

Научная статья
 УДК 63:639.3.03
 doi:10.35694/YARCX.2024.65.1.017

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТА С ИКРОЙ ЛЕНСКОГО ОСЕТРА В АППАРАТЕ ВЕЙСА ПРИ НАЛОЖЕНИИ НА КОЛБУ С ЭЛЕКТРОДАМИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

**Владимир Викторович Шмигель¹, Вера Витальевна Жолудева²,
 Анна Дмитриевна Кутина³**

^{1, 2, 3}Ярославский государственный аграрный университет, Ярославль, Россия

¹volod49@mail.ru

²zholudeva@yarcx.ru, ORCID 0000-0001-9194-6659

³kutina@yarcx.ru

Реферат. В данной статье представлены результаты проведённого эксперимента с икрой ленского осетра в аппарате Вейса при наложении на колбу с электродами электростатического поля. Для нахождения оптимального режима работы аппарата для инкубации икры ленского осетра с использованием электростатического поля авторы применили математические методы планирования эксперимента, поскольку математико-статистическое моделирование позволяет значительно повысить производительность труда за счёт значительного сокращения числа опытов. В качестве параметра оптимизации Y был выбран показатель технологической эффективности процесса и выделены три фактора, оказывающие основное влияние на процесс. Для описания исследуемой области поверхности отклика Y построены математические модели, под которыми подразумеваются уравнения, связывающие параметр оптимизации Y с входными факторами X_i . Проведённый корреляционно-регрессионный анализ позволил оптимизировать режим работы аппарата Вейса, используемого для инкубации икры ленского осетра. Построенные уравнения парной и множественной регрессии можно использовать для планирования и прогнозирования результатов эксперимента.

Ключевые слова: математическое планирование эксперимента, планы Хартли, икра ленского осетра, математическая модель, электростатическое поле

MATHEMATICAL PLANNING AND PROCESSING OF AN EXPERIMENT WITH LENA STURGEON CAVIAR IN A WEISS APPARATUS WHEN APPLIED TO A FLASK WITH ELECTROSTATIC FIELD ELECTRODES

Vladimir V. Shmigel¹, Vera V. Zholudeva², Anna D. Kutina³

^{1, 2, 3}Yaroslavl State Agrarian University, Yaroslavl, Russia

¹volod49@mail.ru

²zholudeva@yarcx.ru, ORCID 0000-0001-9194-6659

³kutina@yarcx.ru

Abstract. This article presents the results of an experiment with Lena sturgeon caviar in a Weiss apparatus when applied to a flask with electrostatic field electrodes. To find the optimal operating mode of the apparatus for incubating Lena sturgeon caviar using an electrostatic field the authors applied mathematical methods of experiment planning, since mathematical and statistical modeling allows to significantly increase labor productivity due to a significant reduction in the number of experiments. The technological process efficiency indicator was selected as the optimization parameter Y and three factors were identified that had a main effect on the process. To describe area under investigation of the response surface Y , mathematical models are constructed which means equations that relate the optimization parameter Y to the input factors X_i . The correlation and regression analysis carried out made it possible to optimize the operating mode of the Weiss apparatus used for incubation of Lena sturgeon caviar. The constructed two-dimensional and multiple regression equations can be used to plan and predict the results of an experiment.

Keywords: mathematical planning of the experiment, Hartley's plans, Lena sturgeon caviar, mathematical model, electrostatic field

Введение. В настоящее время влияние электростатического поля на биологические объекты как животного, так и растительного типа достаточно неплохо исследовано экспериментально. Следует отметить, что исследование механизма взаимодействия электромагнитных полей с различными биологическими объектами невозможно без точной информации о распределении этих полей внутри объекта, поскольку этот механизм непосредственно связан как с величиной, так и ориентацией электрической и магнитной составляющих поля. Для инкубации икры ленского осетра с использованием электростатического поля можно применить аппарат Вейса. Существуют различные методы оптимизации его работы. Математические методы планирования эксперимента позволяют значительно повысить производительность труда при исследовании за счёт значительного сокращения числа опытов, а стало быть, времени и средств на них [1].

Методика. Для предсказания направления, в котором величина параметра оптимизации Y увеличивается быстрее, чем в любом другом направлении, и для описания исследуемой области поверхности отклика требуется математическая модель, под которой подразумевается уравнение, связывающее параметр оптимизации Y с входными факторами X_i .

Функция отклика $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$ представляется в виде полинома второй степени [2]:

$$Y = b_0 + \sum_1^k b_i X_i + \sum_{i,j}^k b_{ij} X_i X_j + \sum_1^k b_{ii} X_i^2, \quad (1)$$

где b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – коэффициенты регрессии, по величине которых можно судить о степени влияния соответствующих факторов; k – число независимых переменных (факторов).

Чтобы оценить все коэффициенты квадратичной модели, надо иметь план, в котором каждая переменная варьирует хотя бы на трёх разных условиях. Кроме того, план должен удовлетворять определённому критерию оптимальности. Исходя из практических соображений, следует использовать такие планы, которые требуют наименьших затрат на реализацию эксперимента. Поскольку затраты на эксперимент пропорциональны числу опытов N , естественно выбрать планы, в которых N не сильно превышает число определяемых констант.

В работе использованы планы Хартли, требующие меньшего числа опытов, чем планы Бокса [3].

Метод построения этих планов сводится к использованию наименьшей возможной регулярной реплики от полного факторного эксперимента в качестве «ядра» композиционной схемы. При этом единственное требование, предъявляемое к этим планам, состоит в том, чтобы в такой реплике не

коррелировали между собой только двухфакторные взаимодействия.

Другая особенность планов Хартли состоит в том, что повторные опыты ставятся только в дополнительных (звёздных) точках. При этом повторные опыты рассматриваются как самостоятельные. В ядре плана тоже могут ставиться повторные опыты, но они не считаются самостоятельными.

Для того чтобы компенсировать влияние систематических ошибок, причиной которых могли быть случайные колебания напряжения в электросети, температуры и влажности воздуха в помещении, опыты рандомизировали по времени, из-за чего порядок опытов в эксперименте принимали случайным (с использованием таблицы случайных чисел).

Постановка параллельных опытов не даёт полностью совпадающих результатов, так как существует ошибка опыта. Для этого опыты повторяли несколько раз, и затем брали среднее арифметическое y^- всех n отдельных результатов.

Наличие отклонения результатов любого опыта от среднего арифметического свидетельствует об изменчивости, которую измеряли дисперсией S^2 .

Для определения грубых ошибок использовали критерий Стьюдента:

$$\frac{y - \bar{y}}{S} \geq t. \quad (2)$$

Значение t брали из таблицы t -распределений для принятого уровня значимости (0,05). Опыт считали бракованным, если экспериментальное значение t по модулю было больше табличного. Для вычисления y и S использовали данные наблюдений без резко отличающихся величин.

Для нахождения дисперсии параметра оптимизации необходимо проверить однородность дисперсии всех отдельных опытов. Однородность дисперсии проверяли с помощью критерия Кохрена [3], представляющего собой отношение максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{n=1}^N S_n^2}. \quad (3)$$

Дисперсии считали однородными, если экспериментальное значение критерия Кохрена не превышало табличного.

После получения результатов опыта и расчёта дисперсии параметра оптимизации вычисляли коэффициенты регрессии модели. Затем находили F -критерий (критерий Фишера), который сравнивали с табличными значениями.

Если расчётное значение не превышало табличного, то с соответствующей доверительной вероятностью модель считали адекватной.

С целью поиска максимального значения параметра оптимизации y в исследованной области проводили предварительный анализ уравнения регрессии. После анализа коэффициентов при параметрах некоторые параметры фиксировали на краю исследуемой области, и искали значения остальных, подставляя принятые значения зафиксированных параметров. Затем, приравняв к нулю частные производные по остальным параметрам, получали системы уравнений, решение которых позволило найти параметры, обеспечивающие наибольший Y в исследованной области.

Используя действительные значения полученных параметров, проводили проверочный технологический эксперимент с повторностью (до трёх опытов). Сложность эксперимента заключалась в том, что одна повторность опыта с икрой стоит 10 тыс. рублей.

Качество работы аппарата Вейса, в зависимости от обработки икры в электростатическом поле, оценивается рядом критериев: производственной эффективностью, экономической эффективностью, технологической эффективностью [4; 5]. На

наш взгляд, в данном случае более целесообразно брать за критерий технологическую эффективность [6; 7; 8; 9]:

$$Y = W_1 \frac{\phi_{20} - \phi_{21}}{\phi_{20}}, \quad (4)$$

где ϕ_{21} – содержание икры с сапролегнией в первой фракции (обработанной электростатическим полем), шт.; ϕ_{20} – содержание икры с сапролегнией в исходном материале, шт.; W_1 – выход икры без сапролегнии, шт.

По результатам предварительных опытов были выбраны три фактора, оказывающие основное влияние на процесс: X_1 – потенциал электрода (30, 35, 40 кВ); X_2 – скорость потока воды в аппарате Вейса (10, 30, 50 л/с); X_3 – направление потока воды (прямо вверх, по обеим стенкам вверх, по одной стенке вверх, градусы).

По А. Н. Лисенкову [3] для планирования трёхфакторного эксперимента наименьшее число опытов по плану Хартли равно 11.

Уровни и интервалы варьирования факторов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные уровни и интервалы варьирования факторов на аппарате Вейса

| Факторы и их обозначение / уровни | X_1 (U, кВ) | X_2 ($V_{пр}$, м/с) | X_3 ($H_{пр}$, градусы) |
|-----------------------------------|---------------|-------------------------|-----------------------------|
| Нижний (-1) | 30 | 10 | 75 в одну сторону |
| Нулевой (0) | 35 | 30 | 90 |
| Верхний (+1) | 40 | 50 | 75 в обе стороны |
| Интервал варьирования | 5 | 20 | 15 |
| Звёздные точки | 52,5 | 45 | 135 |

Результаты. Проведённый эксперимент позволил реализовать матрицу плана Хартли (табл. 2).

Для определения степени влияния каждого факторного признака на результативный признак был проведён корреляционно-регрессионный ана-

Таблица 2 – Матрица планирования при поиске оптимальных условий работы аппарата Вейса при наложенном электростатическом поле

| Обозначение факторов / № п.п. | X_1 | Y_1 | X_2 | Y_2 | X_3 | Y_3 |
|-------------------------------|-------------|-------|-----------|-------|-------------|-------|
| 1 | +1(40) | 0,8 | +1(50) | 0,5 | +1(75 обе) | 0,85 |
| 2 | -1(30) | 0,65 | +1(50) | 0,5 | -1(75 одну) | 0,7 |
| 3 | +1(40) | 0,8 | -1(10) | 0,3 | +1(75 обе) | 0,85 |
| 4 | -1(30) | 0,65 | -1(10) | 0,3 | +1(75 обе) | 0,85 |
| 5 | +1(40) | 0,8 | -1(10) | 0,3 | -1(75 одну) | 0,7 |
| 6 | -1,5(-52,5) | 0,8 | 0(30) | 0,6 | 0(90) | 0,6 |
| 7 | +1,5(52,5) | 0,6 | 0(30) | 0,6 | 0(90) | 0,6 |
| 8 | 0(35) | 0,7 | -1,5(-45) | 0,62 | 0(90) | 0,6 |
| 9 | 0(35) | 0,7 | +1,5(+45) | 0,62 | 0(90) | 0,6 |
| 10 | 0(35) | 0,7 | 0(30) | 0,6 | -1,5(-135) | 0,5 |
| 11 | 0(35) | 0,7 | 0(30) | 0,6 | +1,5(+135) | 0,5 |

лиз. Расчёт выполнен средствами MS Excel [10]. Прежде всего, были построены три однофакторные регрессионные модели.

1. Изучение взаимосвязи между X_1 (потенциал электрода) и Y (технологическая эффективность процесса), таблица 3.

Таким образом, установлена сильная прямая связь между исследуемыми факторами. Следова-

тельно, чем выше потенциал электрода, тем выше технологическая эффективность процесса.

Зависимость результирующего показателя от выбранного фактора аппроксимировали линейно и получили регрессионную модель (рис. 1).

$$Y = 0,429651 + 0,008112X_1.$$

Кроме линейной регрессионной модели был построен полином третьей степени $Y = -0,00004X^3$

Таблица 3 – Корреляционная матрица

| | | |
|-------|----------|-------|
| | Y | X_1 |
| Y | 1 | |
| X_1 | 0,898333 | 1 |

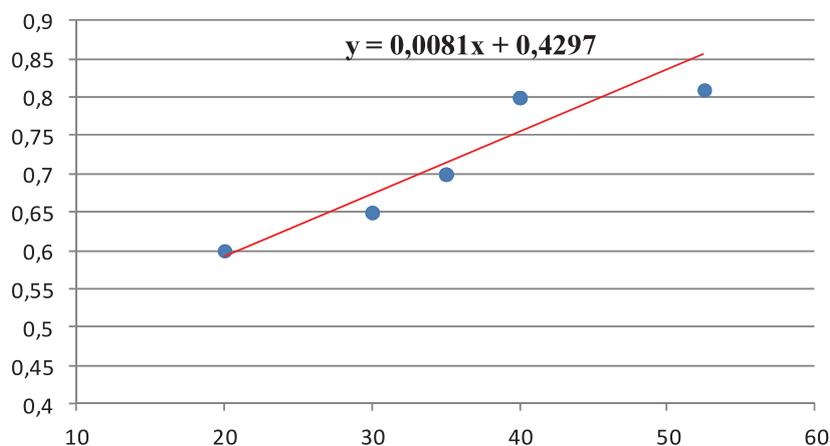


Рисунок 1 – График линейной регрессионной модели между Y и X_1

+ $0,004x^2 - 0,1265x + 1,8219$, который, на наш взгляд, наиболее точно и адекватно описывает зависимость исследуемых факторов X_1 (потенциал электрода) и Y (технологическая эффективность процесса), рисунок 2.

2. Изучение взаимосвязи между X_2 (скорость потока воды) и Y (технологическая эффективность процесса), таблица 4.

Установлена сильная прямая связь между исследуемыми факторами, следовательно, чем выше

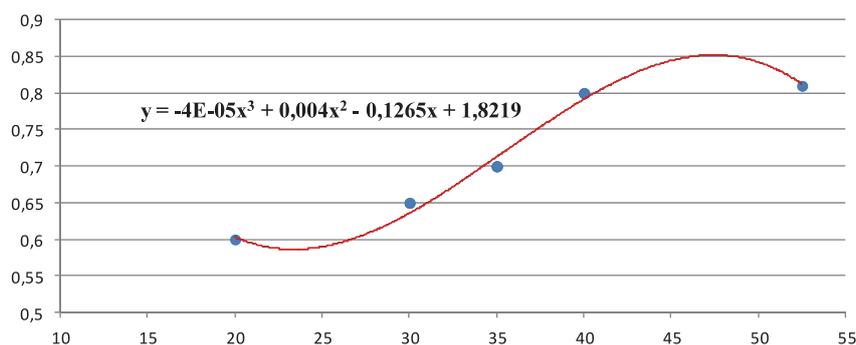


Рисунок 2 – График полиномиальной зависимости между Y и X_1 .

Таблица 4 – Корреляционная матрица

| | | |
|-------|----------|-------|
| | Y | X_2 |
| Y | 1 | |
| X_2 | 0,725273 | 1 |

скорость потока воды в аппарате Вейса, тем выше технологическая эффективность процесса.

Зависимость результирующего показателя от выбранного фактора аппроксимировали линейно (рис. 3) и получили линейную регрессионную модель:

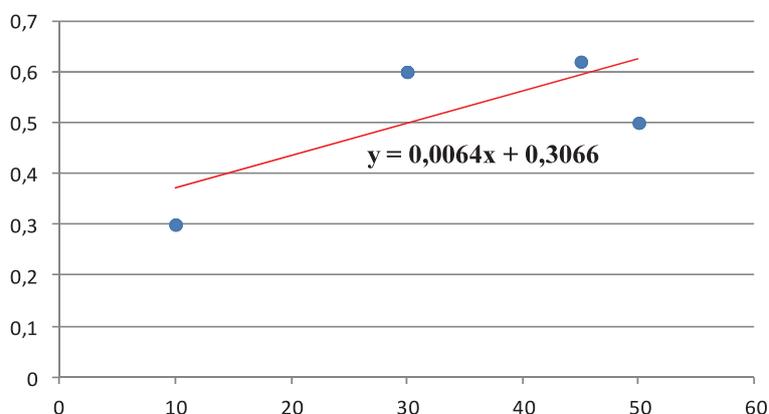


Рисунок 3 – График линейной регрессии между Y и X_2

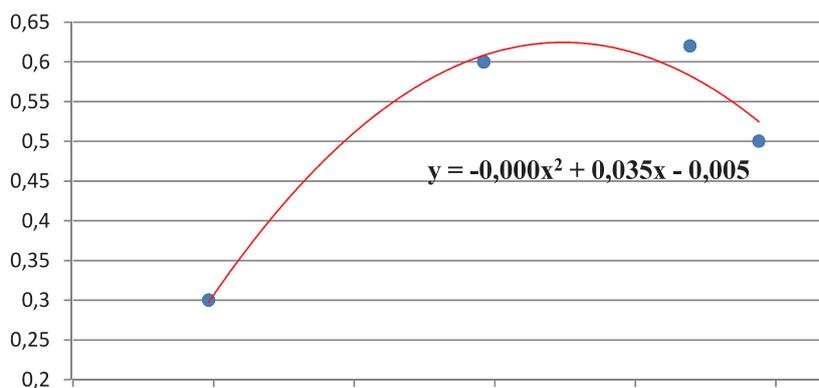


Рисунок 4 – График параболической регрессии между Y и X_2

3. Изучение взаимосвязи между X_3 (направление потока воды) и Y (технологическая эффективность процесса), таблица 5.

Между исследуемыми факторами установлена умеренная прямая связь, то есть направление потока воды оказывает достаточное влияние на технологическую эффективность процесса.

Зависимость результирующего показателя от выбранного фактора аппроксимировали линейно (рис. 5) и получили регрессионную модель:

$$Y = 0,687923 + 0,033816X_3.$$

Полученный коэффициент корреляции позволяет сделать вывод, что линейная модель не является лучшей. На наш взгляд, наиболее точным и адекватным является полином четвертой степени (рис. 6):

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

Мы считаем, также представляет интерес проведение множественного корреляционно-регрес-

$$Y = 0,306555 + 0,006376X_2.$$

Визуально проведенный анализ позволил построить параболическую модель (полином второй степени, рис. 4) взаимосвязи между X_2 (скорость потока воды) и Y (технологическая эффективность процесса): $Y = -0,0005x^2 + 0,0352x - 0,0054$.

сионного анализа для изучения взаимодействия между парами факторных признаков и результирующим фактором.

4. Изучение взаимосвязи между X_1 и X_2 и результирующим фактором Y , таблица 6.

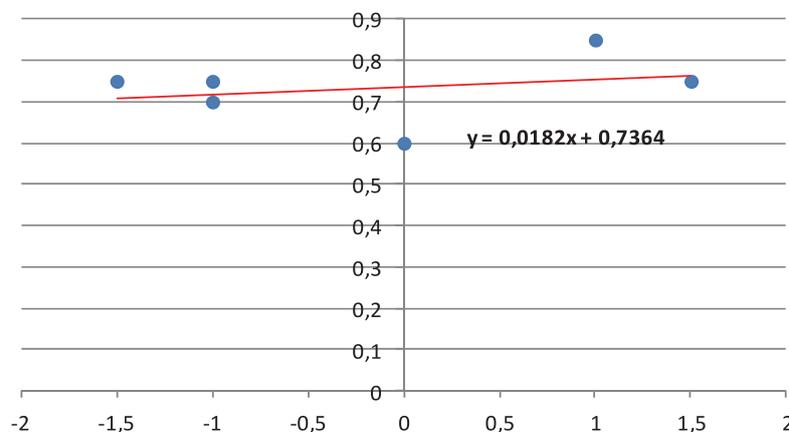
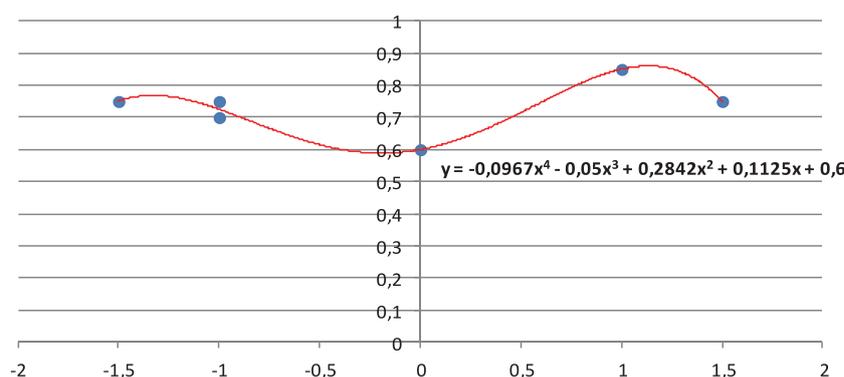
Анализ корреляционной матрицы позволяет сделать вывод, что установлена умеренная связь между результирующим признаком Y (технологическая эффективность процесса) и факторными признаками. Множественный коэффициент корреляции равен 0,853121, что свидетельствует о сильной связи между результирующим фактором и признаками, влияющими на него. Коэффициент детерминации – 0,728, то есть практически на 73% выделенные факторные признаки X_1 и X_2 оказывают влияние на Y – технологическую эффективность процесса.

Построим уравнение множественной регрессии (рис. 7):

$$Y = 0,0898 + 0,01005x_1 + 0,00476x_2.$$

Таблица 5 – Корреляционная матрица

| | | |
|----------------|----------|----------------|
| | Y | X ₃ |
| Y | 1 | |
| X ₃ | 0,651263 | 1 |

Рисунок 5 – График линейной регрессии между Y и X₃Рисунок 6 – График полиномиальной регрессии между Y и X₃Таблица 6 – Корреляционная матрица зависимости Y и X₁, X₂

| | | | |
|----------------|----------|----------------|----------------|
| | Y | X ₁ | X ₂ |
| Y | 1 | | |
| X ₁ | 0,605989 | 1 | |
| X ₂ | 0,546989 | -0,08473 | 1 |

5. Изучение взаимосвязи между X₁ и X₃ и результативным фактором Y, таблица 7.

Анализ корреляционной матрицы позволяет сделать вывод, что установлена сильная связь между результативным признаком Y (технологическая эффективность процесса) и факторными признаками X₁ (потенциал электрода) и X₃ (направление потока воды). Множественный коэффициент корреляции равен 0,647944, что свидетельствует о близкой к сильной связи между результативным фактором и признаками, влияющими на него.

Коэффициент детерминации – 0,419831, то есть только на 42% выделенные факторные признаки X₁ и X₃ оказывают влияние на Y – технологическую эффективность процесса.

Уравнение множественной регрессии (рис. 8):
 $Y = 0,350087 + 0,0085x_1 + 0,02528x_3$.

6. Изучение взаимосвязи между X₂ и X₃ и результативным фактором Y, таблица 8.

Анализ корреляционной матрицы позволяет сделать вывод, что установлена сильная связь между результативным признаком Y (техноло-

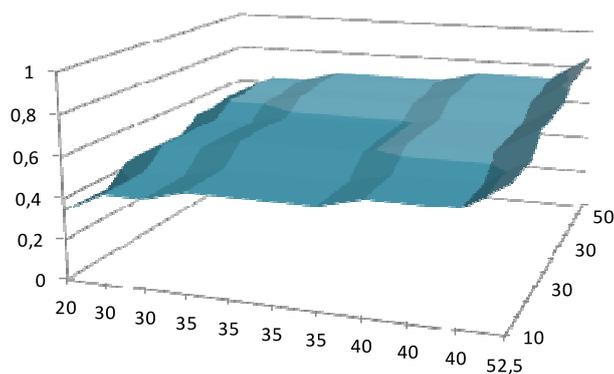


Рисунок 7 – Множественная регрессия между Y и X_1, X_2

Таблица 7 – Корреляционная матрица зависимости между Y и X_1, X_3

| | Y | X_1 | X_3 |
|-------|----------|---------|-------|
| Y | 1 | | |
| X_1 | 0,61798 | 1 | |
| X_3 | 0,518107 | 0,58213 | 1 |

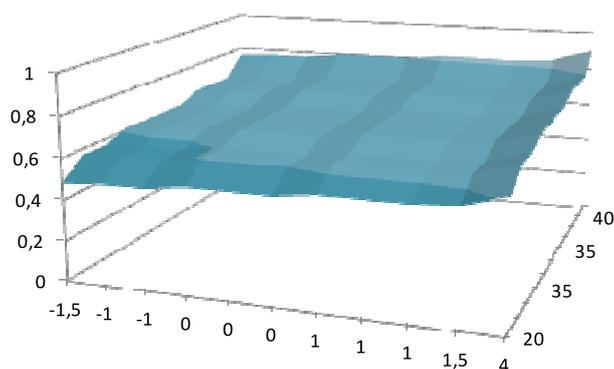


Рисунок 8 – Множественная регрессия между Y и X_1, X_3

Таблица 8 – Корреляционная матрица зависимости Y и X_2, X_3

| | Y | X_2 | X_3 |
|-------|----------|----------|-------|
| Y | 1 | | |
| X_2 | 0,735082 | 1 | |
| X_3 | 0,766677 | 0,596918 | 1 |

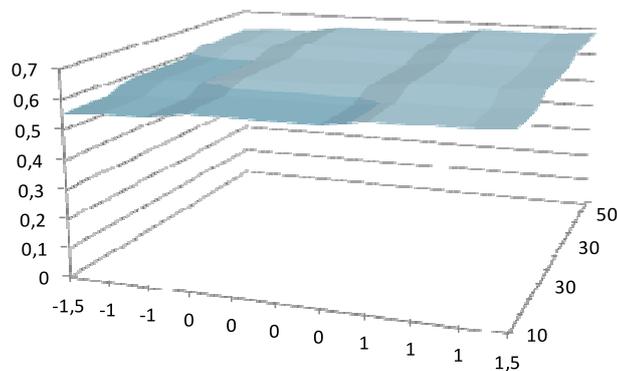


Рисунок 9 – Множественная регрессия между Y и X_2, X_3

гическая эффективность процесса) и факторными признаками X_2 (скорость потока воды в аппарате Вейса) и фактором X_3 (направление потока воды). Множественный коэффициент корреляции равен 0,841055, что свидетельствует о тесной связи между результативным фактором и признаками, влияющими на него. Коэффициент детерминации – 0,707373, то есть только на 70% выделенные факторные признаки X_2 и X_3 оказывают влияние на Y – технологическую эффективность процесса.

Построенное уравнение множественной регрессии имеет вид (рис. 9):

$$Y = 0,569563 + 0,001699x_2 + 0,021259x_3.$$

Выводы. Установлена сильная прямая корреляционная связь между технологической эффективностью процесса (результативный признак) и каждым из факторных признаков. Следовательно, оптимальный режим работы аппарата Вейса, используемого для инкубации икры ленского осетра, зависит от потенциала электродов, скорости и направления потока воды в аппарате.

Построенные уравнения парной и множественной регрессии позволяют управлять процессом, оптимизировать работу аппарата, планировать и прогнозировать результаты эксперимента.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий : монография. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Наука, 1976. 280 с. EDN TOBZDM.
2. Лабораторный практикум по курсу Теоретические основы планирования экспериментальных исследований / под ред. Г. К. Круга. М. : «МЭИ», 1969. 160 с.
3. Мельников С. В., Алешкин В. Р., Рощин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л. : Колос, 1972. 200 с.
4. Баринаева В. В. Технологические аспекты повышения эффективности инкубации икры осетровых видов рыб : дис. ... канд. с.-х. наук : 06.04.01 / ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». Астрахань, 2022. 138 с.
5. Васильева Е. Г. Механизм влияния электромагнитных полей на живые организмы // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2008. № 3 (44). С. 186–191. EDN HVMUZL.
6. Мандра А. В., Пиротти Е. Л. Расчет электромагнитного импульсного поля в инкубационной емкости с икрой осетровых // The Scientific Heritage. 2020. № 46-1 (46). С. 20–24. EDN GPUPEJ.
7. Шмигель В. В., Угловский А. С., Кутина А. Д. Воздействие электростатического поля на оплодотворенную икринку осетра // Международный технико-экономический журнал. 2021. № 6. С. 48–56. DOI 10.34286/1995-4646-2021-81-6-48-56. EDN HJZCUI.
8. Пат. 2700753 Российская Федерация С1, МПК А01К 61/00(2006.01) Способ интенсивной технологии инкубации икры / В. В. Шмигель ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Ярославская государственная сельскохозяйственная академия». № 2018142764; заявл. 03.12.2018; опубл. 19.09.2019, Бюл. № 26. 4 с.
9. Luben R. A. Effects of low-energy electromagnetic fields (pulsed and DC) on membrane signal transduction processes in biological systems // Health Physics. 1991. Vol. 61, Is. 1. P. 15–28. DOI 10.1097/00004032-199107000-00002.
10. Швалева А. В. Методы математической статистики в технических исследованиях // Молодой ученый. 2012. № 3. С. 427–430. EDN OXPCBT.

References

1. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskij Yu. V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij : monografiya. 2-e izd., pererab. i dop. M. : Nauka, 1976. 280 s. EDN TOBZDM.
2. Laboratornyj praktikum po kursu Teoreticheskie osnovy planirovaniya eksperimental'nyh issledovanij / pod red. G. K. Kruga. M. : «MEI», 1969. 160 s.
3. Mel'nikov S. V., Aleshkin V. R., Roshchin P. M. Planirovanie eksperimenta v issledovaniyah sel'skohozyajstvennyh processov. L. : Kolos, 1972. 200 s.
4. Barinova V. V. Tekhnologicheskie aspekty povysheniya effektivnosti inkubacii ikry osetrovyyh vidov ryb : dis. ... kand. s.-h. nauk : 06.04.01 / FGBOU VO «Astrahanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet». Astrahan', 2022. 138 s.
5. Vasil'eva E. G. Mekhanizm vliyaniya elektromagnitnyh polej na zhivye organizmy // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2008. № 3 (44). S. 186–191. EDN HVMUZL.
6. Mandra A. V., Pirotti E. L. Raschet elektromagnitnogo impul'snogo polya v inkubacionnoj emkosti s ikroy osetrovyyh // The Scientific Heritage. 2020. № 46-1 (46). S. 20–24. EDN GPUPEJ.
7. Shmigel' V. V., Uglovskij A. S., Kutina A. D. Vozdejstvie elektrostatičeskogo polya na oplodotvorennuyu ikrinku osetra // Mezhdunarodnyj tekhniko-ekonomičeskij zhurnal. 2021. № 6. S. 48–56. DOI 10.34286/1995-4646-2021-81-6-48-56. EDN HJZCUI.

8. Pat. 2700753 Rossijskaya Federaciya S1, MPK A01K 61/00(2006.01) Sposob intensivnoj tekhnologii inkubacii ikry / V. V. Shmigel' ; patentoobladatel' FGBOU VO «Yaroslavskaya gosudarstvennaya sel'skohozyajstvennaya akademiya». № 2018142764; zayavl. 03.12.2018; opubl. 19.09.2019, Byul. № 26. 4 s.

9. Luben R. A. Effects of low-energy electromagnetic fields (pulsed and DC) on membrane signal transduction processes in biological systems // Health Physics. 1991. Vol. 61, Is. 1. P. 15–28. DOI 10.1097/00004032-199107000-00002.

10. Shvaleva A. V. Metody matematicheskoj statistiki v tekhnicheskix issledovaniyah // Molodoj uchenyj. 2012. № 3. S. 427–430. EDN OXPCBT.

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 – аспирант кафедры электрификации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный аграрный университет», kutina@yarcx.ru.

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 – postgraduate student of the Department of Electrification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agrarian University", kutina@yarcx.ru.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.