

аОригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-56-62>

УДК 631.6(075.32):519.87



## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРКА МЕЛИОРАТИВНЫХ МАШИН

С.В. Чумакова<sup>1✉</sup>, Д.Г. Горюнов<sup>1</sup>, М.Г. Загоруйко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова; 410012, г. Саратов, проспект им. Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3, Россия

<sup>2</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5, Россия

**Аннотация.** Целью исследований явилось сокращение энергозатрат на проведение работ в мелиоративном производстве за счет разработки математической модели и методики, позволяющих осуществлять оптимальное формирование парка машин. Выбраны наиболее эффективные (оптимальные) единицы техники на основе оригинальной методики, разработанной при помощи математического моделирования с использованием элементов теории множеств, математического анализа и алгебры. Применение теории множеств позволило осуществить переход от реальных компонентов парка машин к математическим субъектам для осуществления моделирования и обратно. Элементы математического анализа позволили установить функциональную зависимость между элементами модели и графически представить алгоритм последовательного отбора единиц техники, отвечающих определенным требованиям. При помощи инструментов алгебры были структурированы компоненты модели, вошедшие в разработанную методику. Предложена формула расчета коэффициентов оптимальности, по которым определяются индексы эффективности машин, что позволяет осуществить выбор наиболее эффективной техники при формировании парков машин для мелиоративного производства. Благодаря построенной универсальной математической модели была разработана оригинальная методика, целью которой является повышение производительности и снижение энергозатрат в мелиоративном производстве за счет оптимизации формирования парка машин. Новизна работы заключается в подходе к построению математической модели, использующей элементы теории множеств, обеспечивающей многогранность применения разработанной на ее основе методики выбора оптимального варианта. Проведенные исследования были апробированы на реальных данных, что позволяет говорить и о практической направленности представленной работы. Была разработана математическая модель и с ее использованием предложена оригинальная методика, позволяющая осуществить оптимальное формирование парка машин для мелиоративного производства с условием повышения производительности и минимизации энергозатрат на производство работ. На основании выкладок математической модели и апробирования методики в применении к практическим задачам разработанный метод оптимизации формирования парка машин для мелиоративного производства может быть предложен при использовании в решении задач современных реалий.

**Ключевые слова:** парк мелиоративных машин, математическая модель, методика, сокращение энергозатрат, коэффициент оптимальности, показатель эффективности

**Формат цитирования:** Чумакова С.В., Горюнов Д.Г., Загоруйко М.Г. Математическая модель оптимизации формирования парка машин // Природообустройство. 2025. No. 1. С. 56-62. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-56-62>

Scientific article

## MATHEMATICAL MODEL FOR OPTIMIZING THE FORMATION OF A FLEET OF RECLAMATION MACHINES

S.V. Chumakova<sup>1✉</sup>, D.G. Goryunov<sup>1</sup>, M.G. Zagoruiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov; 410012, Saratov, Pyoter Stolypin Avenue, building 4, constr.3. Russia

<sup>2</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 109428, Moscow, 1st Institutsky proezd, 5, Russia

**Abstract.** (*Purpose of the research*) Reduction of energy consumption for works in land reclamation production through the development of mathematical model and methodology, which allow carrying out optimal formation of machinery park. (*Materials and methods*) The most effective (optimal) units

of machinery were selected on the basis of the original methodology developed by means of mathematical modeling using elements of set theory, mathematical analysis and algebra. The application of set theory made it possible to make the transition from real components of the fleet to mathematical subjects for modeling and back. Elements of mathematical analysis made it possible to establish functional dependence between the model elements and graphically represent the algorithm of sequential selection of units of machinery meeting certain requirements. With the help of algebra tools, the model components included in the developed methodology were structured. The formula for calculating the optimality coefficients, which are used to determine the indexes of machinery efficiency, is proposed, which allows selecting the most efficient machinery when forming machine parks for land reclamation production. (*Results and discussion*) Thanks to the constructed universal mathematical model, an original method was developed, the purpose of which is to increase productivity and reduce energy consumption in land reclamation production by optimizing the formation of a fleet of machines. The novelty of this work consists in the approach to the construction of a mathematical model using elements of set theory, providing versatility of application of the methodology of optimal variant selection developed on its basis. The conducted research has been tested on real data, which allows us to talk about the practical orientation of the presented work. (*Conclusions*) The mathematical model has been developed and with its use, the original methodology, allowing carrying out optimum formation of a park of machines for ameliorative manufacture with condition of increase of productivity and minimization of power consumption for manufacture of works, has been offered. On the basis of mathematical model calculations and approbation of the methodology in application to practical problems, the developed method of optimization of machine park formation for land reclamation production can be proposed for use in problems of modern realities.

**Keywords:** fleet of reclamation machines, mathematical model, methodology, reduction of energy consumption, optimality coefficient, efficiency index

**Format of citation:** Chumakova S.V., Goryunov D.G., Zagoruiko M.G. Mathematical model for optimizing the formation of a fleet of reclamation machines // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 1. P. 56-62. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-56-62>

**Введение.** Оптимизация формирования парка машин – одна из главных задач мелиоративного производства. Актуальность формирования оптимальных парков машин для эксплуатации, ремонта и реконструкции оросительных систем обусловлена рядом факторов. Во-первых, эффективное использование водных и земельных ресурсов является одной из ключевых задач современного сельского хозяйства. Во-вторых, формирование оптимальных парков машин позволяет сократить затраты на эксплуатацию и обслуживание систем, а также снизить негативное воздействие на окружающую среду. В-третьих, улучшение технического состояния оросительных систем и повышение их надежности способствуют повышению урожайности сельскохозяйственных культур и качества продукции [1].

**Цель исследований:** сокращение энергозатрат в мелиоративном производстве за счет оптимизации формирования парка машин, что в свою очередь достигается путем использования разработанной авторами оригинальной методики, основанной на представленной математической модели.

В нашем случае имеются в виду суммарные годовые энергозатраты на производство работ  $\mathcal{E}_{\text{раб}}$ , кВт·год/ед. изм. (размерность зависит от вида выполняемых работ: например,

для кусторезов – кВт·год/м<sup>2</sup>; для землеройной техники – кВт·год/м<sup>3</sup>), которые определяются по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{раб}} = \frac{N_{\text{дв}}}{\Pi_m} \cdot \Phi, \quad (1)$$

где  $N_{\text{дв}}$  – мощность двигателя машины, кВт;  $\Pi_m$  – техническая производительность машины, ед. изм/ч;  $\Phi$  – годовой фонд рабочего времени машины, ч.

#### Материалы и методы исследований.

Для решения поставленной задачи построим модель оптимального выбора машин на примере техники для эксплуатации, ремонта и реконструкции оросительных систем. Целесообразно данные действия осуществлять, используя математическую модель, разработанную с учетом специфики работ и позволяющую сделать оптимальный выбор единиц техники. В качестве основных разделов математики для этого случая были выбраны математический анализ, элементы теории множеств и элементы алгебры [2, 3].

В начале построения математической модели данного процесса были задействованы элементы теории множеств, так как именно этот научный раздел позволил перейти от объектов реальности к математическим абстракциям и разрешил в этом случае наиболее точно описать ситуационную задачу и метод

отбора. Каждой единице техники были поставлены в соответствие элементы множества  $M$ , обозначенные как  $m_i$  [4, 5].

Пусть при первоначальном отборе  $i$  будет изменяться от 1 до  $n$ , то есть

$$M = \{m_i\}_{i=1}^n = \{m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_n\}. \quad (2)$$

Обозначениями  $M$  и  $m_i$  будем также оперировать при наглядной демонстрации алгоритма отбора элементов, отвечающих требованиям ситуационной задачи (рис. 1, 3).

Выбор машины  $m_i$  зависит от ее исследуемых характеристик. Тогда

было введено множество характеристик для машин:

$$\chi = \{\chi_j\}_{j=1}^s = \{\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_j, \dots, \chi_s\}. \quad (3)$$

Авторами статьи был предложен следующий алгоритм выбора машины для общего случая:

- определение характеристики или результата, являющихся целевой функцией  $\chi_j^z$ ;
- определение набора характеристик  $\chi_j$ , влияющих на конечный выбор машины по результату целевых функций
- целевая функция находится по определенному правилу, учитывающему специфику характеристик  $\chi_j$ .

При этом целевая функция для каждой машины  $m_i$  рассчитывается с учетом данных таблицы 1 по формуле (4) [6]:

$$\chi_j^z = f(\chi_j)_{j=1}^s. \quad (4)$$

Далее, на основании данных, отраженных в множествах (2), (3) и полученных по формуле (4), можно сделать вывод об оптимальности выбора той или иной машины. Для этого был введен коэффициент оптимальности  $k^*$ , который в свою очередь определяется по формуле (5) [7]:

$$k^* = \min \{k_i^*\}_{i=1}^n, \quad (5)$$

где  $k_i^*$  – коэффициент оптимальности, %, для каждой из исследуемых единиц техники, который находится по формуле (6):

$$k_i^* = \frac{\chi_j^z}{\chi_j} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Формула (6) позволила перейти к множеству  $K_i^*$ , отраженному в формуле (7):

$$K_i^* = \{k_1^*, k_2^*, \dots, k_i^*, \dots, k_n^*\}. \quad (7)$$

Выбирая минимальное значение коэффициента оптимальности  $k^*$  по предложенной методике, можно определить наиболее подходящую по функциональности машину  $m_i$  из множества (2).

В процессе построения модели авторы конкретизировали задачу, сузив выбор до единиц техники, осуществляющих очистку каналов. В рассматриваемом случае в качестве характеристик были выбраны:

- $N_{дв}$  – мощность двигателя машины, кВт;
- $\Pi_э$  – эксплуатационная производительность машины, м<sup>3</sup>/ч;
- $V$  – объем работ, м<sup>3</sup>;
- $\Phi$  – фонд рабочего времени машины, маш.-ч;
- $\mathcal{E}_{раб}$  – энергозатраты на производство работ, кВт·год/м<sup>3</sup>.

Таким образом, получено подмножество  $\chi_\alpha$  множества  $\chi$ , причем

$$\chi_\alpha \subset \chi, \alpha = \overline{1;4} \quad (8)$$

- при  $\alpha = 1, \chi_1 \leftrightarrow N_{дв}$ ;
- при  $\alpha = 2, \chi_2 \leftrightarrow \Pi_э$ ;
- при  $\alpha = 3, \chi_3 \leftrightarrow V$ ;
- при  $\alpha = 4, \chi_4 \leftrightarrow \Phi$ .

После введенных выше обозначений покажем элементы множества  $\chi_\alpha$  :

$$\chi_\alpha = \{\chi_\alpha\}_{\alpha=1}^4 = \{\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4\} = \{N_{дв}, \Pi_э, V, \Phi\}. \quad (9)$$

Графически это также можно изобразить при помощи кругов Эйлера (рис. 1).

На рисунке 2 продемонстрирован алгоритм отбора единиц техники по указанным выше характеристикам.

На рисунке 2 также демонстрируется принцип изображения соответствующих элементов в определенной системе координат. Так, в системе координат  $MO_1N_{дв}$  на оси  $O_1M$  расположены значения  $m_i$ , а по оси  $O_1N_{дв}$  – значения мощности  $N_{дв}$ , соответствующие указанным видам машин. Таким образом, были получены в системе координат  $MO_1N_{дв}$  точки  $N_j(m_i, N_{двj})$ . На рисунке 2 показаны системы координат  $MO_2\Pi_э$ ,  $MO_3\Phi$ ,  $MO_4V$  и  $MO_5\mathcal{E}_{раб}$ . В них были отмечены

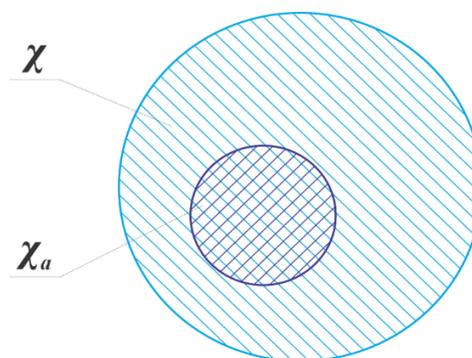


Рис. 1. Изображение при помощи кругов Эйлера вхождения подмножества  $\chi_\alpha$  в множество  $\chi$

Fig. 1. Using Euler circles, depicting the occurrence of a subset  $\chi_\alpha$  in a set  $\chi$

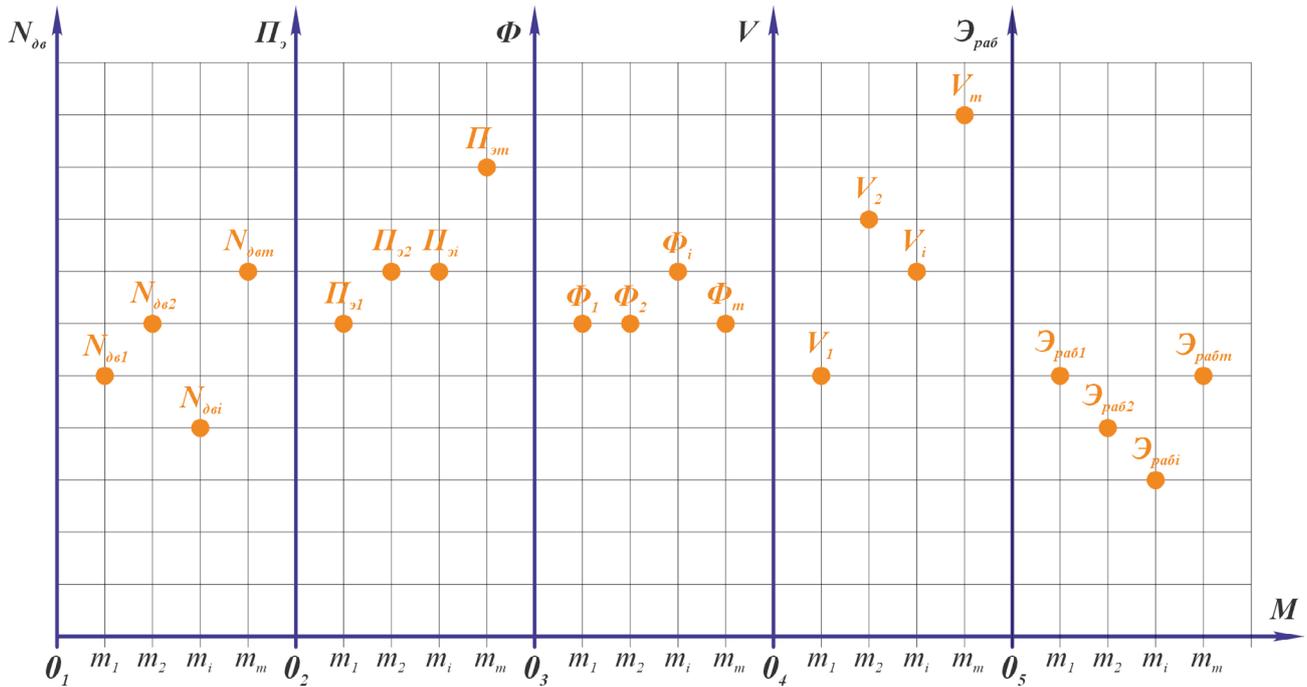


Рис. 2. Демонстрация наглядного изображения алгоритма отбора элементов  $m_i$ , расположенных на оси  $O_iM$ , с учетом критериев  $N_{дв}$ ,  $П_э$ ,  $Ф$ ,  $V$ ,  $Э_{раб}$

Fig. 2. Demonstration of a visual representation of the element selection algorithm  $m_i$  located on axis  $O_iM$  taking into account the criteria  $N_{дв}$ ,  $П_э$ ,  $Ф$ ,  $V$ ,  $Э_{раб}$

точки  $П_{эj}(m_i, П_{эj})$ ,  $Ф_j(m_i, Ф_j)$ ,  $V_j(m_i, V_j)$  и  $Э_{рабj}(m_i, Э_{рабj})$  соответственно.

В системе координат  $MO_1N_{дв}$  получили множество точек:

$$N_{дв} = \{N_{двi}\}_{i=1}^n = \{N_{дв1}, N_{дв2}, \dots, N_{дви}, \dots, N_{двn}\}. \quad (10)$$

Также в системе координат  $MO_2П_э$  получили множество точек:

$$П_э = \{П_{эi}\}_{i=1}^n = \{П_{э1}, П_{э2}, \dots, П_{эi}, \dots, П_{эn}\}. \quad (11)$$

Множество точек

$$Ф = \{Ф_i\}_{i=1}^n = \{Ф_1, Ф_2, \dots, Ф_i, \dots, Ф_n\}. \quad (12)$$

было отмечено в системе координат  $MO_3Ф$ .

Далее в системе  $MO_4V$  было получено множество точек:

$$V = \{V_i\}_{i=1}^n = \{V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_n\}. \quad (13)$$

Следующее множество точек было получено в системе координат  $MO_5Э_{раб}$ :

$$Э_{раб} = \{Э_{раби}\}_{i=1}^n = \{Э_{раб1}, Э_{раб2}, \dots, Э_{раби}, \dots, Э_{рабn}\}. \quad (14)$$

В качестве целевой функции выбраны энергозатраты на производство работ  $Э_{раб}$ :

$$Э_{раб} = f(N_{дв}, П_э, V, Ф). \quad (15)$$

Целевая функция  $Э_{раб}$  зависит от переменных, заявленных ранее в формулах (10), (11), (12), (13). Переходя к пределу в формуле (15) с использованием (13), получили представление  $Э_{раб}$  формулой (16), в которой

каждая из переменных стремится к своему заданному значению:

$$N_{дв} \rightarrow N_{0дв}, П_э \rightarrow П_{0э}, Ф \rightarrow Ф_0, V \rightarrow V_0. \quad (16)$$

Таким образом, формула (16) позволила определить энергозатраты на производство работ как целевую функцию:

$$Э_{раб} = \lim_{\substack{N_{дв} \rightarrow N_{0дв} \\ П_э \rightarrow П_{0э} \\ Ф \rightarrow Ф_0 \\ V \rightarrow V_0}} f(N_{дв}, П_э, V, Ф). \quad (17)$$

Далее в качестве примера на основании данных, соответствующих 5 единицам бульдозерной техники ( $m_1 - ДЗ-133$ ;  $m_2 - ДЗ-29$ ;  $m_3 - ДЗ-42$ ;  $m_4 - ДЗ-110$ ;  $m_5 - ДЗ-59С$ ) и касающихся элементов отмеченных ранее множеств (2), (10), (11), (12), (13), (14), заполнена таблица 2 [10, 11]. При этом множество (2) трансформировалось в множество (18):

$$M_5 = \{m_i\}_{i=1}^5 = \{m_1, m_2, m_3, m_4, m_5\}. \quad (18)$$

Аналогично в формулах (10), (11), (12), (13), (14)  $n = 5$ .

В процессе расчета  $Э_{раб}$  по формуле (17) были использованы следующие условия [8-10]:

- 1) происходит первичное формирование парка из машин, не имеющих наработки;
- 2) машины работают в условно-идеальных условиях, то есть эксплуатационная производительность ( $П_э$ ) равна технической ( $П_т$ );

3) машина работает в течение всего фонда рабочего времени, то есть время работы машины в год равно годовому фонду рабочего времени (здесь необходимо пояснить: если парк машин формируется из машин, бывших в эксплуатации, то для решения задачи принимаются фактические данные по планируемому годовому времени работы машин). Тогда годовой объем работ ( $V$ ) можно определить по формуле (19):

$$V = \Phi \cdot \Pi_r, \text{ м}^3 \quad (19)$$

Далее вычисляем энергозатраты ( $\Theta_{\text{раб}}$ ) на производство работ на объектах, используя формулу (1).

При определении коэффициентов оптимальности по формулам (5), (6) были выбраны характеристики  $V$  и  $\Theta_{\text{раб}}$ . На основании данных таблицы 1 была составлена таблица 2, учитывающая коэффициенты оптимальности. Также в данной таблице представлен показатель эффективности  $Z_{\text{эф}}$ , который определяется следующим образом: среди полученных коэффициентов оптимальности  $k_i^*$  находим минимальное значение и соответствующей ячейке присваиваем индекс 1 (в нашем примере это машина  $m_4$ ), который показывает наивысшую эффективность. Далее, по значениям коэффициентов  $k_i^*$ , по каждой машине в направлении от минимума до максимума определяем менее эффективные

машины и ячейкам присваиваем индексы: 2 (машина  $m_3$ ); 3 (машина  $m_2$ ); 4 (машины  $m_1$  и  $m_5$ ) соответственно.

Таким образом, проанализировав данные, представленные в таблице 2, можно сделать однозначный вывод о том, что наиболее эффективной с точки зрения выполнения наибольшего объема работ с наименьшими энергозатратами является машина  $m_4$  [11].

Необходимо отметить, что представленная авторами математическая модель разрабатывалась непосредственно для мелиоративного производства и будет справедлива для других типов машин (экскаваторов, скреперов), а также при выполнении других видов работ (например, для кусторезов), и в этом случае суммарные энергозатраты будут иметь размерность кВт·год/м<sup>3</sup> [12].

В нашем случае целевая функция подразумевает сокращение суммарные годовых энергозатрат на производство работ по эксплуатации, ремонту и реконструкции мелиоративных систем. Решение задачи происходит от общего к частному, то есть авторы сначала рассматривают всю совокупность техники, а затем переходят к решению конкретной задачи определения эффективной машины среди бульдозеров (табл. 1).

Чтобы парк машин был оптимальным по критерию минимума суммарных годовых

Таблица 1. Таблица соответствия пяти машин выбранным характеристикам  $N_{\text{дв}}$ ,  $\Pi_r$ ,  $\Phi$ ,  $V$  с целевой функцией  $\Theta_{\text{раб}}$

Table 1. Table of correspondence of five machines to selected characteristics  $N_{\text{дв}}$ ,  $\Pi_r$ ,  $\Phi$ ,  $V$  with objective function  $\Theta_{\text{раб}}$

| $M$   | $\chi$ | $N_{\text{дв}}$ , кВт | $\Pi_r$ , м <sup>3</sup> /ч | $\Phi$ , маш.-ч | $V$ , м <sup>3</sup> | $\Theta_{\text{раб}}$ , кВт·год/м <sup>3</sup> |
|-------|--------|-----------------------|-----------------------------|-----------------|----------------------|--|
| $m_1$ |        | 59                    | 290                         | 2270            | 658300               | 461,8  |
| $m_2$ |        | 55                    | 280                         | 2270            | 635600               | 445,9  |
| $m_3$ |        | 59                    | 300                         | 2270            | 681000               | 446,4  |
| $m_4$ |        | 118                   | 850                         | 2270            | 1929500              | 315,1  |
| $m_5$ |        | 250                   | 1000                        | 2100            | 2100000              | 525  |

Таблица 2. Таблица учета коэффициентов оптимальности и индексов эффективности для выбора машины

Table 2. Table of optimality coefficients and efficiency indices for machine selection

| $M$   | $\chi$ | $V$ , м <sup>3</sup> | $\Theta_{\text{раб}}$ , кВт·год/м <sup>3</sup> | $k_i^*$ , % | $Z_{\text{эф}}$ |
|-------|--------|----------------------|--|-------------|-----------------|
| $m_1$ |        | 658300               | 461,8  | 0,070       | 4               |
| $m_2$ |        | 635600               | 445,9  | 0,070       | 4               |
| $m_3$ |        | 681000               | 446,4  | 0,066       | 3               |
| $m_4$ |        | 1929500              | 315,1  | 0,016       | 1               |
| $m_5$ |        | 2100000              | 525  | 0,025       | 2               |

энергозатрат, он должен быть изначально сформирован из техники, имеющей наименьшие энергозатраты. В интерпретации авторов он был сформирован из единиц техники, имеющих наилучший показатель эффективности  $Z_{эф}$ , определенный по значению коэффициента оптимальности  $k_i^*$ . Парк бульдозеров использован в качестве примера из имеющихся марок бульдозеров в хозяйствах Саратовской области. Марки для расчета в принципе могут быть любые, алгоритм проведения расчетов при этом не изменится. Год выпуска и срок службы машин в рассматриваемом случае учитывает годовой фонд рабочего времени, то есть чем больше срок службы машины, тем больше времени необходимо ей на проведение ремонтных работ.

#### Список использованных источников

1. Абдразаков Ф.К. Оптимизация формирования парков машин и распределения техники по производственным объектам / Ф.К. Абдразаков, Д.Г. Горюнов // Строительные и дорожные машины. 2002. № 3. С. 12-14. EDN: UKPMVH.
2. Чумакова С.В. Применение математического моделирования к задачам прикладного характера / С.В. Чумакова, Я.Р. Абдразакова // Современная интеллектуальная трансформация социально-экономических систем: Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. Саратов: СГАУ. 2020. С. 147-150.
3. Соловьев Д.А. Математическая модель аналитического подхода сравнительного анализа производительности сельскохозяйственной техники при использовании технологии визуализации / Д.А. Соловьев, С.В. Чумакова, Р.Д. Гончаров // Helix. 2021. № 10 (5). С. 114.
4. Френкель А.А., Бар-Хиллел И. Основания теории множеств: Пер. с англ. Ю.А. Гастева / Под ред., вступ. ст. А.С. Есенина-Вольпина. Изд. 3-е, стер. М.: URSS, 2010. 554 с.
5. Solovev D.A., Chumakova S.V., Goncharov R.D. Mathematical model of analytical approach of comparative analysis of productivity of agricultural machinery when using visualization technology // Vavilov readings-2021. Dedicated to the 101st anniversary of the discovery of the law of homological series and the 134th anniversary of the birth of N.I. Vavilov. Saratov, 2022. С. 59.
6. Мину М. Математическое программирование. Теория и алгоритмы: Пер. с франц., предисл. А.И. Штерна. М.: Наука, 1990. 485 с.
7. Реклейтис Г. Оптимизация в технике: В 2 кн. Кн. 2. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. М.: Мир, 1986. 320 с.
8. Рогачев Д.А. Оптимизация мероприятий технической эксплуатации оросительных систем методами искусственного интеллекта // Природообустройство. 2024. № 4. С. 12-19.
9. Журавлева Л.А. Развитие материально-технической базы мелиоративного комплекса на инновационной основе / Л.А. Журавлева, Алдиаб Анас // Природообустройство. 2024. № 2. С. 21-27.

#### Выводы

При формировании парка машин, предназначенного для мелиоративного производства, необходимо стремиться к тому, чтобы он по возможности был сформирован из единиц техники, имеющих наилучший показатель эффективности  $Z_{эф}$ , определенный по значению коэффициента оптимальности  $k_i^*$  (5). В работе автора представлена валидная методика по отбору машин, соответствующих наименьшим энергозатратам  $\mathcal{E}_{раб}$  (а значит, и соответствующих наилучшему индексу эффективности), описана при помощи разработанной универсальной математической модели, имеющей прикладной характер, и подтверждена практическими исследованиями.

#### References

1. Abdrazakov F.K., Goryunov D.G. Optimisation of machine park formation and machinery distribution to production facilities. *Stroitel'nye i rozhnye mashiny*. 2002. N3. 12-14. EDN UKPMVH.
2. Chumakova S.V., Abdrazakova Y.R. Application of mathematical modeling to applied tasks. Modern intellectual transformation of socio-economic systems: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference, Saratov: SSAU. 2020. pp. 147-150.
3. Solov'ev D.A.; Chumakova S.V.; Goncharov R.D. Mathematical model of the analytical approach of the comparative analysis of the agricultural machinery productivity using the visualisation technology. *Helix*. 2021. N10 (5). 114.
4. Frenkel A.A.; Bar-Hillel I. Foundations of Set Theory. Translated from English by Y.A. Gastev; edited by A.S. Eсенин-Volpin. – 2nd ed. 2006-554 p.
5. Solovev D.A., Chumakova S.V., Goncharov R.D. Mathematical model of analytical approach of comparative analysis of productivity of agricultural machinery when using visualisation technology. *Vavilov readings-2021*. Dedicated to the 101st anniversary of the discovery of the law of homological series and the 134th anniversary of the birth of N.I. Vavilov. Saratov. 2022. 59.
6. Minu M. Mathematical Programming. Theory and algorithms. M. Nauka. 1990. 485 s.
7. Reckleitis G., Reivindran A., Ragsdell K. Optimization in engineering: in 2 books, Moscow: Mir. 1986. 485 s.
8. Rogachev D.A. Optimization of measures for the technical operation of irrigation systems by artificial intelligence methods. // *Prirodoobustrojstvo*. 2024;(4): 12-19.
9. Zhuravleva L.A., Aldiab Anas. Development of the material and technical base of the melioration complex on an innovative basis // *Prirodoobustrojstvo*. 2024. No. 2. P. 21-27.
10. Karimxodjayev N., Almatayev T., Odilov X. Main factors causing the deterioration of automobile parts which are used in various natural-climate conditions. *Universum: technical sciences*. 2020. N5 (74). 68-71
11. Zagoruiko M.G. Reducing the energy intensity of irrigation during operation of multi-support irrigation machines "Cascade" / M.G. Zagoruiko, D.A. Soloviev, N.F. Ryzhko,

10. Каримходжаев Н., Алматаев Т., Одилов Х. Основные причины, вызывающие износ деталей автотранспортных средств, эксплуатирующихся в различных природно-климатических условиях / Н. Каримходжаев, Т. Алматаев, Х. Одилов // *Universum: технические науки*. 2020. № 5 (74). С. 68-71.

11. Загоруйко М.Г. Снижение энергоемкости полива при эксплуатации многоопорных дождевальнх машин «Каскад» / М.Г. Загоруйко, Д.А. Соловьев, Н.Ф. Рыжко, С.Н. Рыжко // *Мелиорация и водное хозяйство*. № 1. 2024. С. 39-42.

12. Абдразаков Ф.К. Технологии и технические средства проведения эксплуатационно-ремонтных работ на оросительных каналах / Ф.К. Абдразаков, В.С. Егоров, Р.Н. Бахтиев. Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2008. 152 с.

#### Об авторах

**Светлана Валентиновна Чумакова**, канд. техн. наук, доцент кафедры, SPIN-код: 4454-5770, AuthorID: 713475; ch-sv@yandex.ru

**Дмитрий Геннадьевич Горюнов**, канд. техн. наук, доцент кафедры, SPIN-код: 3886-9988, AuthorID: 302111; md111@bk.ru

**Михаил Геннадьевич Загоруйко**, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, SPIN-код: 2738-5137, AuthorID: 323776; zagorujko.misha2013@yandex.ru

#### Критерии авторства / Author shipcriteria

Чумакова С.В., Горюнов Д.Г., Загоруйко М.Г. выполнили экспериментальные и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов / The authors declare that there are no conflicts of interests

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 17.04.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 10.01.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 10.01.2025

S.N. Ryzhko // *Land Reclamation and Water Management*. – No. 1. – 2024. – P. 39-42.

12. Abdrazakov F.K. Technologies and technical means for carrying out operational and repair work on irrigation canals / F.K. Abdrazakov, V.S. Egorov, R.N. Bakhtiev. – *Saratov: Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Saratov State Agrarian University"*, 2008. 152 p.

#### About the authors

**Svetlana V. Chumakova**, CSc (Eng.), associate professor of the department; SPIN-код: 4454-5770, AuthorID: 713475; ch-sv@yandex.ru

**Dmitry G. Goryunov**, CSc (Eng.), associate professor of the department; SPIN-код: 3886-9988, AuthorID: 302111; md111@bk.ru

**Mikhail G. Zagoruiko**, CSc (Eng.), associate professor, senior researcher; SPIN-код: 2738-5137, AuthorID: 323776; zagorujko.misha2013@yandex.ru

Chumakova S.V., Goryunov D.G., Zagoruiko M.G. carried out experimental and theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. They have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.