Научная статья
УДК 639.371.2.04:639.3.041.2
doi:10.35694/YARCX.2025.69.1.009

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РАБОТЫ АППАРАТА ВЕЙСА ПРИ ИНКУБАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ИКРЫ ЛЕНСКОГО ОСЕТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Владимир Викторович Шмигель[1], Вера Витальевна Жолудева[2], Анна Дмитриевна Кутина[3]
[1, 2, 3]Ярославский государственный аграрный университет, Ярославль, Россия
[1]volod49@mail.ru
[2]zholudeva@yarcx.ru, ORCID 0000-0001-9194-6659
[3]kutina@yarcx.ru

Реферат. Индустрия аквакультуры в последние десятилетия является самым быстрорастущим сектором сельского хозяйства. Поэтому возникает необходимость разработки технологических приёмов получения рыбопосадочного материала и выращивания товарной продукции, позволяющих повысить эффективность процесса воспроизводства и выращивания рыбы в аквакультуре, в частности осетра ленской популяции. В статье приводится оптимизация технологического процесса работы аппарата Вейса при инкубации икры ленского осетра с использованием электростатического поля. С этой целью проведён анализ регрессионных моделей технологической эффективности процесса в зависимости от таких факторов, как потенциал электрода, скорость потока и направление потока воды. В результате исследования получено, что взаимосвязь между скоростью потока воды и технологической эффективностью процесса достигает наибольшего значения, если скорость потока воды в аппарате Вейса равна 35,2 м/с. Взаимосвязь между направлением потока воды и эффективностью процесса достигает наибольшего значения, если направление потока воды в аппарате Вейса равно 75°. Технологическая эффективность процесса достигает также наибольшего значения, если потенциал электрода равен 40,88 кВ. Таким образом, применение статистических методов обработки информации и математических методов оптимизации является важным инструментом для современных научных исследований, особенно при проведении экспериментов с живыми объектами.

Ключевые слова: *рыбоводство, аквакультура, аппарат Вейса, электростатическое поле, статистика, математический анализ, регрессия, оптимизация, технологическая эффективность, ленский осётр, оплодотворённая икра*

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF WEISS APPARATUS OPERATION DURING INCUBATION USING THE EXAMPLE OF LENA STURGEON CAVIAR USING ELECTROSTATIC FIELD

Vladimir V. Shmigel[1], Vera V. Zholudeva[2], Anna D. Kutina[3]
[1, 2, 3]Yaroslavl State Agrarian University, Yaroslavl, Russia
[1]volod49@mail.ru
[2]zholudeva@yarcx.ru, ORCID 0000-0001-9194-6659
[3]kutina@yarcx.ru

Abstract. The aquaculture industry has been the fastest growing agricultural sector in recent decades. Therefore, there is a need to develop technological methods for obtaining stock fry and growing commercial production, which make it possible to increase the efficiency of the process of reproduction and cultivation of fish in aquaculture, in particular sturgeon of the Lena population. The article provides optimization of the technological process of the Weiss apparatus during incubation of Lena sturgeon caviar using an electrostatic field. For this purpose, an analysis of regression models of the technological efficiency of the process was carried out depending on such factors as electrode potential, flow rate and water flow direction. As a result of the study, it was found that the relationship between the water flow rate and the technological efficiency of the

process reaches the highest value if the water flow rate in the Weiss apparatus is 35.2 m/s. The relationship between the direction of water flow and the efficiency of the process reaches its greatest value if the direction of water flow in the Weiss apparatus is 75°. The technological efficiency of the process also reaches the highest value if the electrode potential is 40.88 kV. Thus, the use of statistical information processing methods and mathematical optimization methods is an important tool for modern scientific research, especially when conducting experiments with living objects.

Keywords: fish breeding, aquaculture, Weiss apparatus, electrostatic field, statistics, mathematical analysis, regression, optimization, technological efficiency, sturgeon, Lena sturgeon, impregnated roe

Введение. Индустрия аквакультуры в последние десятилетия является самым быстрорастущим сектором сельского хозяйства. Это связано с тем, что производство продуктов аквакультуры в том числе направлено и на увеличение продовольственной безопасности, и занятости населения. Доля аквакультуры (рыбоводства) в 2021 году составляла 8,3% от общего объёма национальных рыбных ресурсов [1]. По данным Федерального агентства по рыбоводству, объём производства аквакультуры в Российской Федерации в 2023 году составил 40 тыс. т, что на 4,8% выше по сравнению с 2022 годом [2].

В настоящее время для повышения эффективности в аквакультуре используются различные технологии [3], в том числе на рыбоводных хозяйствах не обойтись без инкубационного оборудования. Поэтому возникает необходимость разработки технологических приёмов получения рыбопосадочного материала и выращивания товарной продукции, позволяющих повысить эффективность процесса воспроизводства и выращивания рыбы в аквакультуре, в частности осетра ленской популяции.

Авторы данного исследования занимаются изучением влияния электростатического поля при инкубации икры ленского осетра. В ранних публикациях была обоснована эффективность наложения электростатического поля через систему электродов для снижения потери личинок и проведено математическое моделирование и обработка эксперимента с икрой осетра в аппарате Вейса. Были получены регрессионные модели зависимости технологической эффективности процесса от ряда критериев [4; 5].

Важным аспектом авторы считают возможность определения таких значений показателей, при которых эффективность работы аппарата Вейса была бы оптимальной. Таким образом, целью данного исследования является оптимизация параметров режима работы аппарата Вейса при инкубации икры ленского осетра с использованием электростатического поля.

Материалы и методы исследования. При проведении исследования авторами была применена методология, базирующаяся на статистических методах обработки информации, а также математических методах оптимизации. Это обусловлено тем, что статистический анализ данных является важным инструментом для современных научных исследований. С колоссальным ростом цифровых данных и возрастающей сложностью исследовательских вопросов статистические методы стали незаменимыми для понимания, интерпретации и передачи научных результатов [6; 7].

Проведение математического и статистического анализа в научной работе, связанной с электростатическими полями, определяет точное влияние данных полей на живые организмы, в частности, на оплодотворённую икру ленского осетра.

Результаты исследования. В ранее опубликованной авторами работе [5] были выделены факторы, оказывающие влияние на процесс инкубации и дающие его максимально возможную технологическую эффективность. К таким факторам авторы отнесли потенциал электрода, скорость потока воды в аппарате Вейса и направление потока воды. Были получены регрессионные модели зависимости технологической эффективности процесса (Y) от каждого из представленных выше факторов. На основе математического анализа была исследована каждая модель на оптимизацию (максимальное значение функции).

1. Регрессионная модель, наиболее точно и адекватно описывающая зависимость технологической эффективности процесса (Y) и потенциала электрода (X), имеет вид:

$$Y = -0{,}00004X^3 + 0{,}004X^2 - 0{,}1265X + 1{,}8219.$$

Для нахождения максимального значения функции, вычислим её производную:

$$Y'(X) = -0{,}00012X^2 + 0{,}008X - 0{,}1265;$$
$$-0{,}00012X^2 + 0{,}008X - 0{,}1265 = 0;$$
$$X_1 \approx 25{,}79;\ X_2 \approx 40{,}88;$$
$$Y''(X) = -0{,}00024X + 0{,}008;$$
$$Y''(40{,}88) = -0{,}00024 \cdot 40{,}88 + 0{,}008 = -0{,}0018 < 0;$$
$$Y''(25{,}79) = -0{,}00024 \cdot 25{,}79 + 0{,}008 = 0{,}0018 > 0.$$

Так как вторая производная функции при X = 40,88 принимает отрицательные значения, следовательно, эта точка является точкой максимума, и в ней функция принимает наибольшее значение:

$$Y_{наиб.} = -0{,}00004 \cdot 40{,}88^3 + 0{,}004 \cdot 40{,}88^2 - 0{,}1265 \cdot 40{,}88 + 1{,}8219 = 0{,}6394.$$

Таким образом, технологическая эффективность процесса достигает наибольшего зна-

чения 0,6394, если потенциал электрода равен 40,88 кВ.

2. Взаимосвязь между скоростью потока воды (X) и технологической эффективностью процесса (Y) описывается параболической моделью:

$$Y = -0{,}0005X^2 + 0{,}0352X - 0{,}0054.$$

Результаты дифференцирования функции:

$$Y'(X) = -0{,}001X + 0{,}0352;\ Y''(X) = -0{,}001;$$
$$X = 35{,}2 \text{ – точка максимума;}$$
$$Y_{наиб.} = -0{,}0005 \cdot 35{,}2^2 + 0{,}0352 \cdot 35{,}2 - 0{,}0054 = 0{,}6141.$$

Таким образом, технологическая эффективность процесса достигает наибольшего значения 0,6141, если скорость потока воды в аппарате Вейса равна 35,2 м/с.

3. Полином четвёртой степени наиболее точно описывает взаимосвязь между направлением потока воды (X) и эффективностью процесса (Y):

$$Y = -0{,}0967X^4 - 0{,}05X^3 + 0{,}2842X^2 + 0{,}1125X + 0{,}6.$$

Результаты применения методов математического анализа:

$$Y'(X) = -0{,}3868X^3 - 0{,}15X^2 + 0{,}5684X + 0{,}1125;$$
$$-0{,}3868X^3 - 0{,}15X^2 + 0{,}5684X + 0{,}1125 = 0;$$
$$X_1 = -1{,}5;\ X_2 = 0{,}5;\ X_3 = 0{,}75.$$
$$Y''(X) = -1{,}1604X^2 - 0{,}3X + 0{,}5684;$$
$$Y''(0{,}5) = -1{,}1604 \cdot 0{,}5^2 - 0{,}3 \cdot 0{,}5 + 0{,}5684 = 0{,}1283;$$
$$Y''(0{,}75) = -1{,}1604 \cdot 0{,}75^2 - 0{,}3 \cdot 0{,}75 + 0{,}5684 = -0{,}3093.$$

Так как при $X = 0{,}75$ вторая производная функции отрицательна, значит, $X = 0{,}75$ является точкой максимума, и в ней функция имеет наибольшее значение, равное:

$$Y = -0{,}0967 \cdot 0{,}75^4 - 0{,}05 \cdot 0{,}75^3 + 0{,}2842 \cdot 0{,}75^2 + 0{,}1125 \cdot 0{,}75 + 0{,}6 = 0{,}7925.$$

Следовательно, технологическая эффективность процесса достигает наибольшего значения 0,7925, если направление потока воды в аппарате Вейса равно 75°.

Выводы. Проведён анализ регрессионных моделей технологической эффективности в зависимости от разных факторов с точки зрения оптимизации режима работы аппарата Вейса. В ходе исследования получены следующие выводы:

1) технологическая эффективность процесса достигает наибольшего значения, если потенциал электрода равен 40,88 кВ;

2) взаимосвязь между скоростью потока воды и технологической эффективностью процесса достигает наибольшего значения, если скорость потока воды в аппарате Вейса равна 35,2 м/с;

3) взаимосвязь между направлением потока воды и эффективностью процесса достигает наибольшего значения, если направление потока воды в аппарате Вейса равно 75°.

Список источников

1. Труба М. А. Развитие пресноводной аквакультуры в России: состояние и перспективы отрасли // Экономика сельского хозяйства России. 2022. № 10. С. 66–70. DOI 10.32651/2210-66. EDN QUCOTC.

2. Федеральное агентство по рыболовству. Сайт. URL. https://fish.gov.ru/news/2024/02/09/proizvodstvo-akvakultury-v-rf-v-2023-godu-vyroslo-na-48-do-402-tys-t/ (дата обращения: 17.01.2025).

3. Шмигель В. В., Угловский А. С., Уткина Ю. С. Fabtracker: измерение временной прогрессии уровней активности рыб с помощью лабораторных видеонаблюдений // Международный технико-экономический журнал. 2020. № 6. С. 7–13. DOI 10.34286/1995-4646-2020-75-6-7-13. EDN DDWUYG.

4. Шмигель В. В., Жолудева В. В., Кутина А. Д. Инкубация икры осетра с использованием электростатического поля // Вестник АПК Верхневолжья. 2024. № 2 (66). С. 93–97. DOI 10.35694/YARCX.2024.66.2.012. EDN DUTEIH.

5. Шмигель В. В., Жолудева В. В., Кутина А. Д. Математическое планирование и обработка эксперимента с икрой ленского осетра в аппарате Вейса при наложении на колбу с электродами электростатического поля // Вестник АПК Верхневолжья. 2024. № 1 (65). С. 119–127. DOI 10.35694/YARCX.2024.65.1.017. EDN TOXNIY.

6. Ломовской Р. А. Статистический анализ данных: методы и приложения в научных исследованиях // Актуальные исследования. 2023. № 15-1 (145). С. 29–34. DOI 10.51635/27131513_2023_15_1_29. EDN FRUMKG.

7. Леванова Е. Ю., Данилова Н. Л., Хусаинова А. С. Методы и последовательность проведения экономико-статистического анализа финансовой устойчивости экономического субъекта // Вестник Российского университета кооперации. 2021. № 3 (45). С. 24–29. DOI 10.52623/2227-4383-3-45-5. EDN SNMKZK.

References

1. Truba M. A. Razvitie presnovodnoj akvakul'tury v Rossii: sostoyanie i perspektivy otrasli // Ekonomika sel'skogo hozyajstva Rossii. 2022. № 10. S. 66–70. DOI 10.32651/2210-66. EDN QUCOTC.

2. Federal'noe agentstvo po rybolovstvu. Sajt. URL. https://fish.gov.ru/news/2024/02/09/proizvodstvo-akvakultury-v-rf-v-2023-godu-vyroslo-na-48-do-402-tys-t/ (data obrashcheniya: 17.01.2025).

3. Shmigel' V. V., Uglovskij A. S., Utkina Yu. S. Fabtracker: izmerenie vremennoj progressii urovnej aktivnosti ryb s pomoshch'yu laboratornyh videonablyudenij // Mezhdunarodnyj tekhniko-ekonomicheskij zhurnal. 2020. № 6. S. 7–13. DOI 10.34286/1995-4646-2020-75-6-7-13. EDN DDWUYG.

4. Shmigel' V. V., Zholudeva V. V., Kutina A. D. Inkubaciya ikry osetra s ispol'zovaniem elektrostaticheskogo polya // Vestnik APK Verhnevolzh'ya. 2024. № 2 (66). S. 93–97. DOI 10.35694/YARCX.2024.66.2.012. EDN DUTEIH.

5. Shmigel' V. V., Zholudeva V. V., Kutina A. D. Matematicheskoe planirovanie i obrabotka eksperimenta s ikroj lenskogo osetra v apparate Vejsa pri nalozhenii na kolbu s elektrodami elektrostaticheskogo polya // Vestnik APK Verhnevolzh'ya. 2024. № 1 (65). S. 119–127. DOI 10.35694/YARCX.2024.65.1.017. EDN TOXNIY.

6. Lomovskoj R. A. Statisticheskij analiz dannyh: metody i prilozheniya v nauchnyh issledovaniyah // Aktual'nye issledovaniya. 2023. № 15-1 (145). S. 29–34. DOI 10.51635/27131513_2023_15_1_29. EDN FRUMKG.

7. Levanova E. Yu., Danilova N. L., Khusainova A. S. Metody i posledovatel'nost' provedeniya ekonomiko-statisticheskogo analiza finansovoj ustojchivosti ekonomicheskogo sub"ekta // Vestnik Rossijskogo universiteta kooperacii. 2021. № 3 (45). S. 24–29. DOI 10.52623/2227-4383-3-45-5. EDN SNMKZK.

Сведения об авторах

Владимир Викторович Шмигель – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрификации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный аграрный университет», spin-код: 5673-4145.

Вера Витальевна Жолудева – кандидат педагогических наук, доцент, профессор кафедры электрификации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный аграрный университет», spin-код: 2190-8887.

Анна Дмитриевна Кутина – ассистент кафедры электрификации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный аграрный университет», spin-код: 7741-9305.

Information about the authors

Vladimir V. Shmigel – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Electrification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agrarian University", spin-code: 5673-4145.

Vera V. Zholudeva – Candidate of Pedagogical Sciences, Docent, Professor of the Department of Electrification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agrarian University", spin-code: 2190-8887.

Anna D. Kutina – Assistant of the Department of Electrification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agrarian University", spin-code: 7741-9305.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.