Оригинальная статья
https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-4-60-64
УДК 631.6.03:628.1:628.356.1

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ АЭРАТОРА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДОЕМОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

П.А. Михеев✉, Х. Исмаил

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

Аннотация. В настоящее время технические решения на основе использования возобновляемых источников энергии, в основном солнечной и ветровой, получают широкое развитие. Основными направлениями использования собственно солнечного излучения являются технологии получения тепловой энергии в водонагревательных установках и (или) электрической энергии с помощью фотоэлектрических преобразователей, объединенных в фотоэлектрические модули. В отрасли ветровой энергетики кинетическая энергия воздушных масс в атмосфере преобразуется в электрическую, механическую, тепловую и другие формы энергии. Современные принципы создания систем аэрации естественных водоемов с использованием возобновляемых источников энергии базируются в основном на традиционных технологиях преобразования энергии. Так, солнечная энергия преобразуется в электрическую с помощью фотоэлектрических преобразователей, а кинетическая энергия ветра – в механическую, с последующей подачей на энергетические установки нагнетания воздуха с нагнетанием в распределительную сеть аэраторов. Целью работы является теоретическое обоснование объема емкости-накопителя из условий формирования оптимальной концентрации кислорода в водоеме. В статье приведены результаты теоретических исследований, позволившие на основе уравнения состояния, примененного для термодинамической системы емкости-накопителя, а также с учетом гидродинамических условий работы устройства получить зависимость для определения объема емкости-накопителя конструкции, необходимого для устранения дефицита кислорода в воде водоема.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2022-317 от 20 апреля 2022 г. о предоставлении гранта в форме субсидий из федерального бюджета на осуществление государственной поддержки создания и развития научного центра мирового уровня «Агротехнологии будущего».

Ключевые слова: водоем, устройство для аэрации, солнечная энергия, емкость-накопитель, дефицит кислорода

Формат цитирования: Михеев П.А., Исмаил Х. Расчет параметров аэратора поверхностных водоемов на основе использования солнечной энергии // Природообустройство. 2025. № 4. С. 60-64. https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-4-60-64

Scientific article

CALCULATION OF THE PARAMETERS OF A SURFACE WATER AERATOR BASED ON THE USE OF SOLAR ENERGY

P.A. Mikheev✉, Kh. Ismaeil

Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy; A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russia

Abstract. Currently, technical solutions based on the use of renewable energy sources, mainly solar and wind, are being widely developed. The main directions of using solar radiation proper are technologies for obtaining thermal energy in water heating installations and (or) electric energy using photovoltaic converters combined into photovoltaic modules. In the wind energy industry, the kinetic energy of air masses in the atmosphere is converted into electrical, mechanical, thermal and other forms of energy. Modern principles of creating aeration systems for natural reservoirs using renewable energy sources are based mainly on traditional energy conversion technologies. For example, solar energy is converted into electrical energy using photovoltaic converters, and kinetic wind energy is converted into mechanical energy, followed by air injection into the distribution network of aerators. The purpose of this work is to theoretically substantiate the volume of the storage tank from the conditions for the formation of an optimal oxygen

© Михеев П.А., Исмаил Х., 2025

concentration in a reservoir. The article presents the results of theoretical studies that made it possible, based on the equation of state applied to the thermodynamic storage tank system, as well as taking into account the hydrodynamic operating conditions of the device, to obtain a dependence for determining the volume of the storage tank design necessary to eliminate oxygen deficiency in the reservoir water.

The work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the framework of agreement No. 075-15-2022-317 dated April 20, 2022 on the provision of a grant in the form of subsidies from the federal budget for state support for the creation and development of the world-class scientific center "Agrotechnologies of the Future".

Keywords: reservoir, aeration device, solar energy, storage tank, oxygen deficiency

Format of citation: Mikheev P.A., Ismaeil H. Calculation of the parameters of a surface water aerator based on the use of solar energy // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 4. P. 60-64. https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-4-60-64

Введение. Возобновляемыми источниками энергии принято считать источники, которые образуются на основе постоянно существующих или периодически возникающих процессов в природе (в первую очередь – энергии Солнца), основными из которых являются собственно энергия солнечного излучения и энергия ветра [1].

Современные принципы создания систем аэрации естественных водоемов с использованием возобновляемых источников энергии базируются в основном на традиционных технологиях преобразования энергии. Так, солнечная энергия преобразуется в электрическую с помощью фотоэлектрических преобразователей, а кинетическая энергии ветра – в механическую, с последующей подачей на энергетические установки нагнетания воздуха с нагнетанием в распределительную сеть аэраторов [2-6].

При проектировании аэраторов тип и схема размещения устройств рассматриваются для конкретного водоема в зависимости от нормативов содержания кислорода в воде, назначения, а также с учетом температуры и глубины воды, наличия водных и надводных (затеняющих) растений, биохимического состава грунта ложа водоема, топографии дна с учетом энергетических показателей аэраторов [7]. При этом следует учитывать, что чем меньше диаметр пузырька и больше их количество, тем больше поверхность соприкосновения воздуха с водой и тем больше растворимость кислорода [8, 9].

Задача расчета заключается в определении основных параметров устройства, необходимых для обеспечения при его работе нормативных показателей качества воды с учетом солнечной инсоляции в климатических и гидрологических условиях поверхностного водоисточника. Элементом, обеспечивающим работоспособность устройства, является емкость-накопитель, в связи с чем цель работы заключается в теоретическом обосновании объема емкости-накопителя из условий формирования оптимальной концентрации кислорода в водоеме.

Цель исследований: теоретическое обоснование объема емкости-накопителя из условий формирования оптимальной концентрации кислорода в водоеме.

Материалы и методы исследований. Принцип работы аэратора, в соответствии с патентом на полезную модель RU № 214200 [10], основан на использовании солнечной энергии. Расчетная схема устройства приведена на рисунке.

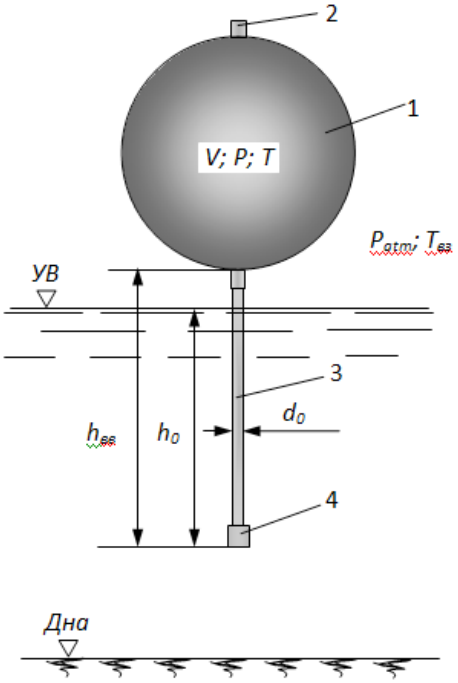

Рис. **Расчетная схема аэратора (опорный элемент устройства не показан):**
1 – емкость-накопитель; 2 – впускной клапан; 3 – воздуховод; 4 – выпускной клапан

Fig. **Calculation scheme of the object aerator** (the supporting element of the device is not shown)
1 – storage tank; 2 – inlet valve; 3 – air duct; 4 – outlet valve

Основным уравнением, устанавливающим связь между объемом, давлением и температурой воздуха в емкости-накопителе, является уравнение Клапейрона-Менделеева:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T, \quad (1)$$

где P – давление газа, Па; V – объем газа, м^3; n – количество вещества, моль; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31$ Дж/(моль К); T – температура газа, $К$.

При $n = \frac{m}{M}$ уравнение (1) принимает вид:

$$P \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T, \quad (2)$$

где m – масса газа, кг; M – молярная масса воздуха, равная 0,029 кг/моль.

Запишем уравнение (2) при температуре воздуха T_1 внутри емкости-накопителя в момент выхода первого пузырька воздуха в воду как

$$P_1 \cdot V_1 = \frac{m_1}{M} \cdot R \cdot T_1, \quad (3)$$

из которого получаем формулу для определения массы воздуха внутри емкости-накопителя (m_1):

$$m_1 = \frac{P_1 \cdot V_1 \cdot M}{R \cdot T_1}. \quad (4)$$

Аналогичным образом, используя уравнение (2), получим зависимость для определения массы воздуха внутри емкости-накопителя при температуре воздуха T_2 в момент выхода последнего пузырька в воду, то есть массу, оставшуюся внутри емкости-накопителя (m^2):

$$m_2 = \frac{P_2 \cdot V_2 \cdot M}{R \cdot T_2}. \quad (5)$$

В условиях рассматриваемой конструкции принимаются следующие допущения:

– объем аэратора в процессе работы устройства остается постоянным, изменением объема в результате температурного расширения материала корпуса пренебрегаем, $V_1 = V_2 = \text{const}$;

– в процессе работы аэратора установлено, что давление внутри емкости-накопителя при выходе первого и последнего пузырька практически не меняется, то есть изменением давления внутри конструкции в процессе работы пренебрегаем, $P_1 = P_2 = const$.

Тогда масса воздуха, выходящего из емкости-накопителя и поступающего в водоем, то есть на аэрацию $m_{аэ.в}$, будет равна разнице массы воздуха внутри емкости-накопителя в начале и в конце выхода воздуха:

$$m_{аэ.в} = m_1 - m_2 = \frac{PVM}{RT_1} - \frac{PVM}{RT_2} = \frac{PVM}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right). \quad (6)$$

В уравнении (6) следует раскрыть величину давления в емкости-накопителе, создаваемого солнечным излучением в процессе работы аэратора.

В соответствии с расчетной схемой (рис.) давление внутри емкости-накопителя для начала выхода воздуха зависит от глубины погружения выходного отверстия (выпускного клапана) и потерь напора при движении воздуха в трубе воздуховода и при выходе в выпускном клапане.

Формула для определения давления воздуха внутри емкости-накопителя на момент выхода первого пузырька будет иметь вид:

$$P = P_{atm} + \rho_0 \cdot g \cdot h_0 + h_{w\,тр.} + h_{w\,вк}, \quad (7)$$

где P_{atm} – атмосферное давление, Па; ρ_0 – плотность воды, кг/м^3; g – ускорение свободного падения, м/с^2; h_0 – глубина погружения выходного отверстия воздуховода под уровень воды в водоеме, м; $h_{w\,тр.}$ – потери напора на входе и при движении воздуха по длине воздуховода с учетом низкой скорости воздуха, малой длины трубы $h_{вв}$ и диаметра d_0 воздуховода. Потерями напора в воздуховоде пренебрегаем ($h_{w\,тр.} = 0$); $h_{w\,вк}$ – потери напора на выходе из выпускного клапана (рассеивателя) аэратора, зависящие от интенсивности подачи и расхода воздуха, для рассматриваемой конструкции могут быть приняты в пределах:

0,3 – 0,5 кПа.

С учетом изложенного зависимость (7) принимает следующий вид:

$$P = P_{atm} + \rho_0 \cdot g \cdot h_0 + h_{w\,вк}. \quad (8)$$

После преобразования (6) с учетом (8) масса воздуха, выходящего из емкости-накопителя, будет определена по формуле:

$$\Delta m = \frac{(P_{атм} + \rho_0 \cdot g \cdot h_0 + h_{w\,вк})VM}{R}\left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2}\right). \quad (9)$$

Как выше отмечалось, насыщение воды кислородом воздуха необходимо при наличии дефицита кислорода в водоеме, то есть разницы между нормативной $C^{O_2}_{нор}$ концентрацией кислорода, соответствующей условиям использования объекта, и текущей концентрацией кислорода $C^{O_2}_{т}$ [11], то есть в процессе аэрации обеспечит подачу требуемого количества, масса которого $m_{аэ.в}$ будет равна:

$$m_{аэ.в} = \frac{V_{вод} \cdot (C^{O_2}_{нор} - C^{O_2}_{т})}{m_{O_2} \cdot k_{эф}} \cdot \rho_в, \quad (10)$$

где $V_{вод}$ – объем водоема, м^3; $C^{O_2}_{нор}$ – нормативное содержание кислорода в воде водного объекта, для летнего периода работы исследуемого устройства $C^{O_2}_{нор}$ = 6-8 мг/л; $C^{O_2}_{т}$ – текущая концентрация кислорода в воде водного объекта, которая не может быть менее 2,0-2,5 мг/л; m_{i_2} – масса кислорода в 1 м^3 воздуха, являющаяся величиной постоянной. В воздухе содержится 21% кислорода, или в 1 м^3 воздуха – 0,21 м^3 при плотности ρ_{O2}=1,43кг/м^3, $m_{O_2} = 0,21$ м$^3 \cdot 1,43$ кг/м$^3 = 0,3$ кг в 1 м^3; $k_{эф}$ – коэффициент

эффективности переноса кислорода в воду, зависящий от типа и производительности аэратора, составляющий 20-60%, в среднем принимается 40% или 0,4; $\rho_в$ – плотность воздуха, $\rho_в = 1{,}22$ кг/м^3.

В то же время количество воздуха, выходящего из емкости-накопителя Δm, должно соответствовать количеству воздуха, требуемого для устранения дефицита кислорода в водоеме $m_{аэ.в}$. Приравняв правые части уравнений (9) и (10), получим

$$\frac{(P_{атм} + \rho_0 \cdot g \cdot h_0 + h_{w\,вк})VM}{R}\left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2}\right) = \frac{V_{вод} \cdot (C_{нор}^{O_2} - C_т^{O_2})}{m_{O_2} \cdot k_{эф}} \cdot \rho_в, \quad (11)$$

из которого объем емкости-накопителя рассматриваемой конструкции аэратора будет составит:

$$V = \frac{R \cdot V_{вод} \cdot (C_{нор}^{O_2} - C_т^{O_2}) \cdot \rho_в}{(P_{атм} + \rho_0 g h_0 + h_{w\,вк}) \cdot M \cdot m_{O_2} \cdot k_{эф}} \cdot \left(\frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1}\right). \quad (12)$$

Результаты и их обсуждение. Таким образом, выполнив анализ, полагая в уравнении (12) V равным объему емкости-накопителя конструкции $V_{аэр}$ и приняв объем водоема как $V_{вд} = 1{,}0$ м^3, а также подставив значения постоянных $R = 8{,}31$ Дж/(моль К), $M = 0{,}029$ кг/моль, $m_{\hat{i}_2} = 0{,}3$ кг в 1,0 м^3, получим зависимость $V_{аэр}$ для аэрации 1 м^3 воды водоема:

$$V_{аэр} = 955{,}17 \cdot \frac{(C_{нор}^{O_2} - C_{\hat{o}}^{O_2}) \cdot \rho_в}{(P_{атм} + \rho_0 g h_0 + h_{w\,вк}) \cdot k_{эф}} \cdot \left(\frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1}\right). \quad (13)$$

Очевидно, что под воздействием солнечных лучей из емкости-накопителя будет вытеснена какая-то доля объема воздуха, которая устанавливается по результатам исследований и характеризует коэффициент полезного действия конструкции.

Выводы

По результатам теоретических исследований, с использованием уравнения состояния для термодинамической системы емкости-накопителя с учетом гидродинамических условий работы устройства, получена зависимость для определения основного параметра конструкции – объема емкости-накопителя, необходимого для устранения дефицита кислорода в воде водоема. Это позволит производить расчет и выполнять проектирование устройств для аэрации придонных слоев воды в соответствии с назначением водного объекта.

Список использованных источников

1. Медведева Г.А. Разработка методов и средств использования возобновляемых источников энергии / Г.А. Медведева, З.Р. Хазипова // Инновации и инвестиции. № 4. 2018. С. 244-248. EDN: WAETUJ

2. Виссарионов В.**И**. Обзор аэрационных установок с питанием от солнечных фотоэлектрических батарей / В.И. Виссарионов, Д.Н. Кунакин; МЭИ (ТУ). М.: 2006. 30 с. – Деп. в ВИНИТИ РАН 15.03.2006, № 269-В2006.

3. Лазарев-Марченко С.А. Разработка и исследование режимов плавучей аэрационной установки с питанием от солнечных фотоэлектрических батарей // Вестник МЭИ. 2007, № 3. С. 88-93. EDN: IAMZBX

4. Каримов Б.Х. Ветровой аэратор для рыбных прудов и водоемов / Б.Х. Каримов, Н.И. Каримов, Д.К. Юлдашалиев, С.С. Турсунова // Точная наука, № 49. 2019, С. 29-32. EDN: BXXNCW

5. Патент № 52848 Российская Федерация, МПК C02F 7/00. Солнечная аэрационная система: авт.: В.И. Виссарионов, Д.Н. Кунакин. № 2005137198/22: заявл. 30.11.2005: опубл. 27.04.2006

6. Патент № 147539 Российская Федерация, МПК C02F 7/00. Солнечная мобильная аэрационная система: № 2014108251/05: / Н.Н. Крамчанинов, Т.Г. Болотских, С.М. Лутовинов [и др.]. заявл. 04.03.2014: опубл. 10.11.2014

7. Баженов В.И. Энергосбережение как критерий выбора аэратора / В.И. Баженов, А.Н. Эпов // НДТ. 2012. Спецвыпуск. С. 2-17.

8. Бреховских В.Ф. Гидрофизические факторы формирования кислородного режима водоемов. М.: Наука, 1988. 168 с. ISBN 5-02-003356-1

References

1. Medvedeva G.A. Development of methods and means of using renewable energy sources / G.A. Medvedeva, Z.R. Khazipova // Innovation and investment. No. 4. 2018. P. 244-248. EDN: WAETUJ

2. Vissarionov V.I. Review of aeration installations powered by solar photovoltaic batteries / V.I. Vissarionov, D.N. Kunakin; MEI (TU). M.: 2006. 30 p. Dept. in VINITI RAS03/15/2006, No. 269- In 2006.

3 Lazarev-Marchenko S.A. Development and research of modes of a floating aeration plant powered by solar photovoltaic batteries / S.A. Lazarev-Marchenko // Bulletin of the MEI No. 3, 2007, P. 88-93. EDN: IAMZBX

4. Karimov B.H. Wind aerator for fish ponds and reservoirs / B.H. Karimov, N.I. Karimov, D.K. Yuldashaliev, S.S. Tursunova // Exact Science, No. 49. 2019, P. 29-32. EDN: BXXNCW

5. Patent, No. 52848 Russian Federation, IPC C02F 7/00. Solar aeration system: No. 2005137198/22: application no. 11/30/2005: published on 04/27/2006 / V.I. Vissarionov, D.N. Kunakin.

6. Patent, No. 147539 Russian Federation, IPC C02F 7/00. Solar mobile aeration system: No. 2014108251/05: application 04.03.2014: published 10.11.2014 / N.N. Kramchaninov, T.G. Bolotskikh, S.M. Lutovinov [et al.].

7. Bazhenov V.I. Energy saving as a criterion for choosing an aerator / V.I. Bazhenov, A.N. Epov // NDT. 2012. Special issue. pp. 2-17.

8. Brekhovskikh V.F. Hydrophysical factors of the formation of the oxygen regime of reservoirs / V.F. Brekhovskikh M.: Nauka, 1988. 168 p.

9. Караичев И.Е. Совершенствование методов расчета аэрации водных объектов. Дисс. канд. техн. наук / И.Е. Караичев ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» М.: 2019. 125 с.

10. Патент № 214200 Российская Федерация, МПК C02F 7/00, B01F 23/231. Устройство для аэрации придонных слоев воды: № 2022112382: заявл. 06.05.2022 / В.В. Петрашкевич, П.А. Михеев, Д.М. Бенин, Исмаил Х.А., Петрашкевич А.В., Мунтяну Д.: опубл. 14.10.2022. EDN: GSPJDW

11. Ерина О.Н. Режим растворенного кислорода в стратифицированных водохранилищах Москворецкой системы водоснабжения г. Москвы. / О.Н. Ерина Автореф. … канд. географ. наук. г. Москва. 2015. 25 с.

9. Karaichev I.E. Improvement of methods for calculating the aeration of water bodies. Dissertation of the Candidate of Technical Sciences/ Karaichev National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow: 2019. 125 p.

10. Patent, No. 214200 Russian Federation, IPC C02F 7/00, B01F 23/231. Device for aeration of bottom layers of water: No. 2022112382: application 05/06/2022: published 10/14/2022. EDN: GSPJDW. / V.V. Petrashkevich, P.A. Mikheev, D.M. Benin, Ismail H.A.A., Petrashkevich A.V., Munteanu D.

11. Er O.N. Regime of dissolved oxygen in stratified reservoirs of the Moskvoretsky water supply system in Moscow. / O.N. Er Abstract. … Candidate of Geographical Sciences. the city of Moscow. 2015. 25 p.

Об авторах

Павел Александрович Михеев, д-р техн. наук, профессор; AuthorID: 632792, https://orcid.org/0000-0003-2041-1790; mikheev.pa@gmail.com

Хуссейн Исмаил, аспирант: husseinismaeil93@gmail.com

About the authors

Pavel. A. Mikheev, DSs (Tech), Professor; AuthorID: 632792, https://orcid.org/0000-0003-2041-1790, mikheev.pa@gmail.com

Hussein Ismaeil, post graduate student; husseinismaeil93@gmail.com

Критерии авторства / Authorship criteria

Исмаил Х., Михеев П.А. провели теоретические исследования по результатам которых написали рукопись. Имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Ismail Kh., Mikheev P.A. conducted theoretical research on the results of which they wrote the manuscript. They have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All the authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 10.02.2025

Поступила после рецензирования / Received after peer review 14.08.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 14.08.2025