

Научная статья
УДК 542.08, 528.088
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177664>

ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ПРИЧИН, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПОГРЕШНОСТЬ СТАНЦИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ (КОМПЛЕКСОВ) ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Сергей Герасимович Гумаров¹, Алексей Юрьевич Гетманцев²✉

¹Федеральное казенное учреждение «Войсковая часть 15650»,
Ахтубинск, Астраханская область, Россия

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Москва, Россия

¹gumarovserg@rambler.ru

²tomamens@mail.ru✉

Аннотация. В статье рассмотрены особенности определения существенности влияния инструментальной погрешности автоматических и автоматизированных оптических станций технических систем (комплексов) испытательного полигона (испытательной организации) (далее – ТСКП), а также погрешности, вносимой оператором автоматизированных станций, на суммарную погрешность внешнетраекторных измерений. Подробно изложен методический аппарат применения методов факторного анализа при выявлении значимости отдельного фактора на суммарную погрешность измерений. Приведен анализ различных радиотехнических способов определения собственных координат летательных

аппаратов при проведении летных экспериментов, направленных на установление их фактических летно-технических характеристик. Показана важность технических средств (комплексов) испытательных полигонов для независимой и высокоточной оценки координат и скоростных характеристик летательных аппаратов.

Предложен подход для выявления существенности факторов, вносящих погрешности в результаты измерений различных каналов ТСКП. Показано, что в качестве эталонных значений могут быть приняты координаты звезд и других астрономических объектов, вычисленные с требуемой точностью. Совместное использование математического аппарата теории вероятности, математической статистики, дисперсионного анализа и факторного анализа позволяет сформировать критерий для отбора значимых и несущественных факторов, влияющих на точность измерений ТСКП. Это позволяет проводить оценку точности и достоверности результатов определения внешнетраекторных параметров летательных аппаратов при помощи технических средств и комплексов испытательного полигона. Предложена методология решения выявленных проблемных вопросов.

Ключевые слова: оптические средства траекторных измерений, точностные характеристики, факторный анализ, дисперсионный анализ, распределение Фишера

Для цитирования: Гумаров С.Г., Гетманцев А.Ю. Факторный анализ причин, определяющих погрешность станций технических систем (комплексов) испытательного полигона // Труды МАИ. 2023. № 133. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177664>

Original article

FACTOR ANALYSIS OF THE REASONS DETERMINING THE ERROR OF STATIONS OF TECHNICAL SYSTEMS (COMPLEXES) TESTING GROUND

Sergey G. Gumarov¹, Alexey Yu. Getmantsev²✉

¹Federal State Institution "Military Unit 15650",
Akhtubinsk, Astrakhan region, Russia

²Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI,
Moscow, Russia

¹gumarovserg@rambler.ru

²tomamens@mail.ru✉

Abstract. The article considers the features of determining the essentiality of the instrumental error effect of automatic and automated optical stations of technical systems (complexes) of the test site (testing organization) (hereinafter referred to as TSCP), as well as the error introduced by the operator of automated stations on the total error of external measurements. The methodological apparatus of applying the factor analysis methods in identifying the single factor significance for the total measurement error is recounted in detail. The article presents the analysis of various radioengineering methods for the aircraft eigen coordinates determining during flight experiments aimed at obtaining their actual flight characteristics. The importance of technical means (complexes) of test sites for independent and high-precision assessment of coordinates and speed characteristics of aircraft is demonstrated.

An approach to identifying the materiality factors that introduce errors in the measurement results of various channels of TSCP is proposed. It is demonstrated that the coordinates of stars and other astronomical objects computed with the required accuracy can be accepted as reference values. Combined application of mathematical apparatus of the probability theory, mathematical statistics, analysis of variance and factor analysis allows forming a criterion for the significant and non-essential factors selection affecting the TSCP measurements accuracy. It allows accuracy and reliability assessing of the results of the aircraft external design parameters determining by technical means and complexes of the test site. The authors proposed a methodology for solving the said problematic issues.

Keywords: optical means of trajectory measurements, precision characteristics, factor analysis, analysis of variance, Fisher distribution

For citation: Gumarov S.G., Getmantsev A.Yu. Factor analysis of the reasons determining the error of stations of technical systems (complexes) testing ground. *Trudy MAI*, 2023, no. 133. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=177664>

Качество опытных образцов авиационной техники оценивается в процессе их натуральных наземных и летных испытаний (сертификации) [1].

Только натурные испытания позволяют обеспечить:

- требуемую достоверность и независимость результатов определения фактического состояния летательных аппаратов;

- оценку их летно-технических и других эксплуатационных характеристик на соответствие требованиям тактико-технического задания, технических условий, федеральных авиационных правил и т.д.

Получение измерительной информации о параметрах опытных образцов авиационной техники в процессе летных испытаний возможно с использованием: спутниковых и инерциальных навигационных систем, радионавигационных и радиотелеметрических систем, систем бортовых измерений, а также средств внешнетраекторных измерений – оптических и радиолокационных станций [2-3].

Использование конкретных средств и систем измерений ограничивается областью их допустимого применения [1, 4-5].

Так, например, спутниковая навигационная система (СНС) не может обеспечить измерительной информацией высокоманевренный опытный самолет в требуемом темпе из-за необходимости перезахвата спутников при быстрых эволюциях (маневрах) летательного аппарата.

Инерциальная навигационная система имеет интегральную ошибку измерений, увеличивающуюся в процессе полета с течением времени.

Радиовысотмер показывает истинную высоту под летательным аппаратом только при его горизонтальном полете.

Радиотелеметрическая система и система бортовых измерений сами получают информацию от СНС, инерциальной или радиотехнической навигационной системы.

Кроме того, система бортовых измерений выдает полученные результаты на обработку исключительно в слепополетном режиме.

Радиотелеметрическая система, в свою очередь, требует:

- наличия вдоль всей трассы полета опытного летательного аппарата достаточного количества приемников радиотелеметрической информации, передающих всю получаемую информацию в единый центр обработки в реальном масштабе времени;

- установки на борту опытного образца дополнительного оборудования в виде радиотелеметрического передатчика, который имеет свои геометрические размеры и массу;

- выделения для телеметрии отдельного защищенного радиоканала, не вносящего какие-либо помехи в работу других радиосистем летательного аппарата.

Оптические и радиолокационные станции также имеют свои ограничения:

- необходимость достаточной оптической и радиолокационной заметности летательного аппарата, что не всегда возможно обеспечить в случае испытаний малоразмерных беспилотных летательных аппаратов;

- необходимость простых метеоусловий, без грозных фронтов, без низкой облачности, без пыльных бурь или тумана.

Кроме того, оптические средства измерений имеют ограниченную дальность устойчивого определения координат летательного аппарата (до 50 км), что также требует создания специальной испытательной трассы (с достаточным количеством оптикоэлектронных станций) для полетов опытных летательных аппаратов [1].

Следует отметить, что оптические и радиолокационные станции следящего типа зачастую не успевают обрабатывать большие угловые перемещения высокоскоростного объекта измерений при его нахождении на небольших расстояниях от станции.

Радиолокационные станции устойчиво определяют координаты летательных аппаратов исключительно в случае прямой радиовидимости, когда летательный аппарат находится на требуемой высоте и не закрывается изгибом поверхности Земного шара или местными радиоотражающими объектами.

Приведенные условия и ограничения показывают, что территориально разнесенные оптикоэлектронные и радиолокационные станции, объединенные в одну систему, позволяют проводить траекторные измерения в ближней и дальней зоне испытательных полетов с требуемым качеством, точностью, информативностью и непрерывностью.

Оптические и радиолокационные станции, применяемые совместно, образуют технические средства (комплексы) испытательного полигона (ТСКП).

Качество проводимых испытаний авиационной техники напрямую зависит от технического состояния ТСКП. Как правило, оценка их технического состояния проводится при проведении периодической аттестации или специализированного облета данных станций [6]. В процессе проведения данных мероприятий определяются нормированные точностные характеристики проверяемых станций. Причем, у однотипных станций (как и у любой однотипной группы измерительных

средств) вычисленные точностные характеристики могут значительно отличаться из-за воздействия различных факторов [7-10].

Основная погрешность станции Δ определяется следующими составляющими

$$\Delta = \alpha + \beta + \gamma, \quad (1)$$

где α – случайная составляющая погрешности;

β - систематическая составляющая погрешности;

γ – погрешность, вызванная влиянием действий оператора станции.

Для определения существенности составляющих основной погрешности станции необходимо провести измерения разными станциями одних и тех же эталонных значений ориентиров. Для оптических станций в качестве эталонных ориентиров принимают значения местоположения звезд из «Астрономического ежегодника», для радиолокационных станций – значения местоположения искусственных спутников Земли в определенные моменты времени [11].

По измеренным данным вычисляются средние значения погрешностей измерения $\Delta_1, \Delta_2 \dots \Delta_n$.

Принимается допущение, что средние значения погрешностей измерений являются независимыми случайными величинами. Дисперсии величин $\Delta, \alpha, \beta, \gamma$ можно обозначить через $\sigma_\Delta^2, \sigma_\alpha^2, \sigma_\beta^2, \sigma_\gamma^2$. Следовательно, имеет место следующее равенство [12]

$$\sigma_\Delta^2 = \sigma_\alpha^2 + \sigma_\beta^2 + \sigma_\gamma^2 \quad (2)$$

Определив значения рассеивания полученных средних значений, можно решить задачу выявления существенности влияния на результат измерений

влияющих факторов: ошибочных действий оператора станции или инструментальной погрешности станции. С помощью однофакторного дисперсионного анализа можно изучить влияние только одного фактора – инструментальной погрешности станции.

Для того, чтобы оценить влияние каждого фактора на точностные характеристики станций, необходимо установить количественный показатель данного влияния. Принимаем допущение, что дисперсия методической ошибки равна $\sigma_{мет}^2 = 0$, следовательно, при выборе и регистрации эталонных ориентиров в диапазоне углов азимута от 0 до 360 градусов и угла места от 10 до 80 градусов составляется таблица в виде матрицы наблюдений (табл.1). В первом столбце указываются номера типовых станций, участвующих в определении точностных характеристик, в первой строке – номера звезд, используемых в качестве эталона [8-10, 13]. Для каждой станции и регистрируемой звезды заполняется таблица с вычисленными средними значениями невязок угловых направлений на регистрируемые звезды, обозначенными как $x_{11} \dots x_{mn}$.

Рассеяние вычисленных средних значений невязок между столбцами обусловлено ошибкой воспроизводимости результатов измерений, а рассеяние средних значений невязок между строками вызвано воздействием изучаемого фактора [7-10, 14- 16].

Для определения существенности влияющего фактора необходимо определить среднюю арифметическую невязку для каждой строки таблицы 1 по формуле

$$\bar{x}_{i1} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}, \quad (3)$$

после чего вычисляется средняя арифметическая невязка всех совокупностей

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij}}{mn} \quad (4)$$

Таблица 1

Вычисленные средние значения невязок угловых направлений на регистрируемые звезды

Номер звезды \ Номер станции	1	2	...	n
1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1n}
2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2n}
...
m	x_{m1}	x_{m2}	...	x_{mn}

Отклонения отдельных результатов невязок относительно общего среднего обусловлено действием как случайно воздействующих факторов, так и влиянием изучаемого фактора [7-10].

Случайно воздействующие факторы проявляются в рассеянии наблюдений вокруг среднего арифметического невязок своей серии измерений. А вот влияние

исследуемого фактора определяется повышенным рассеянием средних арифметических невязок серии измерений относительно общего среднего арифметического невязок. Каждое из этих отклонений можно охарактеризовать соответствующей суммой квадратов отклонений.

В соответствии с порядком применения дисперсионного анализа общая сумма квадратов отклонений результатов измерений от общего среднего может быть разложена на две составляющих суммы [14-16]:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (x_{ji} - \bar{x})^2 = n \sum_{i=1}^m (\bar{x}_i - \bar{x})^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \quad (5)$$

Полученная формула может быть представлена как

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (6)$$

где Q – полная сумма квадратов отклонений отдельных измерений от общего среднего арифметического \bar{x} , характеризующая рассеяние измерений в результате действия как случайных факторов, так и изучаемого;

Q_1 – сумма квадратов разностей между средними отдельными совокупностями и общей средней всей совокупности измерений, характеризующая рассеяние средних за счет случайных причин и исследуемого фактора;

Q_2 – сумма квадратов разностей между отдельными наблюдениями и средней арифметической соответствующей совокупности, характеризует остаточное рассеяние случайных погрешностей опытов.

Слагаемое Q_1 также характеризует систематическое расхождение между совокупностями измерений, а слагаемое Q_2 - остаточное рассеяние случайных погрешностей совокупностей.

Соответствующие дисперсии данных слагаемых рассчитываются по формулам:

$$S^2 = \frac{1}{mn - 1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^2$$

$$S_1^2 = \frac{1}{m - 1} \sum_{i=1}^m (\bar{x}_i - \bar{x})^2 = \frac{Q_1}{m - 1} \quad (7)$$

$$S_2^2 = \frac{1}{m(n - 1)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$$

Далее следует провести оценку различия между дисперсиями S_1^2 и S_2^2 по F -критерию (критерию Фишера) [14-16]:

$$F = \frac{Q_1 / (m - 1)}{Q_2 / m(n - 1)} \quad (8)$$

Выбирая уровень значимости α , по таблице F -распределения (распределение Фишера) для различных уровней значимости определяют соответствующий предел так, чтобы

$$P(F > F_\alpha) = \alpha. \quad (9)$$

Если вычисленное по результатам измерений дисперсионное отношение превосходит табличное, то влияние изучаемого фактора признается существенным, и, если вычисленное дисперсионное отношение не превосходит табличное, то влияние изучаемого фактора считается несущественным.

Сравнив между собой межгрупповую и остаточную дисперсии, можно определить, насколько сильно проявляется влияние оцениваемых факторов.

Подходить к формированию окончательных выводов необходимо с осторожностью, так как каждое из допущений требует проверки, основанной на тщательном анализе проведенных экспериментов.

Выводы, полученные из результатов измерений одного эксперимента, относятся только к данному экспериментальному материалу, так как при изменении диапазона варьирования изучаемого фактора или других факторов эксперимента, оценка влияния исследуемого фактора может измениться.

В целом, результаты факторного анализа позволяют значительно минимизировать объем экспериментов при планировании последующих мероприятий [17-25] по контролю исправности при аттестации ТСКП, что сокращает временные и ресурсные затраты на поддержание измерительного комплекса испытательного полигона в исправном состоянии.

Список источников

1. Чернуха В.Н. Новокшенов Ю.В., Пляскота С.И. Основы испытаний авиационной техники. Ч. 2. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е.Жуковского, 1994. – 334 с.
2. Додонов А.Г., Путятин В.Г. Радиотехнические средства внешнетраекторных измерений // Математические машины и системы. 2018. № 1. С. 3-30.
3. Полищук С.В., Захаров А.Н. Предложения по созданию системы технических средств объективного контроля морского полигона для испытания морских

робототехнических комплексов // V военно-научная конференция «Роботизация Вооружённых Сил Российской Федерации» (Анапа, 29–30 июля 2020): сборник трудов. – Анапа: Военный инновационный технополис «Эра», 2020. С. 285-294.

4. Ашурков И.С., Лешко Н.А., Цыбульник А.Н. Концептуальная модель разнесенной системы радиолокационного наблюдения сложных маневрирующих баллистических целей // Труды МАИ. 2017. № 97. URL:

<https://trudymai.ru/published.php?ID=87350>

5. Журавлёв Р.А. Состояние и перспективы развития полигонно-измерительного комплекса ГЦМП МО РФ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2012. № 3 (262). С. 18.

6. ГОСТ РВ 0008-002-2013 ГСИ. Аттестация испытательного оборудования, применяемого при оценке соответствия оборонной продукции. Организация и порядок проведения. – М.: Стандартинформ, 2014. - 28 с.

7. Дмитриев А.К., Марков В.М., Городецкий В.И. Элементы теории испытаний контроля технических систем. - Л.: Энергия, 1978. - 192 с.

8. Иберла К. Факторный анализ. - М.: Статистика, 1980. – 398 с.

9. Морозов А.Е. Факторный анализ в моделировании повседневной деятельности ВУЗа // Труды МАИ. 2007. № 26. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=34026>

10. Бродский В.З. Введение в факторное планирование эксперимента. - М.: Наука, 1976. - 223 с.

11. Астрономический ежегодник на 2023 год. - СПб.: Институт прикладной астрономии РАН, 2022. Т. 102. - 683 с.
12. Методический материал по применению ГОСТ 8.009-84 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений». – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 90 с.
13. Бородюк В.П., Воцинин А.П., Иванов А.З. и др. Статистические методы в инженерных исследованиях. – М.: Высшая школа, 1983. – 216 с.
14. Иванова В.М., Калинина В.Н., Нешумова Л.А., Решетникова И.О. Математическая статистика. - М.: Высшая школа, 1975. - 400 с.
15. Ллойд Э., Ледерман У. Справочник по прикладной статистике. Том 2. / Пер. с англ. - М.: Финансы и статистика, 1989. - 526 с.
16. Браверман Э.М., Мучник И.Б. Структурные методы обработки эмпирических данных. - М.: Наука, 1983. - 464 с.
17. Знаменский К.Н. Проблемы технического диагностирования и мониторинга // Автоматика. Связь. Информатика. 2018. № 6. С. 18-20.
18. Завялик И.И., Фетисов Е.В., Трофимчук М.В. Применение методов теории планирования эксперимента для оценки безотказности агрегатов топливной системы авиационного двигателя воздушного судна // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=93371>
19. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования эксперимента. - М.: Машиностроение, 1980. - 304 с.

20. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. - М.: Metallurgiya, 1969. - 287 с.
21. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1976. - 282 с.
22. Налимов В.В., Голикова Т.И. Логические основания планирования эксперимента. - М.: Metallurgiya, 1981. - 151 с.
23. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. - М.: Мир, 1997. - 278 с.
24. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента. - М.: Мир, 1981. - 520 с.
25. Клепиков Н.П., Соколов С.Н. Анализ и планирование экспериментов методом максимума подобия. - М.: Наука, 1964. - 164 с.

References

1. Chernukha V.N., Novokshonov Yu.V., Plyaskota S.I. *Osnovy ispytaniy aviatsionnoi tekhniki* (Fundamentals of testing of aviation equipment) Part. 2. Moscow, VVIA im. prof. N.E.Zhukovskogo, 1994, 334 p.
2. Dodonov A.G., Putyatin V.G. *Matematicheskie mashiny i sistemy*, 2018, no. 1, pp. 3-30.
3. Polishchuk S.V., Zakharov A.N. *V voenno-nauchnaya konferentsiya «Robotizatsiya Vooruzhennykh Sil Rossiiskoi Federatsii»*: sbornik trudov. Anapa, Voennyi innovatsionnyi tekhnopolis «Era», 2020, pp. 285-294.

4. Ashurkov I.S., Leshko N.A., Tsybul'nik A.N. *Trudy MAI*, 2017, no. 97. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=87350>
5. Zhuravlev R.A. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika*, 2012, no. 3 (262), pp. 18.
6. *GOST RV 0008-002-2013 GSI. Attestatsiya ispytatel'nogo oborudovaniya, primenyaemogo pri otsenke sootvetstviya oboronnoi produktsii. Organizatsiya i poryadok provedeniya* (GOST RV 0008-002-2013 GSI. Certification of test equipment used in the assessment of conformity of defense products. Organization and procedure of the event), Moscow, Standartinform, 2014, 28 p.
7. Dmitriev A.K., Markov V.M., Gorodetskii V.I. *Elementy teorii ispytaniy kontrolya tekhnicheskikh sistem* (Elements of the theory of testing control of technical systems), Leningrad, Energia, 1978, 192 p.
8. Iberla K. *Faktornyi analiz* (Factor analysis), Moscow, Statistika, 1980, 398 p.
9. Morozov A.E. *Trudy MAI*, 2007, no. 26. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=34026>
10. Brodskii V.Z. *Vvedenie v faktornoe planirovanie eksperimenta* (Introduction to factor planning of experiment), Moscow, Nauka, 1976, 223 p.
11. *Astronomicheskii ezhegodnik na 2023 god* (Astronomical Yearbook for 2023 g), Saint Petersburg, Institut prikladnoi astronomii RAN, 2022, vol. 102, 683 p.
12. *Metodicheskii material po primeneniyu GOST 8.009-84 «GSI. Normiruemye metrologicheskie kharakteristiki sredstv izmerenii»* (Methodological material on the

application of GOST 8.009-84 "GSI. Normalized metrological characteristics of measuring instruments"), Moscow, Izd-vo standartov, 1985, 90 p.

13. Borodyuk V.P., Voshchinin A.P., Ivanov A.Z. et al. *Statisticheskie metody v inzhenernykh issledovaniyakh* (Statistical methods in engineering research), Moscow, Vysshaya shkola, 1983, 216 p.

14. Ivanova V.M., Kalinina V.N., Neshumova L.A., Reshetnikova I.O. *Matematicheskaya statistika* (Mathematical statistics), Moscow, Vysshaya shkola, 1975, 400 p.

15. Lloid E., Lederman U. *Spravochnik po prikladnoi statistike* (Handbook of Applied Statistics). Vol. 2. Moscow, Finansy i statistika, 1989, 526 p.

16. Braverman E.M., Muchnik I.B. *Strukturnye metody obrabotki empiricheskikh dannykh* (Structural methods of empirical data processing), Moscow, Nauka, 1983, 464 p.

17. Znamenskii K.N. *Avtomatika. Svyaz'. Informatika*, 2018, no. 6, pp. 18-20.

18. Zavyalik I.I., Fetisov E.V., Trofimchuk M.V. *Trudy MAI*, 2018, no. 100. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93371>

19. Novik F.S., Arsov Ya.B. *Optimizatsiya protsessov tekhnologii metallov metodami planirovaniya eksperimenta* (Optimization of metal technology processes by experimental planning methods), Moscow, Mashinostroenie, 1980, 304 p.

20. Adler Yu.P. *Vvedenie v planirovanie eksperimenta* (Introduction to experiment planning), Moscow, Metallurgiya, 1969, 287 p.

21. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii* (Experiment planning in the search for optimal conditions), Moscow, Nauka, 1976, 282 p.

22. Nalimov V.V., Golikova T.I. *Logicheskie osnovaniya planirovaniya eksperimenta* (Logical bases of experiment planning), Moscow, Metallurgiya, 1981, 151 p.
23. Khartman K. *Planirovanie eksperimenta v issledovanii tekhnologicheskikh protsessov* (Planning an experiment in the study of technological processes), Moscow, Mir, 1997, 278 p.
24. Dzhonson N., Lion F. *Statistika i planirovanie eksperimenta v tekhnike i nauke: Metody planirovaniya eksperimenta* (Statistics and experiment planning in engineering and science: Methods of experiment planning), Mir, 1981, 520 p.
25. Klepikov N.P., Sokolov S.N. *Analiz i planirovanie eksperimentov metodom maksimuma podobiya* (Analysis and planning of experiments by the method of maximum similarity), Moscow, Nauka, 1964, 164 p.

Статья поступила в редакцию 07.09.2023

Одобрена после рецензирования 11.09.2023

Принята к публикации 25.12.2023

The article was submitted on 07.09.2023; approved after reviewing on 11.09.2023; accepted for publication on 25.12.2023