Соль кобальта в качестве катализатора не вводилась, поскольку время подготовки к эксперименту было достаточным, чтобы реакция успела осуществиться.

До начала проведения опыта производился контрольный замер кислорода в воде оксиметром в течение 1 минуты, температуры воды, а также комнатные показания термометра и барометра.

Полученные при проведении эксперимента данные представлены в таблице 1, по которой рассчитываются искомые параметры. На рисунке 4 представлена диаграмма измерений и расчетов растворимости кислорода

**Таблица 1.** Результаты измерений и расчетов растворимости кислорода  
**Table 1.** Results of oxygen solubility measurements and calculations

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Время проведения опыта t, сек	60	60	60	60	60	60	60	60	60	
Объем аэрируемой жидкости V, дм <sup>3</sup>	200	200	200	200	200	200	200	200	200	
Количество сульфита натрия m, г	14,18	14,31	14,28	14,29	14,21	14,33	14,25	14,17	14,18	
Мощность двигателя компрессора N, кВт	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	
Расход воды по водосчетчику Q <sub>ж</sub> , дм <sup>3</sup>	1,8	2,1	1,8	2,3	2,4	2,3	2,6	2,6	2,6	
Расход воздуха по ротаметру Q <sub>г</sub> , дм <sup>3</sup>	23,31	23,67	23,48	36,62	36,44	36,53	50,18	50,12	50,14	
Давление в системе P, МПа	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	
Концентрация растворенного кислорода, мг/дм <sup>3</sup>	C <sub>0</sub> до опыта	8,86	8,95	8,93	8,93	8,88	8,94	8,92	8,84	8,85
	C <sub>1</sub> в начале опыта	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	C <sub>2</sub> в конце опыта	5,50	5,55	5,53	5,90	5,92	5,93	6,35	6,36	6,37

Продолжение таблицы 1  
Continuation of table 1

Температура воздуха Т, °С	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Температура воды Т <sub>ж</sub> , °С	16	16	16	16	16	16	16	16	16
Текущее атмосферное давление Р <sub>0</sub> , мм рт.ст.	721	721	721	721	721	721	721	721	721
Нормальная концентрация растворенного кислорода в воде при атм. давлении 760 мм рт. ст. С <sub>s</sub> (760), мг/дм <sup>3</sup>	9,58	9,58	9,58	9,58	9,58	9,58	9,58	9,58	9,58
Предел насыщения воды кислородом при текущем атм. давлении С <sub>s</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	9,08	9,08	9,08	9,08	9,08	9,08	9,08	9,08	9,08
Объёмный коэффициент массопередачи кислорода k, ч <sup>-1</sup>	58,58	59,47	58,11	66,53	66,93	66,73	75,85	76,08	76,32
Окислительная способность ОС, гО <sub>2</sub> /ч	106,32	107,95	107,27	120,75	121,47	121,12	137,67	138,07	138,52
Средняя окислительная способность, гО <sub>2</sub> /ч	107,19			121,12			138,09		
Эффективность, гО <sub>2</sub> /кВт*ч	151,88	154,18	153,25	172,48	173,53	173,02	196,66	197,27	197,88
Средняя эффективность, гО <sub>2</sub> /кВт*ч	153,12			173,02			197,27		
Соотношение жидкость-газ Q <sub>ж</sub> :Q <sub>г</sub>	12,4	11,9	12,5	16,7	15,7	16,7	20,0	20,1	20,2
Среднее соотношение Q <sub>ж</sub> :Q <sub>г</sub>	12			16			20		

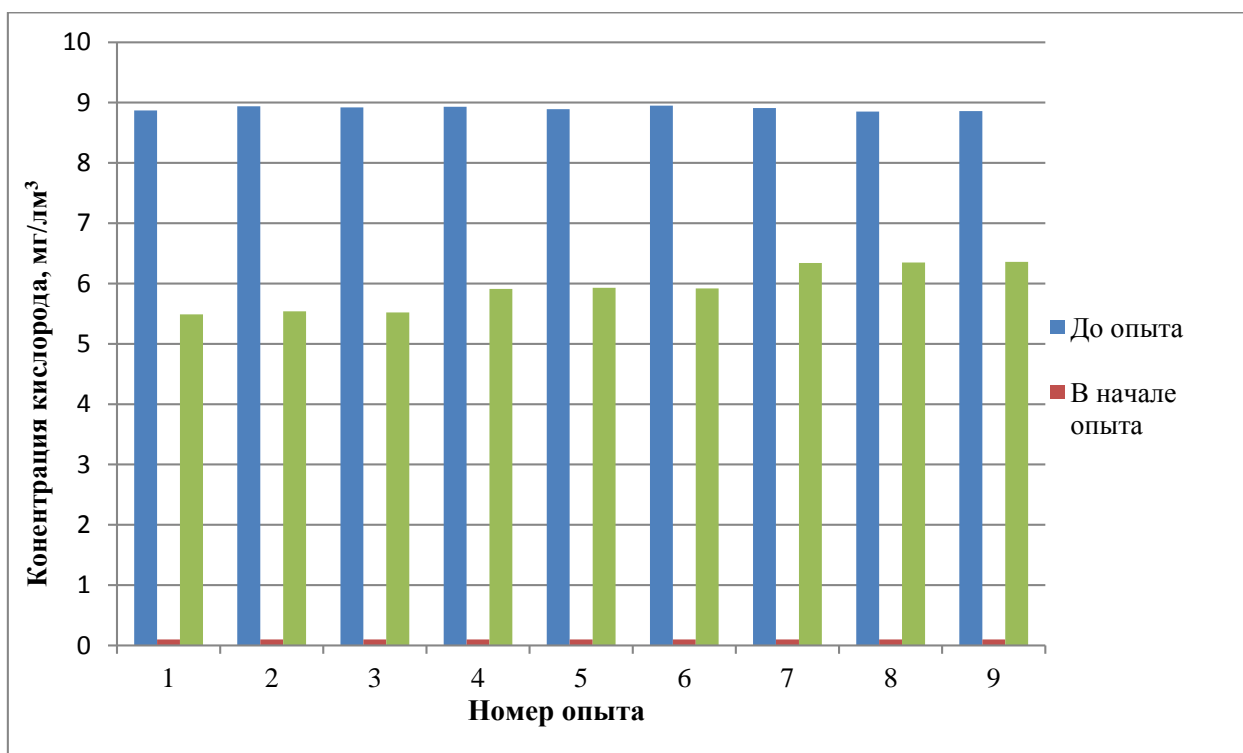


Рис. 4. Диаграмма измерений и расчетов растворимости кислорода  
Fig. 4. Diagram of oxygen solubility measurements and calculations

Окислительная способность – скорость растворения кислорода воздуха в единице объема жидкости, гО<sub>2</sub>/ч. Определяется по формуле (2) («Водоотведение и очистка сточных вод» под редакцией Ю.В. Воронова [16]):

$$ОС = (k \cdot C_s \cdot V) / 1000, \quad (2)$$

где k – объёмный коэффициент массопередачи, ч<sup>-1</sup>;

C<sub>s</sub> – предельная концентрация растворённого кислорода в воде при данном атмосферном давлении, температуре воды и её солёности, мг/дм<sup>3</sup>;  
V – объём аэрируемой воды, дм<sup>3</sup>.

Объёмный коэффициент массопередачи характеризует скорость процесса массопередачи, т.е. растворения кислорода воздуха в жидкости.

Зависит от конструктивных особенностей, геометрических размеров аппарата и физико-химических свойств газовой и жидкой фаз. Определение этой величины является основной задачей моделирования процесса массообмена.

По формуле (3) («Водоотведение и очистка сточных вод» под редакцией Ю.В. Воронова [16]) определяется объёмный коэффициент массопередачи, ч-1:

$$k = [\ln(C_s - C_1) - \ln(C_s - C_2)] / [t * (1 + 0,02 * (T_{ж} - 20))], \quad (3)$$

где  $C_1, C_2$  – соответственно начальная и конечная концентрация растворенного кислорода, мг/дм<sup>3</sup>;

$t$  – время опыта, ч (60 сек / 3600 сек = 0,017 ч);

$T_{ж}$  – текущая температура воды, °С;

$C_s$  – предельная концентрация растворённого кислорода при данном атмосферном давлении, мг/дм<sup>3</sup>. Определяется по формуле (4) («Водоотведение и очистка сточных вод» под редакцией Ю.В. Воронова [16]):

$$C_s = C_{s(760)} * P_a / 760, \quad (4)$$

где  $P_a$  – атмосферное давление по барометру, мм. рт. ст.;

$C_{s(760)}$  – нормальная концентрация растворённого кислорода в воде, мг/дм<sup>3</sup>, при атмосферном давлении 760 мм рт. ст. в зависимости от температуры воды.

Одной из важнейших технологических параметров оценки работы аэратора является эффективность аэрации – количество электрической энергии, необходимое для внесения и растворения кислорода воздуха в единице объема жидкости.

По формуле (5) («Водоотведение и очистка сточных вод» под редакцией Ю.В. Воронова [16]) рассчитывается эффективность аэратора, гО<sub>2</sub>/кВт\*ч:

$$\Xi = OC/N, \quad (5)$$

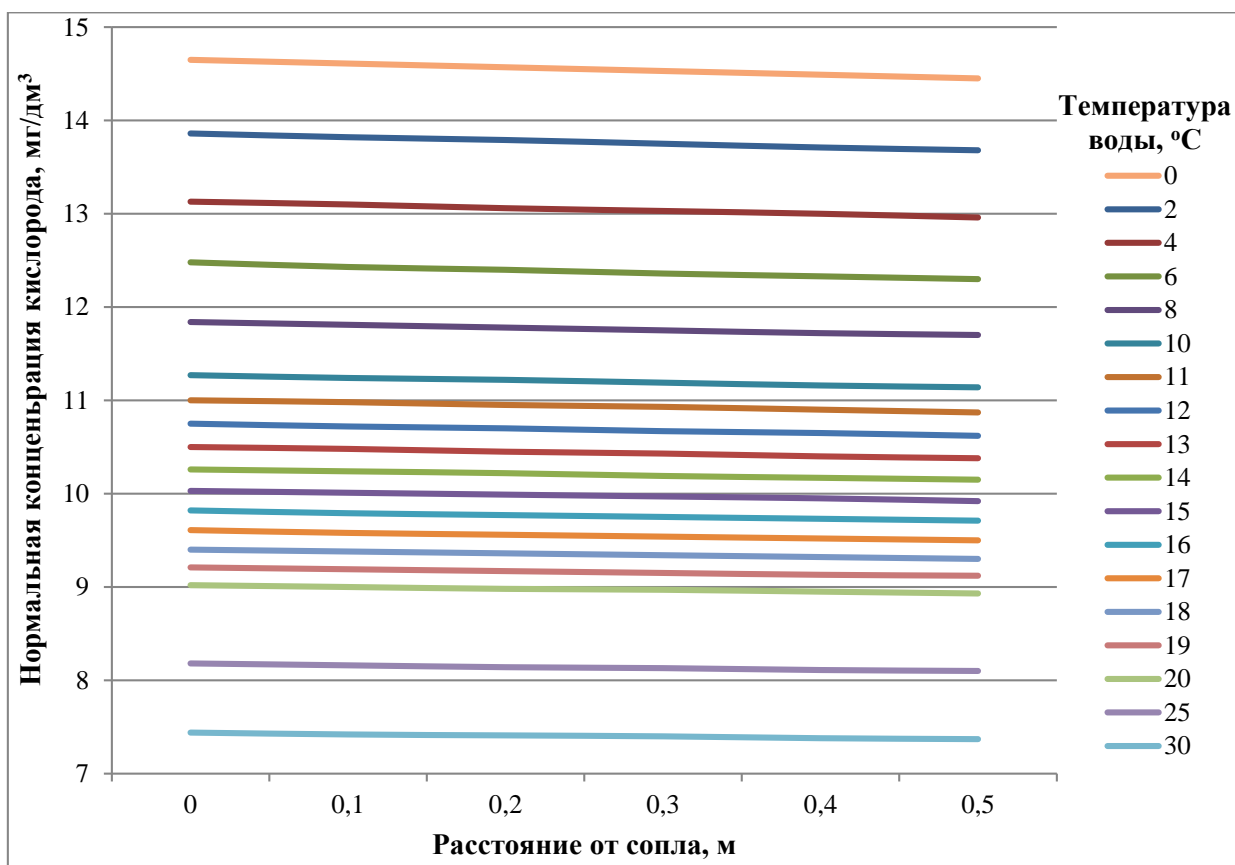
где  $N$  – энергия, затраченная двигателем компрессора, кВт.

В таблице 2 и на рисунке 5 представлены результаты эксперимента, согласно которому оптимальная концентрация кислорода для процесса окисления органических веществ на модельной среде в размере 9,58 мг/дм<sup>3</sup> и достигается при расстоянии 0,1 м от сопла аэратора и температуре среды 17 С°.

**Таблица 2.** Зависимость нормальной концентрации кислорода (мг/дм<sup>3</sup>) в воде от температуры, при атмосферном давлении 760 мм рт. ст

**Table 2.** Dependence of normal oxygen concentration (mg/dm<sup>3</sup>) in water on temperature, at atmospheric pressure of 760 mm Hg. st

Температура воды, T °С	Расстояние от сопла, м					
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0	14,64	14,62	14,58	14,52	14,48	14,46
2	13,87	13,83	13,78	13,74	13,72	13,68
4	13,14	13,11	13,05	13,02	13,00	12,97
6	12,47	12,44	12,41	12,37	12,32	12,31
8	11,85	11,82	11,77	11,74	11,73	11,71
10	11,26	11,25	11,21	11,18	11,17	11,15
11	11,01	10,99	10,96	10,94	10,91	10,86
12	10,76	10,73	10,71	10,68	10,64	10,61
13	10,51	10,47	10,45	10,42	10,41	10,39
14	10,27	10,25	10,23	10,18	10,18	10,16
15	10,04	10,02	9,98	9,96	9,94	9,93
16	9,81	9,79	9,78	9,76	9,74	9,70
17	9,62	<b>9,58</b>	9,55	9,53	9,52	9,51
18	9,41	9,39	9,35	9,34	9,33	9,31
19	9,22	9,18	9,16	9,14	9,13	9,11
20	9,03	9,01	8,97	8,96	8,94	8,92
25	8,19	8,15	8,13	8,12	8,10	8,11
30	7,45	7,43	7,40	7,41	7,39	7,36



**Рис. 5.** График зависимости нормальной концентрации кислорода (мг/дм<sup>3</sup>) в воде от температуры, при атмосферном давлении 760 мм рт. ст

**Fig. 5.** Dependency graph of normal oxygen concentration (mg/dm<sup>3</sup>) in water on temperature, at atmospheric pressure of 760 mm Hg. st

**Последовательность выполнения опытов:**

1. Заполнение ресивера водопроводной водой до появления её из контрольного крана.
2. Создание в ресивере давления до 5,5 атм. с помощью компрессора.
3. Установка аэратора в резервуар, подсоединение его к воздушной и водяной магистралям (рис.6).



**Рис. 6.** Установленный и подсоединённый пневмогидравлический аэратор. Линейка предназначена для измерения расстояния выброса пузырьков от сопла аэратора.

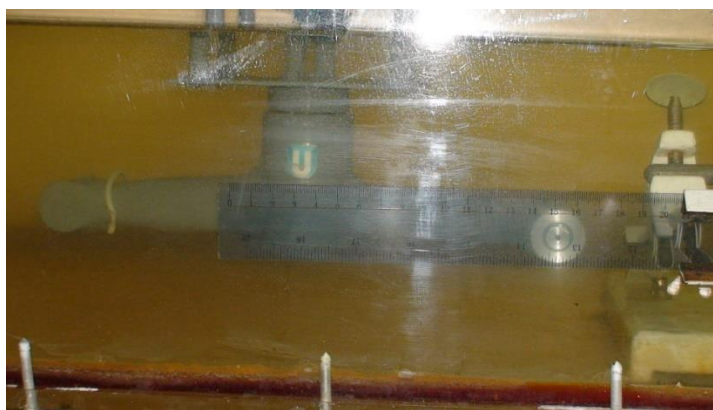
**Fig. 6.** Installed and connected pneumohydraulic aerator. The ruler is designed to measure the bubbles ejection distance from the aerator nozzle.

4. Установка датчика кислородомера (рис. 7) в резервуар, регулировка и настройка прибора (при необходимости произвести калибровку).
5. Наполнение резервуара водопроводной водой ( $t = 35-400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) до отметки 20 см.

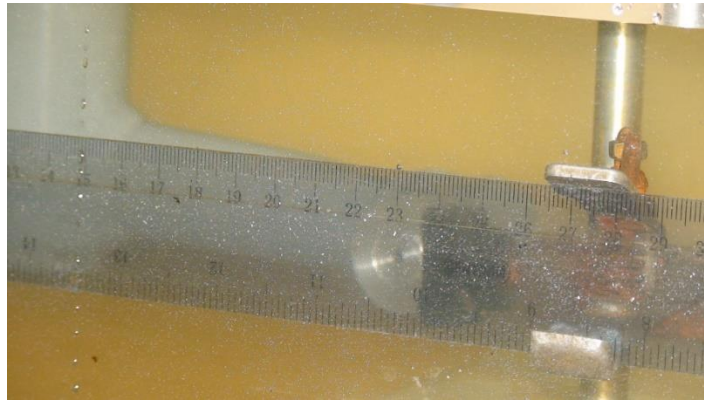


**Рис. 7.** Кислородомер «Эксперт-001-БПК»  
**Fig. 7.** Oxygen meter "Expert-001-BPK"

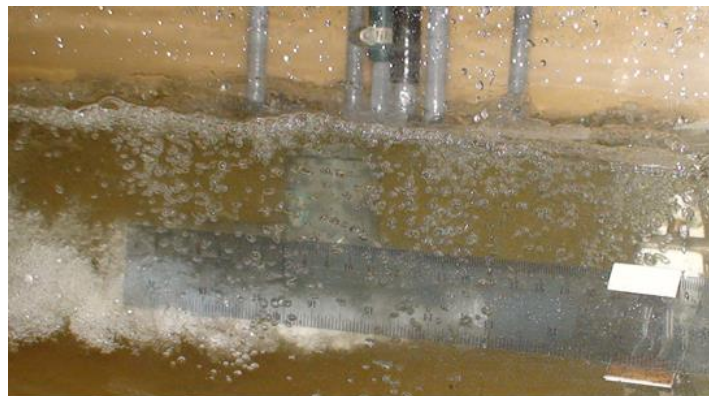
6. Внесение в протокол эксперимента начальных данных (температура среды, pH, содержание кислорода по кислородомеру, показания расходомера).
7. Запуск аэратора в работу открытием кранов на воздушной и водяной магистралях (рис. 8 и рис. 9).
8. Одновременный запуск автоматической записи показаний кислородомера с интервалом 5 сек.
9. Внесение в протокол эксперимента текущих данных (давление воды, воздуха по манометрам, расход воздуха по ротаметру).
10. Прекращение работы аэратора по истечении необходимого интервала (1 мин) закрытием кранов на воздушной и водяной магистралях.
11. Остановка автоматической записи показаний кислородомера.
12. Внесение в протокол эксперимента конечных данных (отметка уровня воды в резервуаре, показания расходомера, показания записей кислородомера).
13. Слив воды из резервуара и наполнение его водой заново.
14. Перемещение датчика кислородомера в следующую точку измерения.
15. Создание в ресивере давления до 5,5 атм. с помощью компрессора.
16. Повторение пп. 6 – 15.
17. Экспериментальное определение расстояния от сопла с обеспечением оптимального показателя концентрации кислорода (рис. 10 и рис. 11).



**Рис. 8.** Пневмогидравлический аэратор вращающийся готов к работе  
**Fig. 8.** Pneumohydraulic rotary aerator ready for operation



**Рис. 9.** Измерительная линейка для определения длины факела пузырей  
**Fig. 9.** Measuring ruler for determining the length of the torch of bubbles



**Рис. 10.** Выбранная точка измерения в зависимости от длины факела пузырей  
**Fig. 10.** Selected measuring point depending on the length of the bubble jet



**Рис. 11.** Определенная точка в 10 см при эксперименте вращающегося пневмогидравлического аэратора  
**Fig. 11.** A certain point of 10 cm in a rotating aerator experiment

## ВЫВОДЫ

Растворенный кислород в поступающих на очистные сооружения сточных водах практически отсутствует. Этот показатель – один из определяющих для сооружений аэробной биологической очистки. Имея разработанный аэратор, который вращается за счет энергии пневматической струи, можно с уверенностью сказать, что он позволяет без применения таких дополнительных энергоемких установок, как погружные мешалки с электродвигателями [17], насыщать жидкость кислородом воздуха с

одновременным её перемешиванием, благодаря чему растворённый кислород более эффективно распространяется по всему объёму и поддерживает микроорганизмы во взвешенном состоянии. Размеры установки зависят от показателя растворимости кислорода. При разных давлениях и расходах будут разные соотношения диаметров сопла и длины насадки («Струйная аэрация» под редакцией Ю.В. Воронова. [5]). Описанный методика позволит определить геометрические размеры пневмогидравлического аэратора, а соответственно и ячейки для очистки сточных вод в целом, наиболее оптимальные для размещения в

конструкции многофункциональной автономной энергоустановки.

Полученная последовательность выполнения опытов по определению насыщения кислородом жидкости позволила установить наиболее оптимальный показатель концентрации кислорода для разрабатываемой установки, который составил 9,58 мг/дм<sup>3</sup> в воде от температуры, при атмосферном давлении 760 мм рт. ст. при расстоянии от сопла 0,1 м. Таким образом, данное расстояние является оптимальным по соотношению размер/эффективность.

Это позволяет считать его более эффективным и конкурентоспособным среди прочих устройств для аэрации жидкости. При этом его размеры позволяют применять его как на канализационных очистных станциях в сооружениях биологической очистки сточных вод, так и в автономных установках для очистки и утилизации сточных вод [18-24], а также в многофункциональной автономной энергоустановке.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tunik A.A., Tolstoy M.Y. The Complex Mobile Independent Power Station for the Urban Areas. IOP Conference Series: Material Science and Engineering. 2017; № 262: p. 6. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012227>.
2. Tunik A.A., Tolstoy M.Y., Kalashnikov M.P. The complex mobile independent power station for the recreational areas. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020; Volume 408: p. 7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012012>.
3. Armstrong R., Wolfram C., de Jong K.P., Gross R., Lewis N.S., Boardman B, Ragauskas A.J., Ehrhardt-Martinez K., Crabtree G., Ramana M.V. The frontiers of energy. Nature Energy. 2016; Volume 1. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2015.20>.
4. Tunik A.A., Tolstoy M.Y. Hydraulic optimization of the flat solar collectors SUN 1 and the temperature gradient of the heat carrier in a system of connected solar units. MATEC Web Conferens. 2018; Volume 212: p. 9. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821202007>.
5. Воронов Ю.В., Казаков В.Д., Толстой М.Ю. Струйная аэрация / Научное издание. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 216 с.
6. Tam K.T., Pita M., Ornatska M., Katz E. Biofuel cell controlled by enzyme logic network. Approaching physiologically regulated devices Bioelectrochemistry. 2009; № 76: pp. 4-9. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2009.03.008>.
7. El-Eskandarany M.S., Al-Salem S.M., Ali N., Banyan M., Al-Ajmi F. and Al-Duweesh A. From gangue to the fuel-cells application. Scientific Reports. 2020; Volume 10: p. 18. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76503-6>.
8. Slate A.J., Whitehead K.A., Brownson D.A.C., Banks C.E. Microbial fuel cells: An overview of current technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019; Volume 101: pp. 60-81. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.044>.
9. Bhargavi G., Venu V., Renganathan S. Microbial fuel cells: recent developments in design and materials. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018; Volume 330: p. 16. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/330/1/012034>.
10. Stom D.I., Konovalova E.Y., Zhdanova G.O., Vyatchina O.F., Tolstoy M.Y. Active sludge and strains isolated from it as bioagents in biofuel cells. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 17, Energy and Clean Technologies. 2017; pp. 19-26. <https://doi.org/10.5593/sgem2017/42>.
11. Горбунова Ю.О., Цыренов В.Ж., Жданова Г.О., Стом Д.И., Хрони М.Э., Толстой М.Ю., Рябчикова И.А., Фиалков В.А., Купчинский А.Б. и Гоел С. Clostridium acetobutylicum как биоагент в биотопливных элементах// Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология. 2018; № 24: сс. 16-24.
12. Zhdanova G.O., Konovalova E.Y., Kashevsky A.V., Stom D.I., Tolstoy M.Y., Fialkow V.A., Kupchinsky A.B., Barbora L., Goswami P., Goel S. Comparative analysis of electrogenic activity of complex microbial preparations in microbial fuel cells. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019; Volume 272, Issue 3: p. 5. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/3/032161>.
13. Dutta A., Barbora L., Thakuria A., Goswami P., Stom D. Duckweed Assisted Sediment microbial fuel cell for powering small scale devices. Advances in Thermofluids and Renewable Energy. 2022; pp. 503-510. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-3497-0\\_40](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3497-0_40).
14. Herman N.A., Kim S.J., Li J.S., Cai W., Koshino H., Zhang W. The industrial anaerobe Clostridium acetobutylicum uses polyketides to regulate cellular differentiation. Nature communications. 2017; 8: p. 10. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01809-5>.
15. Zhang H., Yang P., Wang Z., Li M., Zhang J., Liu D., Chen Y., Ying H. Clostridium acetobutylicum biofilm: Advances in understanding the basis. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2021; Volume 9: p. 9. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.658568>.
16. Воронов Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод / Учебное издание: - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009 – 760 с.
17. Баженов В.И. Погружные мешалки, как перспективное направление научно-исследовательских работ / В.И. Баженов, С.М. Божьева // Инженерный вестник. – 2015. – № 7. – С. 6 – 12.
18. Леонтьев А.В., Стом Д.И., Толстой М.Ю., Чижик К.И. Исследование интенсификации процессов флотационной и биологической очистки сточных вод на основе применения модельных стоков// Строительство и техногенная безопасность. 2018; № 11 (63). – С 205 - 212.
19. Yang Y., Wang L., Xiang F., Zhao L., Qiao Z. Activated sludge microbial community and treatment

performance of wastewater treatment plants in industrial and municipal zones. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020; 17(2): p. 15. <https://doi.org/10.3390/ijerph17020436>.

20. Ou D., Li W., Li H., Wu X., Li C., Zhuge Y., Liu, Y.D. Enhancement of the removal and settling performance for aerobic granular sludge under hypersaline stress. *Chemosphere*. 2018; 212: pp. 400 – 407.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.096>.

21. Tong J., Tang A., Wang H., Liu X., Huang Z., Wang Z., Zhang J., Wei Y., Su Y., Zhang Y. Microbial community evolution and fate of antibiotic resistance genes along six different full-scale municipal wastewater treatment processes. *Bioresource Technology*. 2019; 272: pp. 489–500. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.079>.

22. Dyagelev M.Yu, Pavlov I.I., Nepogodin A.M., Grakhova E.V., Lapina A.A. The review of aeration systems for biological wastewater treatment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; Volume 839: p. 6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/4/042035>.

23. Narayanan C.M., Narayan V. Biological wastewater treatment and bioreactor design: a review. *Sustainable Environment Research*. 2019; 29: p. 17. <https://doi.org/10.1186/s42834-019-0036-1>.

24. Tolstoy M.Y., Belookaya N.V., Tolstoy V.M., Leontyev A.V., Tunik A.A. The multifunctional power container. *Water treatment. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; Volume 667: p. 14. <https://doi.org/10.1088/1755-899X/667/1/012100>.

## REFERENCES

1. Tunik A.A., Tolstoy M.Y. The Complex Mobile Independent Power Station for the Urban Areas. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*. 2017; № 262: p. 6. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-899X/262/1/012227>.

2. Tunik A.A., Tolstoy M.Y., Kalashnikov M.P. The complex mobile independent power station for the recreational areas. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; Volume 408: p. 7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012012>.

3. Armstrong R., Wolfram C., de Jong K.P., Gross R., Lewis N.S., Boardman B, Ragauskas A.J., Ehrhardt-Martinez K., Crabtree G., Ramana M.V. The frontiers of energy. *Nature Energy*. 2016; Volume 1. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2015.20>.

4. Tunik A.A., Tolstoy M.Y. Hydraulic optimization of the flat solar collectors SUN 1 and the temperature gradient of the heat carrier in a system of connected solar units. *MATEC Web Conferenses*. 2018; Volume 212: p. 9. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821202007>.

5. Voronov Y.V., Kazakov V.D., Tolstoy M.Y. Jet aeration / Science edition: - M.: Izdatel'stvo Associacii stroitel'nih vuzov, 2007. – 216 c.

6. Tam K.T., Pita M., Ornatska M., Katz E. Biofuel cell controlled by enzyme logic network. Approaching physiologically regulated devices *Bioelectrochemistry*. 2009; № 76: pp. 4-9. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2009.03.008>.

7. El-Eskandarany M.S., Al-Salem S.M., Ali N., Banyan M., Al-Ajmi F. and Al-Duweesh A. From gangue to the fuel-cells application. *Scientific Reports*. 2020; Volume 10: p. 18. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76503-6>.

8. Slate A.J., Whitehead K.A., Brownson D.A.C., Banks C.E. Microbial fuel cells: An overview of current technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019; Volume 101: pp. 60-81. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.044>.

9. Bhargavi G., Venu V., Renganathan S. Microbial fuel cells: recent developments in design and materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; Volume 330: p. 16. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/330/1/012034>.

10. Stom D.I., Konovalova E.Y., Zhdanova G.O., Vyatchina O.F., Tolstoy M.Y. Active sludge and strains isolated from it as bioagents in biofuel cells. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 17, Energy and Clean Technologies*. 2017; pp. 19-26. <https://doi.org/10.5593/sgem2017/42>.

11. Gorbunova Yu.O., Tsyrenov V.Z., Zhdanova G.O., Stom D.I., Chroni M.E., Tolstoy M.Y., Ryabchikova I.A., Fialkov V.A., Kupchinskiy A.B. and Goel S. Clostridium acetobutylicum as a bioagent in biofuel cells // *Proceedings of Irkutsk state. Series: Biology. Ecology*. 2018; № 24: pp. 16-24.

12. Zhdanova G.O., Kkonovalova E.Y., Kashevsky A.V., Stom D.I., Tolstoy M.Y., Fialkov V.A., Kupchinsky A.B., Barbora L., Goswami P., Goel S. Comparative analysis of electrogenic activity of complex microbial preparations in microbial fuel cells. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; Volume 272, Issue 3: p. 5. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/3/032161>.

13. Dutta A., Barbora L., Thakuria A., Goswami P., Stom D. Duckweed Assisted Sediment microbial fuel cell for powering small scale devices. *Advances in Thermofluids and Renewable Energy*. 2022; pp. 503-510. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-3497-0\\_40](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3497-0_40).

14. Herman N.A., Kim S.J., Li J.S., Cai W., Koshino H., Zhang W. The industrial anaerobe Clostridium acetobutylicum uses polyketides to regulate cellular differentiation. *Nature communications*. 2017; 8: p. 10. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01809-5>.

15. Zhang H., Yang P., Wang Z., Li M., Zhang J., Liu D., Chen Y., Ying H. Clostridium acetobutylicum biofilm: Advances in understanding the basis. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2021; Volume 9: p. 9. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.658568>.

16. Voronov Y.V. Water disposal and wastewater treatment / Academic edition: - M.: Izdatel'stvo Associacii stroitel'nih vuzov, 2009 – 760 p.

17. Bazhenov V.I. Submersible mixers as a promising area of research / V.I. Bazhenov, S.M. Bozh'eva // Engineering bulletin. – 2015. – № 7. – С. 6. – EDN UHLILH.
18. Leontiev A.V., Stom D.I., Tolstoy M.Y., Chizhik K.I. Investigation of the intensification of flotation and biological wastewater treatment processes based on the application of model straws// Construction and industrial safety. 2018; № 11 (63): pp. 205-212.
19. Yang Y., Wang L., Xiang F., Zhao L., Qiao Z. Activated sludge microbial community and treatment performance of wastewater treatment plants in industrial and municipal zones. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020; 17(2): p. 15. <https://doi.org/10.3390/ijerph17020436>.
20. Ou D., Li W., Li H., Wu X., Li C., Zhuge Y., Liu, Y.D. Enhancement of the removal and settling performance for aerobic granular sludge under hypersaline stress. Chemosphere. 2018; 212: pp. 400 – 407. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.096>.
21. Tong J., Tang A., Wang H., Liu X., Huang Z., Wang Z., Zhang J., Wei Y., Su Y., Zhang Y. Microbial community evolution and fate of antibiotic resistance genes along six different full-scale municipal wastewater treatment processes. Bioresource Technology. 2019; 272: pp. 489–500. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.079>.
22. Dyagelev M.Yu, Pavlov I.I., Nepogodin A.M., Grakhova E.V., Lapina A.A. The review of aeration systems for biological wastewater treatment. IOP Conference Series: Earth and environmental Science. 2021; Volume 839: p. 6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/4/042035>.
23. Narayanan C.M., Narayan V. Biological wastewater treatment and bioreactor design: a review. Sustainable Environment Research. 2019; 29: p. 17. <https://doi.org/10.1186/s42834-019-0036-1>.
24. Tolstoy M.Y., Belookaya N.V., Tolstoy V.M., Leontyev A.V., Tunik A.A. The multifunctional power container. Water treatment. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019; Volume 667: p. 14. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/667/1/012100>.

## RESEARCH OF THE PNEUMOHYDRAULIC AERATOR OXIDIZING ABILITY

Tolstoy M. Yu., Tunik A.A.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

**Abstract.** Pneumohydraulic aeration is usually carried out by joint supplying the liquid and gas phases under excess pressure to various devices. These devices are similar in design to ejectors and fuel injectors. The bubble formation mechanism during pneumohydraulic aeration is still not entirely clear and therefore does not have any general theory. The bubble formation mechanism during pneumohydraulic aeration is still not entirely clear and therefore does not have any general theory. It is possible to answer the difficult question, what is the mechanism of dispersion in a pneumohydraulic aerator, using theoretical studies on similar or close devices, which are pneumatic and hydraulic nozzles, in addition to ejectors. Pneumohydraulic aerators are promising aeration devices for biological wastewater treatment processes because they have high oxidizing capacity, low clogging degree, the ability to control the hydrodynamics in the facility, the simplicity of its creation, high aeration quality and they have no excessive energy costs for its implementation. This indicates that the developed pneumohydraulic aerator is efficient and competitive, and also it has optimal dimensions for using in a multifunctional independent power station, which is developed and investigated ISTU.

**Subject of research.** Investigation of the pneumohydraulic aerator oxidative capacity. This aerator was developed at the Irkutsk National Research Technical University and it has dimensions that are optimal for the investigated multifunctional independent power station.

**Materials and methods.** The experiments were carried out using a designed test bench, where pure water was saturated with oxygen. The experimental technique was specially developed for the stand.

**Results:** It is shown that the optimal oxygen concentration for the process of organic substances oxidation on a model medium, which is 9.58 mg/dm<sup>3</sup>, is achieved at a distance of 0.1 m from the aerator nozzle at an ambient temperature of 16 °C. The mixing capacity of the rotating pneumohydraulic aerator makes it possible to maintain microorganisms in active sludge in suspension. Such characteristics allows the aerator to has optimal dimensions for use in a multifunctional independent power station.

**Conclusions:** Having developed an aerator, it can said that it allows to saturate the liquid with atmospheric oxygen without using of additional energy-intensive installations while simultaneously mixing it. Due to this process the dissolved oxygen spreads more efficiently throughout the volume and maintains the microorganisms in suspension. It makes possible to consider the aerator more efficient and competitive among other devices for liquid aeration and to recommend it for implementation at sewage treatment stations in biological wastewater treatment plants. The important point is aerator dimensions are optimal for use in autonomous stations for wastewater treatment and disposal, as well as in a in a multifunctional independent power station.

**Key words:** wastewater treatment, pneumohidraulic aeration, clostridium acetobutylicum VKPM-B-4786, clostridium, oxygen solubility, activated sludge, multifunctional independents power station.