

DOI  
УДК 519.85

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ О ЗАМЕНЕ ОБОРУДОВАНИЯ**  
**В.В. Королева, Е.Г. Филиппов, В.В. Ячменёва, Б.Г. Зиганшин**

**Реферат.** Исследование проводили с целью решения задачи о замене оборудования и создания математической модели задачи управляемой оптимизации, как наиболее полного и приближенного к реальности описания производственного процесса. В исследовании использовали принцип оптимальности Беллмана, так как при решении задач динамического программирования это обобщающий принцип. Для решения в качестве исходной математической модели выбрано функциональное уравнение Беллмана:

$$F_k(t_k) = \max_u \begin{cases} R(t_k) - Z(t_k) + F_{k+1}(t_{k+1}) \text{ при } u_1; \\ R(t_k = 0) - Z(t_k = 0) - C + F_{k+1}(t_{k+1} = 1) \text{ при } u_2. \end{cases}$$

Достоинство такой математической модели заключается в возможности модификации задачи. На первом шаге предлагается продавать замененное оборудование по цене  $(R(t_k) - Z(t_k))p$ ,  $0 < p < 1$ , где  $p$  – коэффициент уценки при продаже. Далее, устанавливаемое оборудование может быть не новым и приобретенным по цене  $((R(t_k) - Z(t_k))q)$ ,  $0 < q < 1$ , где  $q$  – коэффициент уценки при покупке, который задается на входе. Оборудование, бывшее в употреблении, дешевле нового, а продажа замененного оборудования вносит добавку в прибыль. С учетом этого в вектор управления необходимо добавить новые компоненты – возраст устанавливаемого оборудования (не нового). Структура управления становится более сложной и реалистичной. При многочисленных испытаниях программы эффект «проклятия размерности» не проявляется. Разработано три модификации задачи о замене оборудования: замененное оборудование выбрасывается; его можно не выбрасывать, а продать по цене  $(R_k(t_k) - Z_k(t_k))p$ , где  $p$  – коэффициент уценки  $0 < p < 1$ ; можно увеличить прибыль, если покупать не новое оборудование. В работе рассматривается вариант добавления в вектор управления еще одной компоненты – «омолаживающий» ремонт оборудования. После такого ремонта возраст оборудования становится, например, на год меньше. Затраты на ремонт берутся из графика зависимости прибыли от стоимости ремонта, который получен из результатов прогонов программы. Объединение рассмотренных модификаций в одно целое представляет собой математическую модель задачи о замене оборудования, которая положена в основу программы.

**Ключевые слова:** математическая модель, оборудование, динамическое программирование, оптимизация, замена оборудования, принцип оптимальности Беллмана.

**Введение.** Одна из современных проблем производства – замена старого оборудования, которое изнашивается, теряя производительность и стоимость, морально устаревает. Необходимо составить план замены и ремонта оборудования на заданный период его работы. Такой план – управляемая, оптимальная стратегия за это время.

Постановка задачи управляемой оптимизации – наиболее полное и приближенное к реальности описание производственного процесса [1].

Принцип оптимальности Беллмана в задаче динамического программирования в наибольшей мере служит обобщенным математическим описанием таких задач [2, 3, 4]. При такой постановке достаточно просто вносить изменения в задачу: в целевую функцию, в структуру вектора управления, в ограничения задачи.

За основу математической модели исследования выбрана модель задачи динамического программирования и составлено функциональное уравнение.

Рассмотрим модельный пример классической задачи динамического программирования: оборудование эксплуатируется 5 лет (этапы с  $k=1$  по  $k=5$ ); состояние системы определяет параметр  $t_k$  – возраст оборудования; стоимость покупки и замены нового

оборудования – 40 тыс. руб.; годовой выпуск продукции  $R(t_k)$  – в стоимостном выражении; ежегодные затраты, связанные с содержанием и ремонтом оборудования  $Z(t_k)$ ; замененное оборудование списывается.

Управление:  $u_1$  – решение о сохранении оборудования,  $u_2$  – оборудование заменяется новым.

Для решения применим функциональное уравнение Беллмана:

$$F_k(t_k) = \max_u \begin{cases} R(t_k) - Z(t_k) + F_{k+1}(t_{k+1}) \text{ при } u_1; \\ R(t_k = 0) - Z(t_k = 0) - C + F_{k+1}(t_{k+1} = 1) \text{ при } u_2. \end{cases}$$

Такая постановка задачи дает возможность вносить различные модификации.

На первом шаге предлагается продавать замененное оборудование по цене  $(R(t_k) - Z(t_k))$ , умноженной на процент (скидку). Например, 70 % от  $(R(t_k) - Z(t_k))$ .

Величина  $(R(t_k) - Z(t_k))$  – ориентир цены оборудования, возраст которого –  $t_k$ , где  $k$  – номер года или номер этапа в многошаговом процессе.

Для покупки оборудования необходимо сделать скидку – продать его по цене  $(R(t_k) - Z(t_k))p$ ,  $0 < p < 1$ ,  $p$  – коэффициент уценки при продаже.

Размер процента скидки при продаже  $p$  – входная величина в реализуемой программе.

Далее устанавливаемое оборудование может быть не новым и приобретенным по цене  $((R_k(t_k)-Z_k(t_k))q, 0 < q < 1$ . Здесь  $q$  – коэффициент уценки при покупке и задается на входе. Оборудование, бывшее в употреблении, дешевле нового, продажа замененного оборудования так же вносит добавку в прибыль. В вектор управления необходимо добавить новые компоненты – возраст устанавливаемого оборудования (не нового). Структура управления становится более сложной и реалистичной. При многочисленных испытаниях программы эффект «проклятия размерности» не проявляется.

Цель исследования – расширение поставленной задачи динамического программирования с использованием набора различных модификаций.

**Условия, материал и методы.** Рассмотрим функциональное уравнение Беллмана для задачи о замене оборудования:

$$F_k(t_k) = \max_u \begin{cases} R(t_k) - Z(t_k) + F_{k+1}(t_{k+1}) \text{ при } u_1; \\ (R(t_k) - Z(t_k))p + R(t_k = 0) - Z(t_k = 0) - C + F_{k+1}(t_{k+1} = 1) \text{ при } u_2. \end{cases}$$

где  $u_1$  – оборудование не меняется,  $u_2$  – оборудование заменяется на новое,  $C$  – стоимость замены и покупки нового оборудования,  $F_k(t_k)$  – функция Беллмана – суммарная прибыль, полученная начиная с  $k$ -го до последнего года эксплуатации оборудования,  $R(t_k)$  – годовой выпуск продукции в стоимостном выражении,  $Z(t_k)$  – ежегодные затраты, связанные с содержанием и ремонтом оборудования. Возможны три модификации задачи о замене оборудования.

1. Замененное можно не выбрасывать, а продать по цене  $(R_k(t_k)-Z_k(t_k))p$ , где  $p$  – коэффициент уценки  $0 < p < 1$ .

Функциональное уравнение Беллмана соответственно модифицируется:

Очевидно, что значение целевой функции увеличится.

2. Можно увеличить прибыль, если покупать не новое оборудование. Например, однолетнее  $u_3$ , двухлетнее  $u_4$ , трехлетнее  $u_5$ . Очень старое оборудование, в нашем примере возрастом более 3-х лет, наверное, покупать не

стоит, хотя все зависит от значений функций  $R_k(t_k), Z_k(t_k)$  – производительности и затрат на ремонт и обслуживания соответственно,  $t_k$  – возраст оборудования к началу  $k$ -го года.

Уравнение Беллмана примет вид:

Следует учесть, что компонента  $C$  состоит

$$F_k(t_k) = \max_u \begin{cases} R(t_k) - Z(t_k) + F_{k+1}(t_{k+1}) \text{ при } u_1, \\ R(t_k = 0) - Z(t_k = 0) - C + F_{k+1}(t_{k+1} = 1) \text{ при } u_2, \\ R(t_k = 1) - Z(t_k = 1) - C + F_{k+1}(t_{k+1} = 2) \text{ при } u_3, \\ R(t_k = 2) - Z(t_k = 2) - C + F_{k+1}(t_{k+1} = 3) \text{ при } u_4, \\ R(t_k = 3) - Z(t_k = 3) - C + F_{k+1}(t_{k+1} = 4) \text{ при } u_5. \end{cases}$$

из двух слагаемых: первое  $(R_k(t_k)-Z_k(t_k))q$  – стоимость покупки не нового оборудования возраста  $t_k$ , или нового плюс продажа старого оборудования  $(R_k(t_k)-Z_k(t_k))p$ , где  $p, q$  – коэффициенты оценки  $0 < q < 1, q < p$ ; второе – стоимость установки оборудования.

Вектор управления  $(u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$  – содержит пять компонент.

3. Возможно добавление еще одной компоненты в вектор управления  $u_6$  – «омолаживающий» ремонт оборудования. После такого ремонта возраст оборудования становится, например, на год меньше. Затраты на ремонт берутся из графика зависимости полученной прибыли от стоимости ремонта, построенного по результатам прогонов программы: Автоматизация расчета оптимального управления заменой, продажей и ремонтом оборудования.

Объединение рассмотренных модификаций в одно целое представляют собой математическую модель задачи о замене оборудования, которая положена в основу программы автоматизации расчета оптимального управления заменой, продажей и ремонтом оборудования [5].

Исходные данные (табл. 1) могут быть взяты, например, из статистических показателей работы оборудования на предприятии. Для нашего исследования были выбраны тестовые величины, полученные в результате нескольких прогонов программы, использование которых дает возможность наиболее полно раскрыть специфику задачи.

Таблица 1 – Исходные данные

	Время, в течение которого используется оборудование (лет)					
	0	1	2	3	4	5
Годовой выпуск продукции $R(t)$ в стоимостном выражении (у.е)	80	75	65	60	60	55
Ежегодные затраты $Z(t)$ , связанные с содержанием и ремонтом оборудования (у.е)	20	25	30	35	45	55

Функции  $Z(t)$  и  $R(t)$  аппроксимированные из результатов наблюдений или из законов теории надежности, могут быть заданы в аналитическом виде.

Дополнительные данные (табл. 2), определяют расширение задачи, по сравнению

с модельной, с учетом вариативности условий установки, продажи старого и покупки нового оборудования.

Период эксплуатации оборудования выбирается обычно в интервале 5...10 лет. При более длительной работе оно морально

устаревает, сильно изнашивается, накапливаются усталостные эффекты[6].Понижающий коэффициент продажи старого оборудования считается меньшим, чем для покупки не нового оборудования, что может быть связано, например, с предпродажной подготовкой (это не абсолютное утверждение).

Программа автоматизации расчета оптимального управления заменой, продажей и ремонтом оборудования отработает и другие варианты величин указанных коэффициентов [2].

Затраты на приобретение и установку оборудования могут быть разделены.

Таблица 2 – Дополнительные данные

Параметр	Значение
Длительность рассматриваемого периода	5
Затраты, связанные с приобретением и установкой нового оборудования	40
Возраст оборудования в начале пятилетки	4
Понижение коэффициента при продаже оборудования (s)	0,3
Понижение коэффициента при покупке б/у оборудования (b)	0,49
Стоимость ремонта старого оборудования (работает как на год моложе, г)	15

**Анализ и обсуждение результатов.**

Результатом работы программы служит построение сетевого графа, отражающего вариативность оптимальных планов управления. В функциональном уравнении Беллмана управление выбирается путем расчета максимума целевой функции. Её одинаковые значения возможны при разных вариантах управления. В результате получаются разветвления в управляющей стратегии, приводящие к одинаковым значениям целевой функции.

Такое разнообразие вариантов управления позволяет проанализировать его стратегию и осуществить выбор, учитывая, например, ранее не рассмотренные факторы [7-10].

Кроме того, для каждой итерации расчёта составляются таблицы условно оптимальных решений и системы функциональных уравнений Беллмана [11, 12]. Это позволяет

контролировать реализацию и отладку вычислительного алгоритма в программе, а также изменять структуру входных данных.

В качестве дополнительного функционала в программе, возможно, строить график зависимости полученной прибыли от стоимости ремонта оборудования, выраженной в условных единицах. На основе его анализа можно определить, при какой стоимости ремонт рационален, а при какой нет. Такой анализ позволяет определиться с вводом значения входного параметра «стоимость ремонта», исходя из ранее полученных результатов работы программы [13, 14, 15].

Пример результатов работы программы с тестовыми параметрами

В начале работы программы вводятся исходные и дополнительные данные (интерфейс ввода данных см. табл. 1, 2).

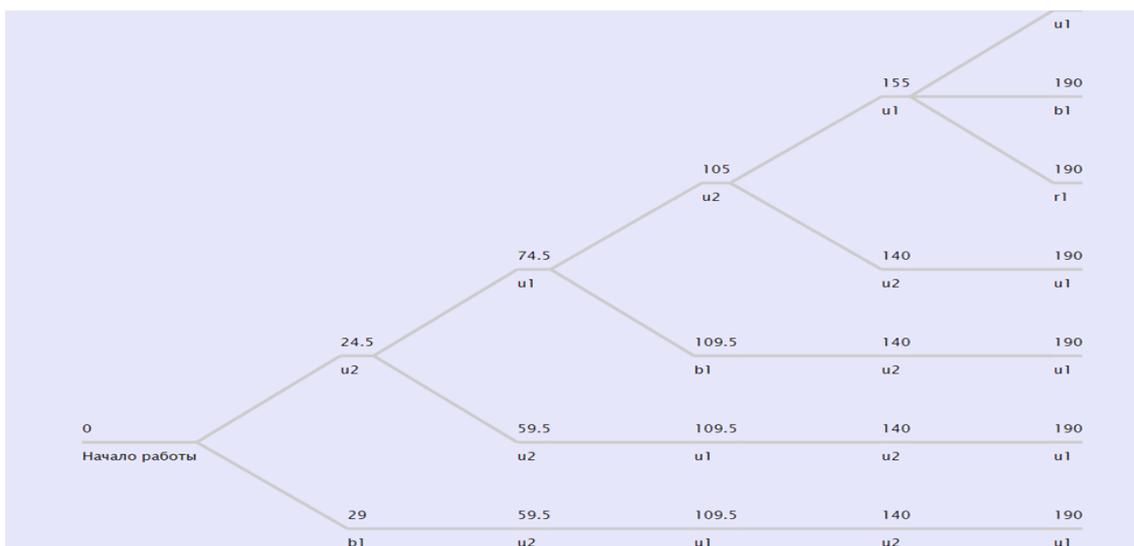


Рис. 3 – Интерфейс вывода в виде сетевой модели

В результате прогона программы на экран так же выводится график зависимости прибыли от стоимости ремонта (рис. 4). Путем его анализа можно определить целесообразность

«омолаживающего» ремонта.

Это актуально только в том случае, если цена такого ремонта (оборудование становится моложе на 1 год) не превосходит

стоимости покупки и установки аналогичного по возрасту оборудования. Эта диаграмма интерактивна. При наведении курсора мыши на точку на карте появляется информация о возможной прибыли, связанной с ремонтом

оборудования за такую цену. Кроме того, программа выводит на экран математическую запись функционального уравнения Беллмана, что дает возможность следить за логикой вычислительного процесса [16, 17].



Рис. 4 – Зависимость полученной прибыли от стоимости ремонта

**Выводы.** Математическое представление задачи в виде функционального уравнения Беллмана облегчает программную реализацию алгоритма. Рассмотренная модель позволяет

проводить ряд модификаций и осуществлять их программную реализацию, что дает возможность расширить модель, делая ее более реалистичной.

#### Литература

1. Мезенцев Ю. А., Короткова Ю. Л., Эстрайх И. В. Эффективный алгоритм решения прикладной задачи оптимизации расписаний параллельно-последовательной системы // Информационные технологии. 2021. Т. 27. № 12. С. 642-650. doi: 10.17587/it.27.642-650.
2. Xinyu L., Liang G. An effective hybrid genetic algorithm and tabu search for flexible job shop scheduling problem // International Journal of Production Economics. 2016. No. 174. P. 93–110.
3. Jie H., Qingguo L., Dehua X. Scheduling two parallel machines with machine-dependent availabilities // Computers & Operations Research. 2016. No. 72. P. 31–42.
4. A multi objective optimization approach for flexible job shop scheduling problem under random machine breakdown by evolutionary algorithms / A. Ehsan, Z. Mostafa, F. Mojtaba, et al. // Computers & Operations Research. 2016. No. 73. P. 56–66.
5. Филиппов Е.Г., Челмакин А.Н., Назметдинов Р.Л. Автоматизация расчета оптимального управления заменой, продажей и ремонтом оборудования. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019614241, 01.04.2019. Заявка № 2019613015 от 26.03.2019.
6. Баранков В.В., Королева В.В., Филиппов Е.Г. Варианты постановки задачи оперативно - календарного планирования // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2015. № 2. С. 41–49.
7. Федосеев А.С., Вожаков А.В., Гитман М.Б. Модель оптимального планирования производства на тактическом уровне с нечеткими ограничениями и критериями // Вестник МГТУ им. Носова. 2009. № 4. С. 57–64.
8. Вожаков А.В., Гитман М.Б., Федосеев С.А. Комплексное оценивание при выборе оптимального плана производства на тактическом уровне с учетом нечетких критериев и ограничений // Управление большими системами. 2012. № 30. С. 164–179.
9. Ибяттов Р. И., Зиганшин Б.Г. О моделировании случайных процессов в агропромышленном комплексе // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17. № 1(65). С. 50-55. – DOI 10.12737/2073-0462-2022-50-55.
10. Mathematical modeling of the grain trajectory in the workspace of the sheller with rotating decks / R. I. Ibyatov, A. V. Dmitriev, B. G. Ziganshin [et al.] // International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2019): International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2019), Kazan, 13–14 ноября 2019 года. Vol. 17. – Kazan: EDP Sciences, 2020. – P. 00093. – DOI 10.1051/bioconf/20201700093. – EDN KYZZLO.
11. Иванов Б.Л., Зиганшин Б.Г., Рудаков А.И., Лушнов М.А. Оценка распределения капель дезинфицирующей жидкости по обрабатываемой поверхности // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2019. Т. 14. № 3(54). С. 103-107.
12. Рудаков А.И., Нафиков И.Р., Иванов Б.Л. Повышение энергетической эффективности сублимационной сушки сельскохозяйственных материалов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2007. Т. 2. № 2(6). С. 101-105.
13. К определению параметров, влияющих на гибкий рабочий элемент ботвоизмельчителя / М. Н. Калимуллин, Р. К. Абдрахманов, Д. М. Исмагилов, И. И. Валиев // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2019. – Т. 14. – № 4-2(56). – С. 54-58. – DOI 10.12737/2073-0462-2020-54-58. – EDN SFYYEB.

14. Ибяттов, Р. И. Численный расчет фильтрования суспензии неньютоновского поведения в намывных фильтрах / Р. И. Ибяттов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2022. – Т. 17. – № S2(66). – С. 68-73. – DOI 10.12737/2073-0462-2022-68-73. – EDN OYOFEM.
15. Optimization of plow adjustment / D. T. Khaliullin, A. Belinsky, A. R. Valiev [et al.] // International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2020) : International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2020), Kazan, 28–30 мая 2020 года. – Kazan: EDP Sciences, 2020. – P. 000103. – DOI 10.1051/bioconf/20202700103.
16. Theoretical fundamentals for determining soil erosion potential (energy concept) part 1 / I. I. Maksimov, N. R. Adigamov, A. A. Mustafin [et al.] // Periodico TchecoQuimica. – 2019. – Vol. 16. – No 31. – P. 540-557.
17. Theoretical justification of design and technological parameters of hulling machine main working bodies / D. Khaliullin, I. Badretdinov, I. Naficov, R. Lukmanov // Engineering for Rural Development: 20, Virtual, Jelgava, 26–28 мая 2021 года. – Virtual, Jelgava, 2021. – P. 1501-1506. – DOI 10.22616/ERDev.2021.20.TF321.

**Сведения об авторах:**

Королева Валентина Валерьевна – кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: taisa\_67@mail.ru  
 Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия  
 Филиппов Евгений Георгиевич – кандидат физико-математических наук, доцент, e-mail: filippov.evg.georg@gmail.com  
 Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия  
 Ячменёва Валерия Владимировна – кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: markandmark2@mail.ru  
 Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия  
 Зиганшин Булат Гусманович – доктор технических наук, профессор, e-mail: zigan66@mail.ru  
 Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия.

**MATHEMATICAL MODEL OF THE PROBLEM OF EQUIPMENT REPLACEMENT  
 E.G. Filippov, V.V. Koroleva, V.V. Yachmenev, B.G. Ziganshin**

**Abstract.** The study was carried out with the aim of solving the problem of replacing equipment and creating a mathematical model of the problem of controlled optimization, as the most complete and realistic description of the production process. The Bellman principle of optimality was applied in the study, since when solving dynamic programming problems, this principle is general. For the solution, the Bellman functional equation was chosen as the initial mathematical model:

$$F_k(t_k) = \max_u \begin{cases} R(t_k) - Z(t_k) + F_{k+1}(t_{k+1}) \text{ при } u_1; \\ R(t_k = 0) - Z(t_k = 0) - C + F_{k+1}(t_{k+1} = 1) \text{ при } u_2. \end{cases}$$

The advantage of such a mathematical model is the possibility of modifying the problem. At the first step, it is proposed to sell the replaced equipment at the price  $(R(t_k) - Z(t_k))p$ ,  $0 < p < 1$ ,  $p$  is the markdown coefficient for the sale. Further, the installed equipment may not be new and purchased at a price  $((R(t_k) - Z(t_k))q)$ ,  $0 < q < 1$ . Here  $q$  is the discount factor for purchase and is set at the input. Not new equipment is cheaper than new and sale of replaced equipment also contributes to profits. New components must be added to the control vector - the age of the equipment being installed (not new). The control structure becomes more complex and realistic. The effect of the "curse of dimensionality" does not appear during numerous tests of the program. Three modifications of the problem have been developed on equipment replacement. Replaced equipment is thrown away. You can not throw it away, but sell it at a price  $(R_k(t_k) - Z_k(t_k))p$ , where  $p$  is a markdown coefficient  $0 < p < 1$ . You can increase profits if you buy not new equipment. The paper considers the option of adding another component to the control vector - "rejuvenating" repair of equipment. After such repair, the age of the equipment becomes, for example, one year less. Repairs are taken from the graph of profit earned versus repair cost, which is obtained from the results of the program runs. Combining the above modifications into a single whole is a mathematical model of the problem of replacing equipment, which is the basis of the program.

**Keywords:** mathematical model, hardware, dynamic programming, optimization, hardware replacement, Bellman's principle of optimality.

**References**

1. Mezentsev YuA, Korotkova YuL, Estraikh IV. [An efficient algorithm for solving an applied problem of scheduling optimization for a parallel-serial system]. *Informatsionnyetekhnologii*. 2021; 27. 12. 642-650 p. doi: 10.17587/it.27.642-650.
2. Xinyu L., Liang G. An effective hybrid genetic algorithm and tabu search for flexible job shop scheduling problem // *International Journal of Production Economics*. 2016. No. 174. P. 93–110.
3. Jie H., Qingguo L., Dehua X. Scheduling two parallel machines with machine-dependent availabilities // *Computers & Operations Research*. 2016. No. 72. P. 31–42.
4. A multi objective optimization approach for flexible job shop scheduling problem under random machine breakdown by evolutionary algorithms / A. Ehsan, Z. Mostafa, F. Mojtaba, et al. // *Computers & Operations Research*. 2016. No. 73. P. 56–66.
5. Filippov EG, Chelmakin AN, Nazmetdinov RL. [Automation of the calculation of the optimal management of the replacement, sale and repair of equipment]. *Svidetel'stvo o registratsii programmydlya EVM RU 2019614241*, 01.04.2019. *Zayavka № 2019613015* ot 26.03.2019.
6. Barankov VV, Koroleva VV, Filippov EG. [Options for setting the task of operational-calendar planning]. *Matematicheskoeiprogrammnoeobespecheniesistem v promyshlennoiisotsial'noisferakh*. 2015; 2. 41–49 p.
7. Fedoseev AS, Vozhakov AV, Gitman MB. [A model for optimal production planning at the tactical level with fuzzy constraints and criteria]. *Vestnik MGTU im. Nosova*. 2009; 4. 57–64 p.
8. Vozhakov AV, Gitman MB, Fedoseev SA. [Comprehensive evaluation when choosing the optimal production plan at the tactical level, taking into account fuzzy criteria and restrictions]. *Upravlenie bol'shimisistemami*. 2012; 30. 164–179 p.

9. Ibyatov RI, ZiganshinBG. [About modeling random processes in the agro-industrial complex]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022; 17. 1(65). 50-55 p. – DOI 10.12737/2073-0462-2022-50-55. – EDN SXOJGE.

10. Mathematical modeling of the grain trajectory in the workspace of the sheller with rotating decks / R. I. Ibyatov, A. V. Dmitriev, B. G. Ziganshin [et al.] // International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2019): International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2019), Kazan, November 13–14, 2019. Vol. 17. – Kazan: EDP Sciences, 2020. – P. 00093. – DOI 10.1051/bioconf/20201700093. – EDN KYZZLO.

11. Ivanov B.L., Ziganshin B.G., Rudakov A.I., Lushnov M.A. Estimation of the distribution of drops of disinfectant liquid on the treated surface // Bulletin of Kazan State Agrarian University. 2019. Vol. 14. No. 3(54). pp. 103-107.

12. Rudakov A.I., Nafikov I.R., Ivanov B.L. Improving the energy efficiency of freeze-drying of agricultural materials // Bulletin of the Kazan State Agrarian University. 2007. Vol. 2. No. 2(6). pp. 101-105.

13. To determine the parameters affecting the flexible working element of the topper / M. N. Kalimullin, R. K. Abdrakhmanov, D. M. Ismagilov, I. I. Valiev // Bulletin of the Kazan State Agrarian University. – 2019. – T. 14. – № 4-2 (56). – Pp. 54-58. – DOI 10.12737/2073-0462-2020-54-58. – EDN SFYYEB.

14. Ibyatov, R. I. Numerical calculation of filtration of suspension of non-Newtonian behavior in alluvial filters / R. I. Ibyatov // Bulletin of Kazan State Agrarian University. – 2022. – Vol. 17. – No. S2(66). – Pp. 68-73. – DOI 10.12737/2073-0462-2022-68-73. – EDN OYOFEM.

15. Optimization of plow adjustment / D. T. Khaliullin, A. Belinsky, A. R. Valiev [et al.] // International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2020) : International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2020), Kazan, May 28–30, 2020. – Kazan: EDP Sciences, 2020. – P. 000103. – DOI 10.1051/bioconf/20202700103.

16. Theoretical fundamentals for determining soil erosion potential (energy concept) part 1 / I. I. Maksimov, N. R. Adigamov, A. A. Mustafin [et al.] // PeriodicoTcheQuimica. – 2019. – Vol. 16. – No 31. – P. 540-557.

17. Theoretical justification of design and technological parameters of hulling machine main working bodies / D. Khaliullin, I. Badretdinov, I. Naficov, R. Lukmanov // Engineering for Rural Development: 20, Virtual, Jelgava, May 26–28, 2021. - Virtual, Jelgava, 2021. - P. 1501-1506. – DOI 10.22616/ERDev.2021.20.TF321. systems. - No. 30. - 2012. - S. 164-179.

**Authors:**

Koroleva Valentina Valerievna – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, e-mail: taisa\_67@mail.ru, Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia

Filippov Evgeny Georgievich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: filippov.evg.georg@gmail.com, National Research Technological University "MISiS", Moscow, Russia

Yachmeneva Valeria Vladimirovna – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, e-mail: mar-kandmark2@mail.ru, Magnitogorsk State Technical University. G.I. Nosova, Magnitogorsk, Russia

Ziganshin Bulat Gusmanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: zigan66@mail.ru, Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.