

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 504.064.4:504.4.062.2:504.455

doi: 10.31774/2712-9357-2025-15-3-17-28

Оценка работы аэратора на солнечной энергии в условиях рыбоводных прудов Тимирязевской академии

Павел Александрович Михеев¹, Хуссейн Исмаил²

^{1, 2}Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

¹mikheev.pa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2041-1790>

²husseinismaeil93@gmail.com

Аннотация. **Цель:** оценка изменений концентрации растворенного кислорода (РК) в воде опытного пруда в процессе работы устройства для аэрации придонных слоев воды при исследуемых параметрах конструкции в естественных климатических условиях и интенсивности солнечной радиации. **Материалы и методы.** Исследования проводились в условиях рыбоводных прудов Тимирязевской академии с использованием двух площадок: выростного пруда с системой постоянного водообмена и резервного пруда без водообмена. К исследованиям были приняты две конструкции устройств для аэрации придонных слоев воды, защищенные патентами на полезную модель. Концентрация РК в процессе работы экспериментального устройства производилась с помощью анализатора «MARK-302T» на глубине воды в области выхода пузырьков из воздуховода. **Результаты.** Исследования конструкций устройств для аэрации придонных слоев воды (первого в виде емкости-накопителя с впускным и выпускным клапанами и воздуховодом и второго, оснащенного колпаком в виде перевернутого усеченного конуса с внутренней поверхностью из светоотражающего материала) показали, что использование колпака в устройстве по второму варианту позволяет увеличить температуру воздействия солнечной инсоляции на 15–20 %. Установлено, что в процессе работы устройства концентрация РК в воде пруда повышается. **Выводы.** Натурные исследования аэратора на солнечной энергии в условиях прудов лаборатории прудового рыбоводства Тимирязевской академии показали, что конструкция с использованием светоотражающего колпака позволяет увеличить температуру воздействия солнечной инсоляции и интенсивность работы в целом, а повышение концентрации РК более чем в три раза в результате работы экспериментальных устройств следует рассматривать как перспективную возможность аэрации водных объектов с помощью устройств, основанных на использовании солнечной энергии.

Ключевые слова: показатели качества воды, аэратор, пруд, РК, температура воздуха, оксиметр

Финансирование: 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».

Для цитирования: Михеев П. А., Исмаил Х. Оценка работы аэратора на солнечной энергии в условиях рыбоводных прудов Тимирязевской академии // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 3. С. 17–28. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-3-17-28>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Assessment of the solar-powered aerator operation in the fish ponds of Timiryazev Academy

Pavel A. Mikheev¹, Hussein Ismaeil²

^{1, 2}Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

¹mikheev.pa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2041-1790>

²husseinismaeil93@gmail.com

Abstract. Purpose: to evaluate changes in the concentration of dissolved oxygen (DO) in water of the experimental pond during operation of a device for aeration of the water bottom layers with the studied design parameters under natural climatic conditions and solar radiation intensity. **Materials and methods.** The studies were conducted in fish ponds of Timiryazev Academy using two sites: a nursery pond with a system of constant water exchange and a reserve pond without water exchange. Two designs of devices for aeration of the water bottom layers, protected by patents for a utility model, were accepted for the studies. The DO concentration during operation of the experimental device was produced using the “MARK-302T” analyzer at the water depth in the area of the bubbles exit from the air pipe. **Results.** Research of designs of devices for aeration of water bottom layers (the first in the form of a storage tank with inlet and outlet valves and an air pipe, and the second, equipped with a cap in the form of an inverted truncated cone with an inner surface made of reflective material) showed that the use of a cap in the device according to the second version allows to increase the temperature of exposure to solar insolation by 15–20 %. It was determined that during the device operation, the concentration of DO in the pond water increases. **Conclusions.** Field studies of a solar-powered aerator in the ponds of the pond fish farming laboratory of Timiryazev Academy showed that the device with a reflective cap allows to increase the temperature of solar insolation exposure and the intensity of operation as a whole, and an increase in the DO concentration by more than three times as a result of the operation of experimental devices should be considered as a promising opportunity for aeration of water bodies using devices based on the use of solar energy.

Keywords: water quality indicators, aerator, pond, DO, air temperature, oximeter

Funding: this work was supported by the Russian Ministry of Education and Science under Agreement No. 075-15-2022-317 of April 20, 2022, on the grant provision in the form of subsidies from the federal budget for the implementation of state support for the creation and development of a world-class scientific center, “Agrotechnologies of the Future”.

For citation: Mikheev P. A., Ismaeil H. Assessment of the solar-powered aerator operation in the fish ponds of Timiryazev Academy. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2025;15(3):17–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-3-17-28>.

Введение. Обеспечение показателей качества воды и экологического состояния поверхностных источников в условиях изменения климата является весьма сложной и важной задачей современного водопользования. Как отмечают отечественные и зарубежные исследования, показатели качества воды во многом связаны с результатами антропогенного влияния на водные экосистемы и с воздействием различных загрязнителей комму-

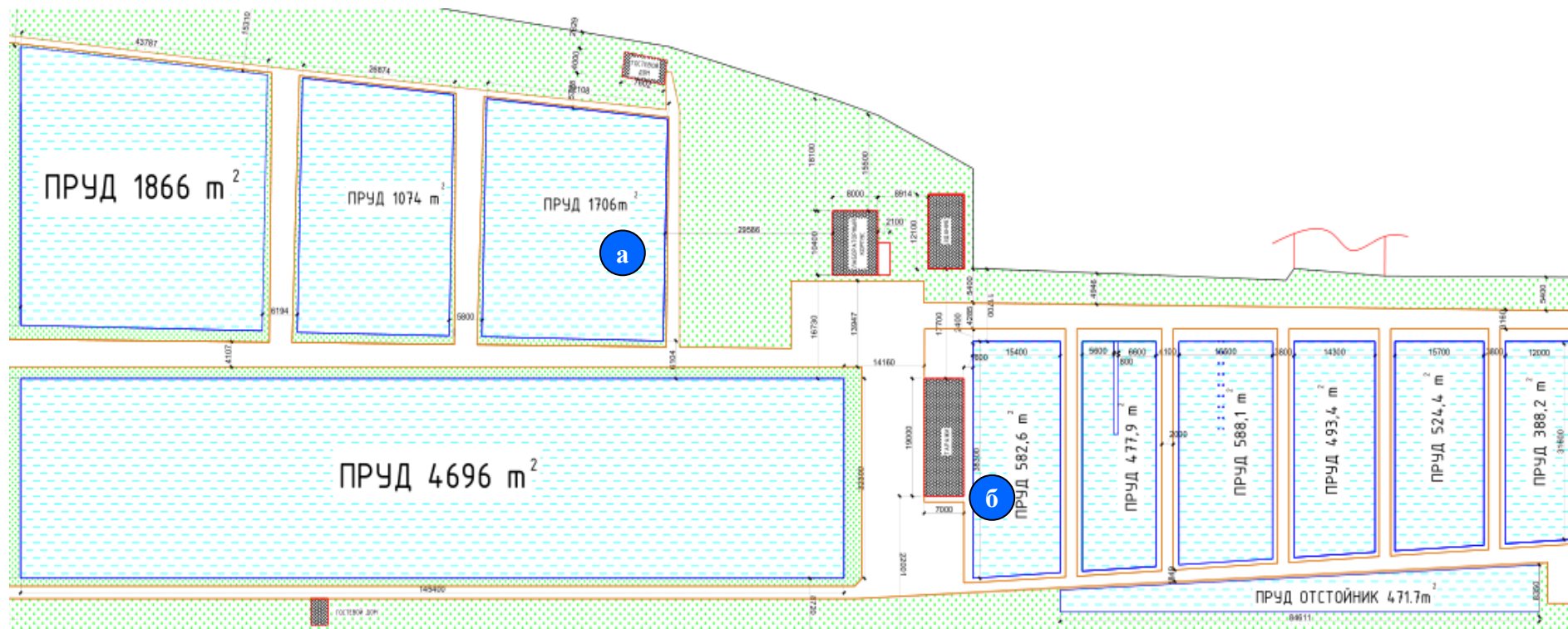
нального хозяйства, промышленности и сельского хозяйства [1, 2]. Обще-принятыми физико-химическими параметрами качества воды являются РК, водородный показатель pH, температура, мутность и биохимическое потребление кислорода (БПК) [3, 4].

Аэрация воды является распространенным процессом подачи кислорода с целью улучшения качества водной среды. Необходимость изучения и совершенствования конструкций аэраторов, схем и технологий аэрации, а также разработки научных рекомендаций по использованию аэраторов является одним из путей повышения эффективности рыбоводства [5].

Одним из основных показателей в оценке успешности работы аэратора естественных водоемов является увеличение содержания РК в воде [6, 7]. В этой связи разработанные конструкции устройств для аэрации придонных слоев воды [8, 9] требуют апробации и подтверждения эффективности воздействия на изменение параметров среды в опытном водоеме.

Целью натурных исследований являлась оценка изменений концентрации растворенного кислорода в воде опытного пруда в процессе работы устройства для аэрации придонных слоев воды при исследуемых параметрах конструкции в естественных климатических условиях и интенсивности солнечной радиации.

Материалы и методы. Натурные исследования устройства для аэрации придонных слоев воды на солнечной энергии проводились в июле – августе 2024 г. на прудах лаборатории прудового рыбоводства кафедры аквакультуры и пчеловодства РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева, на территории которой расположены десять прудов учебного, научного и производственного назначения, имеющих различные размеры. Общая площадь прудов составляет 12396,6 м². Для исследований рассматривались две площадки: выростной пруд площадью 1706 м² с системой постоянного водообмена и резервный пруд площадью 582,6 м² без водообмена. План прудов лаборатории прудового рыбоводства и места размещения опытных станций приведены на рисунке 1.



a – выростной пруд; *б* – резервный пруд
a – nursery pond; *b* – reserve pond

Рисунок 1 – План прудов лаборатории прудового рыбоводства РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева и места установки экспериментального устройства

Figure 1 – Plan of ponds of the Pond Fish Laboratory of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy and the installation site of the experimental device

В задачи исследований входило определение фоновых значений содержания растворенного кислорода в прудах, основных параметров работы экспериментального устройства для аэрации придонных слоев воды и возможностей изменения значений РК при их работе в климатических условиях и интенсивности солнечной радиации опытных прудов.

К исследованиям были приняты две конструкции устройств для аэрации придонных слоев воды. Первое в виде металлической емкости-накопителя с впускным и выпускным клапанами и воздухопроводом в соответствии с патентом на полезную модель [8], получившее апробацию в натуральных условиях Сирии [9]. Вторая конструкция была оснащена колпаком в виде перевернутого усеченного конуса с внутренней поверхностью из светоотражающего (фольгированного) материала, позволяющего повысить интенсивность и объем аэрации воды за счет концентрации прямых и отраженных от светоотражающей поверхности солнечных лучей на поверхности емкости-накопителя и защиты от охлаждающего воздействия ветра в соответствии с патентом на полезную модель [10]. В процессе исследований было установлено, что работа первой конструкции, в отличие от условий Сирии, в значительной степени зависит от воздействия ветра. Эта конструкция показала низкую эффективность в диапазоне температур воздуха, наблюдаемых в процессе эксперимента. В то же время использование колпака в устройстве по второму варианту позволило увеличить температуру воздействия солнечной инсоляции на 15–20 %, поэтому в дальнейшем основной объем исследований был проведен с использованием устройства с колпаком (рисунок 2).

На начальном этапе исследования показали, что фоновая концентрация растворенного кислорода в выростном пруду находилась в пределах

нормативных значений¹, что затрудняло оценку работы экспериментального устройства. В этой связи дальнейшие исследования проводились только в резервном пруду в условиях с пониженным содержанием РК.



Рисунок 2 – Экспериментальная установка для оценки содержания РК в условиях резервного пруда (автор фото Хуссейн Исмаил)

Figure 2 – Experimental device for assessing DO content in a reserve pond (photo by Hussein Ismail)

Исследования по оценке изменения концентрации РК в процессе работы экспериментального устройства производились с помощью анализатора растворенного кислорода «MARK-302Т» (оксиметра) на глубине воды в области выхода пузырьков из выпускного клапана трубки-воздуховода.

Диапазон измеряемых прибором параметров значений концентрации

¹Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения [Электронный ресурс]: Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

РК при температуре анализируемой среды 20 °С (от 0 до 10,00 мг/л) с погрешностью $\pm (0,003 + 0,04C_{\text{РК}})$, где $C_{\text{РК}}$ – измеренное значение концентрации РК, мг/л, а температур (от 0 до +50 °С) с погрешностью $\pm 0,3$.

Экспериментальная установка размещалась на поплавке из пеноплэкса размером 60 × 120 см, толщиной 10 см, на котором по кругу с углом 45° были выполнены отверстия для обеспечения свободного размещения датчика анализатора «МАРК-302Т» в зоне установки обратного клапана устройства, который погружался на один метр ниже уровня воды в пруду. В связи с тем, что целью устройства является насыщение кислородом воздуха донных слоев воды, в опытах датчик прибора выставлялся на глубине 90 см от поверхности воды на расстоянии 5 см от трубки-воздуховода, т. е. на 10 см выше выпускного клапана, в зоне выхода пузырьков воздуха.

В начале опыта фиксировались температура наружного воздуха и внутри емкости-накопителя, а также фоновая концентрация растворенного кислорода в воде пруда РК₀. После установки модели устройства и видеокамеры фиксировался момент выхода первого пузырька, и в последующем через каждые 5 мин считывались текущие показания концентрации РК_i на индикаторе оксиметра. С выходом последнего пузырька, фиксацией продолжительности работы устройства и показаний оксиметра опыт завершался, емкость-накопитель снималась, охлаждалась до температуры наружного воздуха и опыт повторялся. В процессе экспериментов по данным метеорологической обсерватории имени В. А. Михельсона РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева уточнялись данные по температуре воздуха, направлению и скорости ветра. Всего в период с 16.08.2024 по 03.09.2024 г. было проведено 30 опытов в довольно узком диапазоне изменения температуры воздуха в пределах 23,9–24,8 °С в период с 9-00 до 12-00 ч московского времени. Следует отметить, что фоновая концентрация растворенного кислорода в воде пруда РК₀ в опытах была разной. Так в опытах при объеме емкости-накопителя 6,5 л изменялась от 0,346 до 0,354 мг/л, соответственно при

объеме 10,0 л – в пределах 0,266–0,572 мг/л и при объеме 13,5 л – от 0,514 до 0,697 мг/л.

Результаты и обсуждение. Динамика изменения концентрации РК в процессе работы устройств исследуемых конструкций представлена в виде кривых зависимостей $PK = f(t)$, приведенных на рисунке 3.

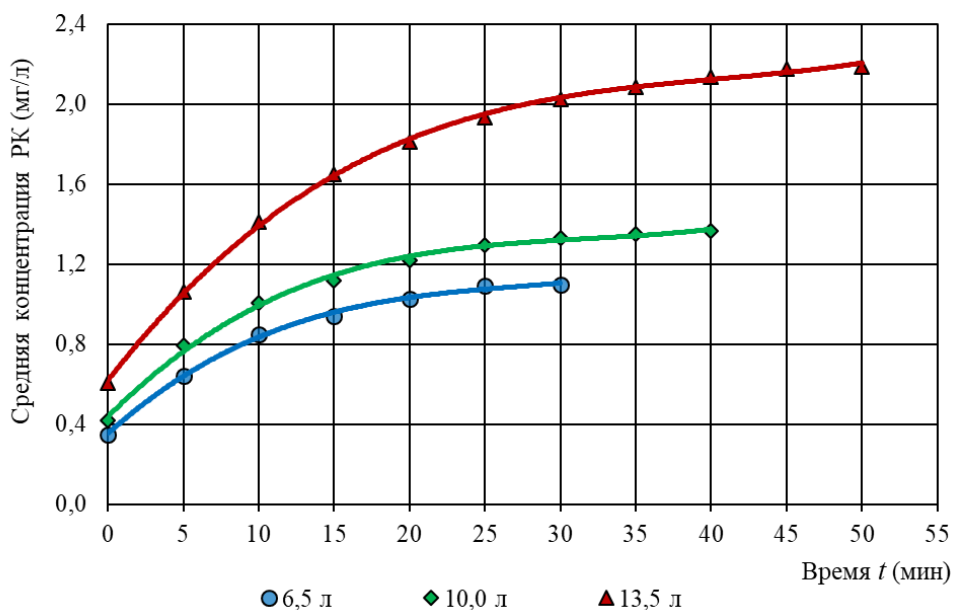


Рисунок 3 – Изменения концентрации РК в процессе работы устройства с разным объемом емкости-накопителя

Figure 3 – Changes in DO concentration during the device operation with different storage capacity

Уравнения регрессии, для соответствующих условий эксперимента получены в виде:

$$PK_{6,5} = 0,00003t^3 - 0,0022t^2 + 0,0677t + 0,3531, \quad R^2 = 0,9981;$$

$$PK_{10,0} = 0,00002t^3 - 0,0022t^2 + 0,0756t + 0,4378, \quad R^2 = 0,9962;$$

$$PK_{13,5} = 0,00002t^3 - 0,0023t^2 + 0,0982t + 0,6171, \quad R^2 = 0,9993.$$

Прежде всего, эксперименты показали, что продолжительность насыщения РК, как и объем выхода воздуха при работе устройства, прямо пропорционален объему емкости-накопителя, что согласуется с данными лабораторных опытов [11].

Как видно по характеру кривых, закономерности насыщения воды РК

подобны, не зависят от объема емкости-накопителя и свидетельствуют о стабильности изучаемого процесса, что согласуется с материалами исследований, полученных в условиях водохранилища 16 Тишрин в Сирии [9, 11]. Вместе с тем с увеличением объема устройства период стабилизации уровня РК увеличивается.

В целом результаты исследований позволяют отметить следующее.

1 Процесс работы устройства можно разделить на два основных периода: первый интенсивный, продолжительностью до 25 мин, когда содержание РК увеличивается более чем втрое, и второй затухающий, что также отражает процесс работы устройства, т. е. постепенной остановки для последующего заполнения емкости-накопителя атмосферным воздухом.

2 Продолжительность работы устройства зависит от объема емкости-накопителя и за один цикл позволяет более чем в три раза повысить концентрацию РК в месте расположения в водоеме.

Сопоставление данных по количественному изменению показателей РК, полученных в климатических условиях прудов Тимирязевской академии и водохранилища 16 Тишрин в Сирии [9], показывает, что во втором случае концентрация РК увеличивалась с меньшей интенсивностью, что можно объяснить более высоким фоновым значением концентрации РК в водохранилище (порядка 4,5 мг/л).

Выводы. Натурные исследования аэратора на солнечной энергии в условиях прудов лаборатории прудового рыбоводства Тимирязевской академии показали, что конструкция с использованием светоотражающего колпака позволяет увеличить температуру воздействия солнечной инсоляции и интенсивность работы в целом, а повышение концентрации РК более чем в три раза в результате работы экспериментальных устройств следует рассматривать как перспективную возможность аэрация водных объектов с помощью устройств, основанных на использовании солнечной энергии.

Список источников

1. Данилов-Данильян В. И. Водные ресурсы России: состояние, использование, охрана, проблемы управления // Экономика. Налоги. Право. 2019. Т. 12, № 5. С. 18–31. DOI: 10.26794/1999-849X-2019-12-5-18-31. EDN: CEKLRT.
2. Klimaszyk P., Gołdyn R. Water quality of freshwater ecosystems in a temperate climate // Water. 2020. Vol. 12, no. 9. Article number: 2643. DOI: 10.3390/w12092643. EDN: ZMLYVU.
3. Бреховских В. Ф. Гидрофизические факторы формирования кислородного режима водоемов. М.: Наука, 1988. 168 с. EDN: ZJNWAF.
4. Пономарев А. Я. Растворенный кислород как важнейший биогидрохимический показатель качества воды // Научный альманах. 2015. № 12-2(14). С. 146–149. DOI: 10.17117/na.2015.12.02.146. EDN: VKMDWB.
5. Промышленные и альтернативные аэраторы на основе зеленой энергетики для рыбных водоемов и озер: монография / И. Х. Алиев, Ш. Б. Каримов, Б. Х. Каримов, Д. К. Юлдошалиев; Науч. шк. «Электрон». [Б. м.]: Интеллект. издат. система «Ridero», 2022. 221 с.
6. Савушкин С. С., Давшан С. М. Улучшение качества воды в открытых водоемах за счет использования систем аэрации // Природообустройство. 2009. № 2. С. 39–42. EDN: KWVMGD.
7. Зиновьев А. Т., Кошелев К. Б., Дьяченко А. В. Анализ результатов моделирования и натурных данных содержания растворенного кислорода в Телецком озере // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 6. С. 57–69. DOI: 10.35567/19994508_2023_6_5. EDN: AJZWZQ.
8. Пат. на полезную модель 214200 Российская Федерация, МПК⁶ C02F 7/00, МПК²² B01F 23/231. Устройство для аэрации придонных слоев воды / Петрашкевич В. В., Михеев П. А., Бенин Д. М., Исмаил Х. Абд Алкарим, Петрашкевич А. В., Мунтяну Д.; патентообладатель РГАУ – МСХА им. К. А. Тимирязева (RU). № 2022112382; заявл. 06.05.22; опубл. 14.10.22, Бюл. № 29.
9. Исмаил Х., Михеев П. А. Натурные исследования устройства для аэрации воды водохранилища «16 Тишрин» в Сирии // Природообустройство. 2024. № 5. С. 104–109. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-5-104-109. EDN: BRHZSB.
10. Пат. на полезную модель 232338 Российская Федерация, МПК⁶ C02F 7/00. Устройство для аэрации придонных слоев воды / Михеев П. А., Коноплин Н. А., Бенин Д. М., Гавриловская Н. В., Исмаил Х.; патентообладатель РГАУ – МСХА им. К. А. Тимирязева (RU). № 2024129511; заявл. 02.10.24; опубл. 07.03.25. Бюл. № 7.
11. Исмаил Х. Об устройстве для аэрации придонных слоев воды в условиях Сирии // Наука и глобальные вызовы: перспективы развития: сб. ст. IV Междунар. науч.-практ. конф., г. Саратов, 10 марта 2024 г. Саратов: НОП «Цифровая наука», 2024. С. 17–22.

References

1. Danilov-Danilyan V.I., 2019. *Vodnye resursy Rossii: sostoyanie, ispol'zovanie, okhrana, problemy upravleniya* [Water resources of Russia: state, utilization, protection, management issues]. *Ekonomika. Nalogi. Pravo* [Economics. Taxes. Law], vol. 12, no. 5, pp. 18-31, DOI: 10.26794/1999-849X-2019-12-5-18-31, EDN: CEKLRT. (In Russian).
2. Klimaszyk P., Gołdyn R., 2020. Water quality of freshwater ecosystems in a temperate climate. *Water*, vol. 12, no. 9, article number: 2643, DOI: 10.3390/w12092643, EDN: ZMLYVU.
3. Brekhovskikh V.F., 1988. *Gidrofizicheskie faktory formirovaniya kislorodnogo rezhima*

vodoemov [Hydrophysical Factors of Water Bodies Oxygen Regime Formation]. Moscow, Nauka Publ., 168 p., EDN: ZJNWF. (In Russian).

4. Ponomarev A.Ya., 2015. *Rastvorennyy kislorod kak vazhneyshiy biogidrokhimicheskiy pokazatel' kachestva vody* [Dissolved oxygen as the most important biohydrochemical indicator of water quality]. *Nauchnyy al'manakh* [Scientific Almanac], no. 12-2(14), pp. 146-149, DOI: 10.17117/na.2015.12.02.146, EDN: VKMDWB. (In Russian).

5. Aliyev I.Kh., Karimov Sh.B., Karimov B.Kh., Yuldoshaliev D.K., 2022. *Promyshlennyye i al'ternativnyye aeratory na osnove zelenoy energetiki dlya rybnykh vodoemov i ozer: monografiya* [Industrial and Alternative Aerators Based on Green Energy for Fish Reservoirs: monograph]. Scientific school “Electron”. Intelligent Publishing System “Ridero” Publ., 221 p. (In Russian).

6. Savushkin S.S., Davshan S.M., 2009. *Uluchshenie kachestva vody v otkrytykh vodoemakh za schet ispol'zovaniya sistem aeratsii* [Improvement of water quality in open ponds due to usage of aeration systems]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 2, pp. 39-42, EDN: KWVMGD. (In Russian).

7. Zinoviev A.T., Koshelev K.B., Dyachenko A.V., 2023. *Analiz rezul'tatov modelirovaniya i naturnykh dannykh soderzhaniya rastvorennogo kisloroda v Teletskom ozere* [Modeling and observations of dissolved oxygen content in the Lake Teletskoye]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management], no. 6, pp. 57-69, DOI: 10.35567/19994508_2023_6_5, EDN: AJZWZQ. (In Russian).

8. Petrashkevich V.V., Mikheev P.A., Benin D.M., Ismail H. Abd Alkarim, Petrashkevich A.V., Muntyanu D., 2022. *Ustroystvo dlya aeratsii pridonnykh sloev vody* [Device for Aeration of Water Bottom Layers], Patent RF, no. 214200. (In Russian).

9. Ismail H., Mikheev P.A., 2024. *Naturnye issledovaniya ustroystva dlya aeratsii vody vodokhranilishcha «16 Tishrin» v Sirii* [Field studies of the water aeration device of the 16 Tishrin reservoir in Syria]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 5, pp. 104-109, DOI: 10.26897/1997-6011-2024-5-104-109, EDN: BRHZSB. (In Russian).

10. Mikheev P.A., Konoplin N.A., Benin D.M., Gavrilovskaya N.V., Ismail H., 2024. *Ustroystvo dlya aeratsii pridonnykh sloev vody* [Device for Aeration of Bottom Layers of Water]. Patent RF, no. 232338. (In Russian).

11. Ismail H., 2024. *Ob ustroystve dlya aeratsii pridonnykh sloev vody v usloviyakh Sirii* [On the device for aeration of bottom layers of water in Syria]. *Nauka i global'nye vyzovy: perspektivy razvitiya: sb. st. IV Mezhdunar. nauchno-prakt. konferentsii* [Science and Global Challenges: Development Prospects: Collect. of Articles. IV International Scientific-Practical Conference]. Saratov, NOP “Digital Science”, pp. 17-22. (In Russian).

Информация об авторах

П. А. Михеев – доктор технических наук, профессор, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), mikheev.pa@gmail.com, AuthorID: 632792, ORCID: 0000-0003-2041-1790;
Х. Исмаил – аспирант, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), husseinismaeil93@gmail.com.

Information about the authors

P. A. Mikheev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127434, Moscow, Timiryazevskaya Street, 49), mikheev.pa@gmail.com, AuthorID: 632792, ORCID: 0000-0003-2041-1790;
H. Ismaeil – Postgraduate Student, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127434, Moscow, Timiryazevskaya Street, 49), husseinismaeil93@gmail.com.

Вклад авторов: П. А. Михеев – формирование основной концепции, целей и задач исследований, разработка моделей и методики, анализ результатов, участие в формулировании выводов и написании статьи. Х. Исмаил – разработка моделей, проведение исследований, анализ результатов, участие в написании статьи.

Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: P. A. Mikheev – formed the main concept, goals and objectives of the research, developed models and methods, analyzed the results, participated in formulating conclusions and writing the article. H. Ismail – developed models, conducted research, analyzed results, participate in writing the article.

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 03.07.2025; одобрена после рецензирования 12.08.2025; принята к публикации 16.09.2025.

The article was submitted 03.07.2025; approved after reviewing 12.08.2025; accepted for publication 16.09.2025.