

- Высокие затраты на рекультивацию. Процесс требует значительных финансовых вложений, что может быть проблемой для компаний, которые занимаются добычей.

- Долгосрочность процесса. Рекультивация нарушенных земель требует времени, иногда до нескольких десятков лет, чтобы полностью восстановить экосистему.

- Нехватка квалифицированных специалистов. Для эффективной рекультивации необходимы специалисты, которые могут правильно оценить состояние почвы и выбрать оптимальные методы.

Таким образом, рекультивация нарушенных земель при разработке карьеров в Московской и Калининградской областях требует комплексного подхода с учетом географических и климатических особенностей каждого региона. Современные методы рекультивации позволяют эффективно восстанавливать экосистемы, что способствует сохранению природного баланса и улучшению социально-экономической ситуации в этих областях. Однако для достижения наилучших результатов необходимо обеспечить достаточное финансирование, подготовку специалистов и использование инновационных технологий в области охраны окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рекультивация земель и мероприятия по восстановлению нарушенных ландшафтов / Т.В. Папаскири, С.Н. Волков, М.Е. Гинзбург, В.Н. Семочкин, Е.П. Ананичева. М.: Государственный университет по землеустройству, 2024. 184 с. ISBN 978-5-9215-0575-9. EDN SKKFPZ.
2. Моисеенко В.В., Цупикова Н.А. Флористические и экобиоморфологические особенности побережья обводненно-го карьера янтарный // Известия КГТУ. 2023. № 70. С. 34–45.
3. Наумова К.О., Станис Е.В. Оценка пораженности территории Московской области карьерами открытой добычи строительных материалов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2020. Т. 28. № 4. С. 349–360. <http://dx.doi.org/10.22363/2313-2310-2020-28-4-349-360>.
4. Петин А.Н., Толстопятова О.С., Петина М.А. Проблемы рекультивации земель, нарушенных горнодобывающим

комплексом: российский и зарубежный опыт // Sciences of Europe. 2017. № 13-1(13). С. 28–31.

5. Чечулина Т.В. Рекультивация нарушенных карьеров // 2021. № 27 (29). URL: <https://scilead.ru/article/679-rekultivatsiya-narushennikh-karero>
6. Восстановление нарушенных земель: выявленные тенденции / М.Н. Игнатьева, В.Е. Стровский, В.В. Юрак, А.Н. Иванов // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25, № 8. С. 54–59. DOI 10.18412/1816-0395-2021-8-54-59.
7. Информация о рекультивации земель // URL: <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/land-recultivatio>

REFERENCES

1. Land reclamation and measures for the restoration of disturbed landscapes / T.V. Papaskiri, S.N. Volkov, M.E. Ginzburg, V.N. Semochkin, E.P. Ananicheva. M.: State University for Land Management, 2024. 184 p. ISBN 978-5-9215-0575-9. EDN SKKFPZ.
2. Moiseenko V.V., Tsupikova N.A. Floristic and Ecobiomor-phological Features of the Amber Flooded Quarry Coast // Izvestiya KGTU. 2023. No. 70. Pp. 34–45.
3. Naumova K.O., Stanis E.V. Assessment of the Moscow Region Territory’s Exposure to Open-Pit Quarries for Construction Materials // Bulletin of the Russian University of Peoples’ Friendship. Series: Ecology and Life Safety. 2020. V. 28. No. 4. Pp. 349–360. <http://dx.doi.org/10.22363/2313-2310-2020-28-4-349-360>
4. Petin A.N., Tolstopyatova O.S., Petina M.A. Problems of recultivation of lands disturbed by the mining complex: Russian and foreign experience // Sciences of Europe. 2017. № 13-1(13). Pp. 28–31.
5. Chechulina T.V. Recultivation of disturbed quarries // 2021. № 27(29). URL: <https://scilead.ru/article/679-rekultivatsiya-narushennikh-karero>
6. Restoration of Disturbed Lands: Identified Trends / M.N. Ignatieva, V. E. Strovsky, V.V. Yurak, A.N. Ivanov // Ecology and Industry of Russia. 2021. Vol. 25, No. 8. Pp. 54–59. DOI 10.18412/1816-0395-2021-8-54-59.
7. Information about land reclamation // URL: <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/land-recultivatio>

Волков Александр Дмитриевич, аспирант 2-го года обучения, Av7061@gmail.com; **Несмачный Павел Юрьевич**, аспирант 2-го года обучения, ter_07@mail.ru; **Китаев Дмитрий Александрович**, аспирант 2-го года обучения, kda25@yandex.ru (ФГБОУ ВО Государственный университет по землеустройству, г. Москва, Россия).

УДК 51.74, 658.51

DOI: 10.32962/0235-2524-2025-4-22-27

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ОБНОВЛЕНИЯ ПАРКА МЕЛИОРАТИВНЫХ МАШИН

Ф.К. АБДРАЗАКОВ С.В. ЧУМАКОВА Д.Г. ГОРЮНОВ

Ключевые слова: мелиоративные машины, энергозатраты, математическая модель, оптимизация, техническое состояние.

Keywords: melioration complex, fleet of melioration machines, minimization of energy costs, working time fund, optimality coefficient of choice, mathematical model, control solution.

Аннотация. Цель: снижение энергозатрат мелиоративных машин за счет оптимизации сроков ремонта и замены техники. Методы: разработана математическая модель на основе анализа энергозатрат и выработки фонда рабочего времени с применением математического анализа, теории множеств, а также графической визуализации. Результаты: модель определяет оптимальные сроки профилактики

или замены машины, минимизируя энергозатраты. Выводы: эффективность мелиоративного производства повышается за счет поддержания парка машин в технически исправном состоянии, что подразумевает снижение энергозатрат при максимальном использовании фонда рабочего времени.

Abstract. Objective: reduce energy consumption of drainage machines by optimizing repair and replacement schedules. Methods: a mathematical model was developed based on the analysis of energy consumption and working time utilization using mathematical analysis, set theory, and graphical visualization. Results: the model determines optimal maintenance or replacement schedules for machines, minimizing energy consumption. Conclusions: the efficiency of drainage production is increased by maintaining the fleet of machines in good technical condition, which implies reduced energy consumption while maximizing working time utilization.

Введение. Одной из основных составляющих временного мелиоративного комплекса является парк машин, поддержание которого в оптимальном состоянии позволяет обеспечить выполнение годовой производственной программы с минимальными энергозатратами. При этом возможны два варианта: организация изначально оптимального парка машин или же создание и поддержание оптимальной структуры существующего машинного парка. И в том, и другом случаях техника должна подбираться с учетом потребности хозяйств, их ресурсной возможности, необходимости выполнения объемов работ, качественных показателей и установленных сроков. Такая задача имеет решение, благодаря анализу данных относительно энергозатрат и фонда рабочего времени, полученных при мониторинге технического состояния машин и на их основе принятию своевременного управляющего решения.

Цель исследования. Целью исследования в данной работе является снижение энергозатрат за счет применения методики и соответствующей ей математической модели, позволяющей поддерживать парк машин мелиоративного производства в оптимальном состоянии. В случае выявления нарушений баланса между фактическими энергозатратами и фондом рабочего времени такая методика помогает определить критический период времени по принятию управляющего решения и направляет его в сторону оптимального выбора.

Материалы и методы. Поддержание парка мелиоративных машин в рабочем состоянии предполагает своевременную диагностику его составляющих [1, 2]. Таким образом, для обеспечения его бесперебойного функционирования необходима разработка математической модели процесса оптимального обновления техники, позволяющей структурировать по временному ряду возникающие задачи и успешно их решать [3–5]. Комплексный мониторинг, совершенствование или обнов-

ление машин позволяют содержать парк в рабочем состоянии и вырабатывать фонд рабочего времени с минимальными энергозатратами [6–8].

В основу математической модели, позволяющей определить оптимальное решение при обновлении парка машин, положен временной ряд, позволяющий рассматривать эмпирически полученные статистические данные, как динамическую систему [9]. При этом совокупность всех машин парка представлена как множество элементов:

$$M_n = \{M_1, M_2, \dots, M_i, \dots, M_n\}. \quad (1)$$

Также введено множество (2):

$$\theta = \{\tau_{ij}\}, i = \overline{1; n}, j = \overline{1; m}, \quad (2)$$

элементы которого соответствуют определенному временному значению τ_{ij} , ч.

Жизненные циклы, которых описываются временными интервалами:

$$\theta_{IJ} = \{\theta_{ij}\}, i = \overline{1; n}, j = \overline{1; m}, \quad (3)$$

причем $\theta_{ij} = [\tau_{i-1j-1}; \tau_{ij}]$. (4)

При прогнозируемости продолжительности жизненного цикла машин можно учитывать различные характеристики или их совокупность, описываемые множеством:

$$\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_l\}, l = \overline{1; \infty}. \quad (5)$$

В данном случае одной из характеристик (5) являются показатели энергозатрат на производство работ машиной, так как они являются одними из основополагающих критериев в формировании и оценке ее жизненного цикла:

$$\Theta_{\text{раб}IJ} = \{\Theta_{\text{раб}ij}\}, i = \overline{1; n}, j = \overline{1; m}, \quad (6)$$

где $\Theta_{\text{раб}ij}$ – энергозатраты на производство работ машиной, кВт/ед.изм. (единицы измерения зависят от вида машин и выполняемых ими работ, например, для однокорового экскаватора при разработке грунта – м³).

На рис. 1 изображены жизненные циклы машин M_1 и M_2 на временном промежутке:

$$\theta_{IJ} = \{\theta_{ij}\} = \{[\tau_{i-1j-1}; \tau_{ij}]\}, i = \overline{1; 2}, m = \overline{1; 2k}, \quad (7)$$

В рассматриваемом случае множество Θ_{IJ} содержит, в частности, два подмножества, а именно:

$$\theta_{1j} = \{\tau_{1,0}, \dots, \tau_{1,k+1}\} \text{ и } \theta_{2j} = \{\tau_{2,0}, \dots, \tau_{2,k+1}\}. \quad (8)$$

Элементы указанных подмножеств располагаются на оси времени τ .

Для построения графика функции, отражающего жизненный цикл машины, взяты оси τ_i и $\Theta_{\text{раб}}$, в рамках которых построена ступенчатая функция: $\Theta_{\text{раб}} = \Theta_{\text{раб}}(\tau)$. (9)

На оси $\Theta_{\text{раб}}$ находятся значения функции энергозатрат, соответствующих временным промежуткам $[\tau_{i-1j-1}; \tau_{ij}]$.

Необходимо заметить, что элементы множеств $\Theta_{\text{раб}ij}$ и Θ_{ij} определяются, опираясь на эмпирические данные, и функциональная зависимость между этими множествами:

$$\Theta_{\text{раб}ij} = \Theta_{\text{раб}ij}(\theta_{ij}) \tag{10}$$

или с учетом формул (1)–(9):

$$\Theta_{\text{раб}ij} = \begin{cases} 0, \tau_{ij} \leq 0; \\ \Theta_{\text{раб}ij}, \tau \in [\tau_{i-1j-1}; \tau_{ij}]; \\ \Theta_{\text{раб}max}, \tau_{ij} \geq \tau_{ik+1}. \end{cases} \tag{11}$$

Оценка энергозатрат машиной M_i отражена при подсчете площади:

SM_i : ось $O\tau$, ось $O\Theta_{\text{раб}}$, функция $\Theta_{\text{раб}ij}$,

и машиной M_{i+1}

SM_{i+1} : ось $O\tau$, ось $O\Theta_{\text{раб}}$, функция $\Theta_{\text{раб}i+1j}$.

Машина M_{i+1} может быть получена при различных вариантах:

$$URM = \begin{cases} \text{Новая машина (URM}_1\text{);} \\ \text{Капитально отремонтированная} \\ \text{машина (URM}_2\text{);} \\ \text{Модернизированная машина} \\ \text{(URM}_3\text{);} \\ \text{Машина, бывшая ранее} \\ \text{в эксплуатации (URM}_4\text{);} \\ \text{Машина без изменений (URM}_5\text{).} \end{cases} \tag{12}$$

Фактически, варианты (12) представляют множество управляющих решений URM .

При выборе оптимального варианта из множества управляющих решений (12) удобно воспользоваться графическим представлением жизненных циклов мелиоративных машин, представленных на рис. 1.

Главной характеристикой при выборе вариантов (12) является наличие более низких энергозатрат при выполнении одинаковых видов работ, то есть:

$$SM_i \geq SM_{i+1}, \theta_{1j} = \theta_{2j}. \tag{13}$$

При этом затраты, связанные с получением машины M_{i+1} отражаются в приращении по оси энергозатрат на интервале $[\tau_{i,k+1}; \tau_{i+1,0}]$, а именно:

$$\Delta\Theta_{\text{раб}i,i+1} = \Theta_{\text{раб}i+1} - \Theta_{\text{раб}i}. \tag{14}$$

Также существует взаимосвязь между энергозатратами, фондом рабочего времени Φ и управляющим решением, как для отдельно взятой единицы техники, так и для парка машин в целом, что отражено на графике (рис. 2). При этом фонд

рабочего времени также служит характеристикой из множества (5).

Общий вид функциональной взаимосвязи между задействованными величинами:

$$Y_{ij} = \begin{cases} 0, X_{ij} = 0; \\ Y_{ij}, X_{ij} \neq 0, Y_{\text{раб}ij} = \frac{1}{X_{ij}}, \tau_{ij} > \tau_{ij}^*, \end{cases} \tag{15}$$

где τ_{ij}^* – критическое значение, при котором $Y_{ij} = X_{ij}$, определяющее сроки принятия управляющего решения (12) по поводу проведения мероприятий минимизирующих энергозатраты с сохранением фонда рабочего времени.

Для наглядного изображения зависимостей одной величины от другой удобно использовать системы координат, использующие соответствующие обозначения осей (рис. 1, 2).

В функциональном плане, используя вид (15), зависимость между энергозатратами и фондом рабочего времени выглядит следующим образом:

$$\Theta_{\text{раб}ij} = \begin{cases} 0, \Phi_{ij} = 0; \\ \Theta_{\text{раб}ij}, \Phi_{ij} \neq 0, \Theta_{\text{раб}ij} = \frac{1}{\Phi_{ij}}, \tau_{ij} > \tau_{ij}^*, \end{cases} \tag{16}$$

где τ_{ij}^* – критическое значение, при котором $\Theta_{\text{раб}ij} = \Phi_{ij}$, определяющее сроки принятия управляющего решения (12) по поводу проведения мероприятий минимизирующих энергозатраты с сохранением фонда рабочего времени.

Так как зависимость энергозатрат и фонда рабочего времени носит функциональный характер, то ее графическое изображение возможно представить в системах координат с осями $(\Theta_{\text{раб}}, \tau)$ и (Φ, τ) , объединенных авторами в один рис. 2 для наглядного изображения их совместимости. Пересечение графиков указанных функций, являющихся взаимнообратными, на рис. 2 отражают критические значения для выбора управляющего решения из возможных вариантов, перечисленных в системе (12). Также следует отметить вид графиков, так как с учетом временных промежутков, рассматриваемые функции являются ступенчатыми.

Множество критических значений τ_{ij}^* определяется выражением:

$$\tau_{ij}^* = \{\tau_{ij} : \Theta_{\text{раб}ij} = \Phi_{ij}\}. \tag{17}$$

И фактически является решением алгебраической системы:

$$\begin{cases} \Theta_{\text{раб}} = K_1 \Theta_{\text{раб}}(\tau); \\ \Phi = K_2 \Phi(\tau). \end{cases} \tag{18}$$

В системе (17) K_1 и K_2 являются коэффициентами соответствия и введены для приведения графиков к единому масштабу.

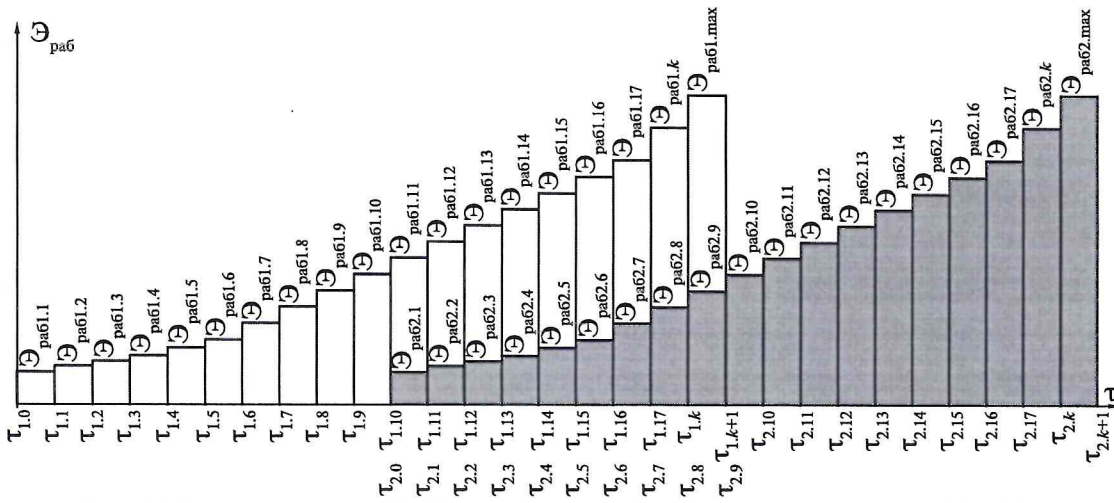


Рис. 1. Переход машины $M_i(M_1)$ к варианту ее замены на новую машину $M_{i+1}(M_2)$

При наличии выбора вариантов (от 1 до r) обновления парка машин, решающим является максимальное значение коэффициента $k^*_{эmax}$ из возможных $k^*_{э} = \{k^*_{э1}, \dots, k^*_{эr}\}$.
 На рис. 1 в качестве примера представлено графическое изо-

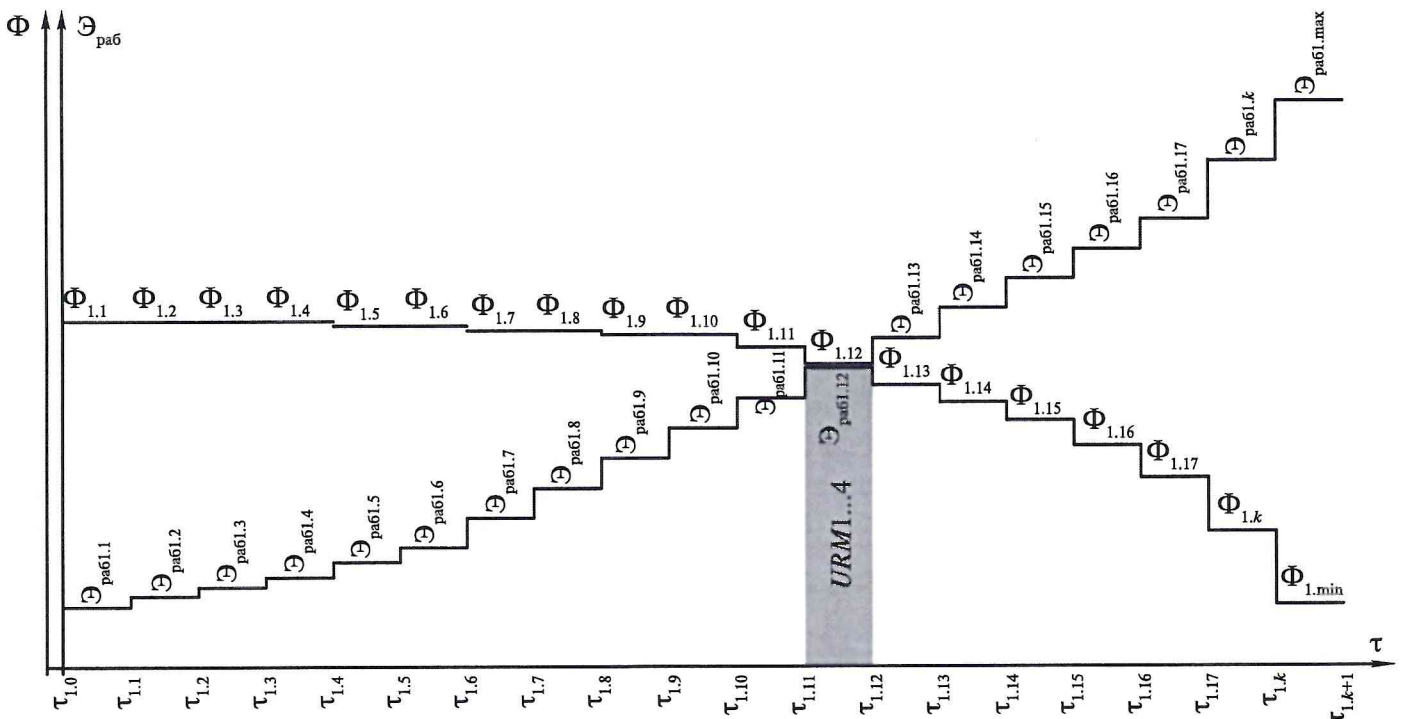


Рис. 2. Критические значения энергозатрат и фонда рабочего времени машины для принятия управляющего решения URM

Дальнейшие исследования соотношения энергозатрат и фонда рабочего времени для машины M_i имеют смысл после достижения ими критического значения в точке пересечения графиков, соответствующей τ^*_{ij} (рис. 2) [10].

Введенный авторами коэффициент $k^*_{э}$ (формула (19)) показывает оптимальность выбора при различных условиях (12):

$$k^*_{э} = \frac{S_{M_i}}{S_{M_{i+1}}}, \quad (19)$$

где $k^*_{э}$ – коэффициент, демонстрирующий оптимальность перехода от варианта машины M_i к варианту машины M_{i+1} , то есть является критерием для выбора оптимального управляющего решения (12).

бражение возможных вариантов (12) при переходе одного из вариантов к следующему и уточнение Θ_{1j} . Рассмотрен случай для $i=1$ и $j=0$; $k+i$ тогда, $M_i=M_1$, $M_{i+1}=M_2$ и $\Theta_{1j} = [\tau_{1,0}; \tau_{1,k+1}]$, $\Theta_{2j} = [\tau_{2,0}; \tau_{2,k+1}]$. Жизненные циклы машин в примере описаны, как для имеющейся машины, так и для точно такой же, но новой машины. Аналогично можно построить графики для вариантов: капитального ремонта, модернизации и замены машиной ранее бывшей в эксплуатации [11, 12].

Также авторами установлен оптимальный временной промежуток эксплуатации машины M_i и переход ее на другой уровень технических характеристик, то есть, на машину M_{i+1} , а именно: критическим становится тот элемент временного

ряда τ_{ij}^* , при котором выполняется условие (17) и находится решение системы (18). В этом случае возможен переход к формуле (12), позволяющий определить наиболее рациональное управляющее решение [13].

Формулы (1)–(18) в совокупности дают решение задачи относительно определения оптимального времени принятия управляющего решения и его содержания, что отображено алгоритмом [14, 15]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{ij}^* = \{\tau_{ij} : \mathcal{E}_{\text{раб}ij} = \Phi_{ij}\}; \\ URM = \left\{ URM : \left\{ \begin{array}{l} 0 < k_3^* < 1, (URM_5) \\ k_3^* > 1, URM_1 - URM_4 \end{array} \right\} \right\}. \end{array} \right. \quad (20)$$

Результаты и обсуждение. Решим практическую задачу с применением представленных выше теоретических исследований.

Например, имеется одноковшовый экскаватор 3-й размерной группы ЭО-3323. Мощность двигателя – 55 кВт, техническая производительность – 25 м³/ч, годовой фонд рабочего времени – 2330 маш.-ч. Коэффициент, учитывающий местные условия объекта – 0,95.

Тогда эксплуатационную производительность Π_3 (м³/ч) можно определить:

$$\Pi_3 = \Pi_T K_{\text{усл}}, \quad (21)$$

где Π_T – техническая производительность машины, м³/ч; $K_{\text{усл}}$ – коэффициент, учитывающий местные условия на объекте (коэффициент местных условий может принимать значения от 0 до 1).

$$\Pi_3 = 25 \cdot 0,95 = 23,75 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Удельную энергоёмкость работы машины на производственном объекте $\mathcal{E}_{\text{уд}}$, кВт·ч/м³, рассчитываем по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{уд}} = \frac{N_{\text{дв}}}{\Pi_3}, \quad (22)$$

где $N_{\text{дв}}$ – мощность двигателя машины, кВт.

$$\mathcal{E}_{\text{уд}} = 55 / 23,75 = 2,316 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3.$$

Годовые энергозатраты (с учетом, что машина работает весь запланированный фонд рабочего времени), определяем по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{раб}} = \mathcal{E}_{\text{уд}} \Phi, \quad (23)$$

где Φ – годовой фонд рабочего времени машины, маш.-ч.

$$\mathcal{E}_{\text{раб}} = 2,316 \cdot 2330 = 5396 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3.$$

Применяя формулы (1)–(16) и алгоритм (20), получаем, что для конкретных производственных условий $\tau_{ij}^* = 10$.

Следовательно, через 10 лет, используя формулу (19) возможно осуществить выбор оптимального решения относительно дальнейшего жизненного цикла экскаватора. Получив значение

коэффициента $k_3^* > 1$, принимаем управляющее решение из (12) о замене машины на новую.

Выводы. Для поддержания парка мелиоративных машин M_i в рабочем состоянии необходимо проводить постоянный мониторинг их технической составляющей, анализируя соответствие таких характеристик, как энергозатраты $\mathcal{E}_{\text{раб}ij}$ и фонд рабочего времени Φ_{ij} . При наступлении критического периода τ_{ij}^* необходимо принимать оптимальное управляющее решение о проведении мероприятий, призванных восстановить баланс между энергозатратами машины и фондом рабочего времени.

В представленной работе нами разработана методика выбора оптимального управляющего решения, позволяющая обеспечить необходимое равновесие между энергозатратами $\mathcal{E}_{\text{раб}ij}$ и фондом рабочего времени Φ_{ij} .

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдразаков Ф.К., Горюнов Д.Г. Оптимизация формирования парков машин и распределения техники по производственным объектам // Строительные и дорожные машины. 2002. № 3. С. 12–14. EDN: UKPMVN.
2. Соловьев Д.А., Чумакова С.В., Гончаров Р.Д. Математическая модель организации технического сервиса // Технический сервис машин. 2024. Т. 62, № 2. С. 27–32. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-2-27-32. EDN: SHIBQC.
3. Чумакова С.В., Горюнов Д.Г., Загоруйко М.Г. Математическая модель оптимизации формирования парка машин // Природообустройство. 2025. № 1. С. 56–62. DOI: 10.26897/1997-6011-2025-1-56-62. EDN: NUYXIO.
4. Кравчук А.В., Бельтиков Б.Н., Панкова Т.А. Особенности работы широкозахватной дождевальной машины фронтального передвижения и обоснование силового расчета центральной подвижной опоры // Мелиорация и гидротехника. 2024. Т. 14, № 4. С. 243–257. DOI: 10.31774/2712-9357-2024-14-4-243-257. EDN: XYUJOV.
5. Вероятность появления повреждений и отказов на трубопроводах оросительных систем / С.С. Орлова, А.В. Кравчук, Т.А. Панкова, О.В. Михеева, Е.Н. Миркина // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т.13, № 2. С. 109–122. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-109-122. EDN: AZHAVY
6. Комплексный мониторинг технического состояния концевого водоспуска Невинномысского канала, базирующийся на оценке параметров надежности / М.А. Бандурин, В.А. Волосухин, И.А. Приходько, А.А. Руденко // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 2. С. 264–280. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-264-280. EDN: ZELKMQ.
7. Колганов Д.А. Совершенствование и разработка широкозахватных дождевальных машин и дождевальной техники // Техногенная и природная безопасность: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. Саратов: СГАУ имени Н.И. Вавилова, 2017. С. 37–42.
8. Разработка сменных рабочих органов мелиоративного каналоочистителя ОКН-0,5 / Х.А. Абдулмажидов, В.И. Балабанов, Н.Б. Мартынова, А.А. Макаров // Мелиорация и водное хозяйство. 2023. № 6. С. 36–40. DOI: 10.32962/0235-2524-2023-6-40-43. EDN: YHJDW.

9. Нижников А.И., Яремко О.Е., Яремко Н.Н. Матричные интегральные преобразования для моделирования волновых процессов в кусочно-однородных средах // Чебышевский сборник. 2023. Т. 24, № 4(90). С. 239–251. DOI: 10.22405/2226-8383-2023-24-4-239-251. EDN: YCKUUY.

10. Нгуен Т., Ахметов И.З., Галимянов А.Ф. Численный метод решения интегральных уравнений Фредгольма и Вольтерра с помощью искусственных нейросетей // Чебышевский сборник. 2024. Т. 25, № 5(96). С. 126–139. DOI: 10.22405/2226-8383-2024-25-5-126-139. EDN: QYHQIV.

11. Численное моделирование усталостного разрушения на основе нелокальной теории циклической повреждаемости / Н.Г. Бураго, И.С. Никитин, А.Д. Никитин, Б.А. Стратула // Математическое моделирование. 2024. Т. 36, № 3. С. 3–19. DOI: 10.20948/mm-2024-03-01. EDN: PZGYDB.

12. Вероятность появления повреждений и отказов на трубопроводах оросительных систем / С.С. Орлова, А.В. Кравчук, Т.А. Панкова, О.В. Михеева, Е.Н. Миркина // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 2. С. 109–122. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-109-122. EDN: AZHAVY.

13. Бакланова Д.В. Анализ проблем функционирования Сарпинской обводнительно-оросительной системы в Республике Калмыкия // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12, № 2. С. 209–222. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-2-209-222. EDN: EPHACL.

14. Мясоедов А.И. Современные экономико-математические методы и модели в процессе принятия управленческих решений // Проблемы и перспективы экономики и управления: материалы VI Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, 20–23 дек. 2017 г.). СПб.: Свое изд-во, 2017. С. 150–153. EDN: QJXJLB.

15. Theoretical concept of augmented reality application in the maintenance of agricultural tractors / S.V. Chumakova, R.D. Goncharov, O.V. Kabanov, A.V. Rusinov // Digital Technologies in Agriculture of the Russian Federation and the World Community. Ставрополь, 27–30 сент. 2021 г. AIP PUBLISHING, 2022. Т. 2661. 110002. EDN: IXETZV.

REFERENCES

1. Abdrazakov F.K., Goryunov D.G. Optimization of formation of machine parks and distribution of equipment among production facilities // Construction and road machines. 2002. No. 3. Pp. 12–14. EDN: YKPMVH.

2. Soloviev D.A., Chumakova S.V., Goncharov R.D. Mathematical model of technical service organization // Technical service of machines. 2024. Vol. 62, No. 2. Pp. 27–32. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-2-27-32. EDN: SHIBQC.

3. Chumakova S.V., Goryunov D.G., Zagoruiko M.G. Mathematical model of optimization of formation of machine park // Nature management. 2025. No. 1. P. 56–62. DOI: 10.26897/1997-6011-2025-1-56-62. EDN: NUYYXIO.

4. Kravchuk A.V., Beltikov B.N., Pankova T.A. Features of the operation of a wide-capacity frontal irrigation machine and justification of the power calculation of the central movable support // Melioration and hydraulic engineering. 2024. Vol. 14, No. 4. P. 243–257. DOI: 10.31774/2712-9357-2024-14-4-243-257. EDN: XTYJOV.

5. Probability of Damage and Failures in Irrigation System Pipelines / S.S. Orlova, A.V. Kravchuk, T.A. Pankova, O.V. Mikheeva, E.N. Mirkina // Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2023. Vol. 13, No. 2. Pp. 109–122. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-109-122. EDN: AZHAVY

6. Integrated Monitoring of the Technical Condition of the Nevinnomysk Canal End Discharge Based on the Assessment of Reliability Parameters / M.A. Bandurin, V.A. Volosukhin, I.A. Prikhodko, A.A. Rudenko // Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2023. Vol. 13, No. 2. Pp. 264–280. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-264-280. EDN: ZELKMQ.

7. Kolganov D. A. Improvement and development of wide-capacity irrigation machines and irrigation equipment // Technogenic and natural safety: proceedings of the IV All-Russian scientific and practical conference. Saratov: SAU named after N.I. Vavilov, 2017. Pp. 37–42.

8. Development of replaceable working bodies of the OKN-0.5 melioration channel cleaner / Kh.A. Abdulmashidov, V.I. Balabanov, N.B. Martynova, A.A. Makarov // Melioration and water management. 2023. No. 6. Pp. 36–40. DOI: 10.32962/0235-2524-2023-6-40-43. EDN: YJHJDW.

9. Nizhnikov A.I., Yaremko O.E., Yaremko N.N. Matrix integral transformations for modeling wave processes in piecewise homogeneous media // Chebyshevsky collection. 2023. Vol. 24, No. 4(90). P. 239–251. DOI: 10.22405/2226-8383-2023-24-4-239-251. EDN: YCKUUY.

10. Nguyen T., Akhmetov I.Z., Galimyanov A.F. Numerical method for solving Fredholm and Volterra integral equations using artificial neural networks // Chebyshevskii sbornik. 2024. Vol. 25, No. 5(96). P. 126–139. DOI: 10.22405/2226-8383-2024-25-5-126-139. EDN: QYHQIV.

11. Numerical modeling of fatigue failure based on the nonlocal theory of cyclic damage / N.G. Burago, I.S. Nikitin, A.D. Nikitin, B.A. Stratula // Mathematical modeling. 2024. Vol. 36, No. 3. P. 3–19. DOI: 10.20948/mm-2024-03-01. EDN: PZGYDB.

12. Probability of Damage and Failures in Irrigation System Pipelines / S.S. Orlova, A.V. Kravchuk, T.A. Pankova, O.V. Mikheeva, E.N. Mirkina // Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2023. Vol. 13, No. 2. Pp. 109–122. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-109-122. EDN: AZHAVY.

13. Baklanova D.V. Analysis of Problems of Operation of the Sarpinskaya Irrigation and Water Supply System in the Republic of Kalmykia // Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2022. Vol. 12, No. 2. Pp. 209–222. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-2-209-222. EDN: EPHACL.

14. Myasoedov A.I. Modern economic and mathematical methods and models in the process of making management decisions // Problems and Prospects of Economics and Management: Proc. VI Intern. scientific conf. (St. Petersburg, December 20–23, 2017). SPb.: Svoe Publishing House, 2017. Pp. 150–153. EDN: QJXJLB.

15. Theoretical concept of augmented reality application in the maintenance of agricultural tractors / S.V. Chumakova, R.D. Goncharov, O.V. Kabanov, A.V. Rusinov // Digital Technologies in Agriculture of the Russian Federation and the World Community. Stavropol, September 27–30 2021 AIP PUBLISHING, 2022. Т. 2661. 110002. EDN: IXETZV.

Абдразаков Фярид Кинжаевич, доктор техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор, *abdrazakov.fk@mail.ru*, ORCID: 0000-0003-3247-5257; **Чумакова Светлана Валентиновна**, канд. техн. наук, доцент, *ch-sv@yandex.ru*, ORCID: 0000-0002-2877-0758; **Горюнов Дмитрий Геннадьевич**, канд. техн. наук, доцент, *md111@bk.ru*, ORCID: 0000-0001-6208-640X (Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, г. Саратов, Россия).