

УДК 629.735
DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-2-29-36

Об автоматизации процедур оценки параметров работы турбореактивных двухконтурных двигателей

Б.А. Чичков¹

¹*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

Аннотация: В практике эксплуатации воздушных судов применяется оценка параметров работы с различным использованием номограмм. Указанный подход широко распространен и в эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей в составе силовых установок воздушных судов. При этом, например, требуется оценка параметров работы двигателей на земле в зависимости от условий окружающей среды перед проведением запуска и апробации. Сокращение трудоемкости технического обслуживания силовых установок воздушных судов может быть достигнуто автоматизацией указанных процедур, целью которой является формирование всего необходимого перечня значений оцениваемых параметров при задании располагаемых условий окружающей среды с учетом требуемых ограничений. Для сохранения наглядности и «привычных» представлений выполняемых оценок желательно не ограничиться только документированием количественных оценок параметров, но и сопровождать их графическими представлениями. Статья не ставит целью описание полного алгоритма оценки параметров работы двигателей, но показывает возможность решения задачи автоматизации процедур оценки параметров работы двигателей на земле как задачи поиска решения в условиях ограничений, описываемых с использованием аппарата аппроксимаций и кусочных аппроксимаций по методу наименьших квадратов и корреляционного критерия значимости. Приведены примеры количественных оценок для одного из массовых отечественных двигателей, и описываемый подход применим к широкому перечню двигателей благодаря общности алгоритмов оценки параметров с использованием номограмм. Программное обеспечение, основанное на процессоре табличного вычисления из состава пакета LibreOffice, бесплатного ПО, лицензируемого по лицензии Apache, является кроссплатформенным.

Ключевые слова: авиационный двигатель, турбореактивный двухконтурный двигатель (ТРДД), запуск и опробование ТРДД, условия окружающей среды, контролируемые параметры, автоматизация, аппроксимация.

Для цитирования: Чичков Б.А. Об автоматизации процедур оценки параметров работы турбореактивных двухконтурных двигателей // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 2. С. 29–36. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-2-29-36

About the automation of procedures to assess the operation parameters of by-pass turbojet engines (BTJE)

B.A. Chichkov¹

¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

Abstract: During aircraft operation, the assessment of operation parameters with the different use of nomograms is completed. This approach is prevalent in the operation of aviation gas-turbine engines as part of aircraft power plants. In this case, for example, the assessment of engine operation parameters on the ground, depending on environmental conditions prior to start-up and run-up, is required. Reducing working hours of the aircraft power plants maintenance can be provided by the automation of the denoted procedures which purpose is the formation of the applicable list of values for assessed parameters while assigning available environmental conditions considering the required restrictions. To allow for the visualization and familiar conceptions of carried out assessments, it is advisable not to be limited to only documenting quantitative parameter estimations but also to provide them with graphical representations. The purpose of the article is not aimed at describing a complete algorithm of the engine operation parameters assessment but demonstrating a solution capability for the automation of the procedures for the engine operation parameters assessment on the ground as the task of search for a solution in the restricted conditions using the approximation

apparatus and piecewise approximations by the method of the smallest squares and the correlation criterion of significance. The examples of quantitative estimations for one of mass domestic engines are given. The described approach is applicable to a broad list of engines due to the common character of algorithms for the parameter assessment using nomograms. Software based on the tabular calculation processor from the LibreOffice package, Apache-licensed free software, is cross-platform.

Key words: aviation engine, by-pass turbojet engine (BTJE), BTJE start-up and run-up, environmental conditions, monitored parameters, automation, approximation.

For citation: Chichkov, B.A. (2023). About the automation of procedures to assess the operation parameters of by-pass turbojet engines (BTJE). Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 2, pp. 29–36. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-2-29-36

Введение

В эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) в составе силовых установок воздушных судов решаются задачи по оценке параметров их работы в зависимости от условий окружающей среды.

К типичным работам, требующим таких оценок, относятся работы по запуску и опробованию двигателей¹ [1–3]. При этом перед их проведением необходимо оценить как ожидаемые для располагаемых атмосферных (внешних) условий параметры системы запуска (давление воздуха на входе в воздушный стартер) и термогазодинамические параметры (частота вращения роторов низкого и высокого давления, максимально допустимая температура газов за турбиной, обороты ротора высокого давления, при которых происходит открытие и закрытие клапанов перепуска воздуха, начало страгивания лопаток регулируемого входного направляющего аппарата из пускового положения в рабочее, время приемистости, параметр тяги и т. п. в зависимости от типа двигателя).

Для рассматриваемых оценок используются графические представления в виде номограмм, позволяющих оценить указанные выше параметры в зависимости от температуры и давления окружающей среды, или таблицы.

Представляется целесообразной автоматизация рассматриваемых процедур, целью которой является формирование всего необходимого перечня значений оцениваемых параметров при задании располагаемых условий

окружающей среды с учетом требуемых ограничений.

Аналитическое описание расчетной части процедур

Для решения поставленной задачи в части описания зон изменения параметров используется аппроксимация линий, описывающих границы полей искомых значений и линий, описывающих ограничения, например системы автоматического управления. Дальнейшее математическое описание строится на получении значения шага между границами и добавления произведения шага на значение параметра окружающей среды. В случаях необходимости получения только значений ограничений параметров используются или аппроксимации линии ограничения, или кусочные аппроксимации при невозможности описать линии ограничений одной зависимостью.

Используются аппроксимации по методу наименьших квадратов [4–13].

Для контроля получаемых значений и сохранения наглядности на диаграммы целесообразно выводить маркеры.

Покажем пример фрагментов алгоритма получения указанных аналитических описаний на примере ряда зависимостей – рис. 1–8. Уравнения получаемых зависимостей и результаты оценки по корреляционному критерию значимости R^2 [4–7] приведены на графиках и в текст не выносятся. (Результаты оценок по критерию значимости во всех примерах – зависимости, описывающие границы, – значимы.)

¹ Руководство по технической эксплуатации двигателя Д-30КП. Изд-во разработчика, 1989. 982 с.

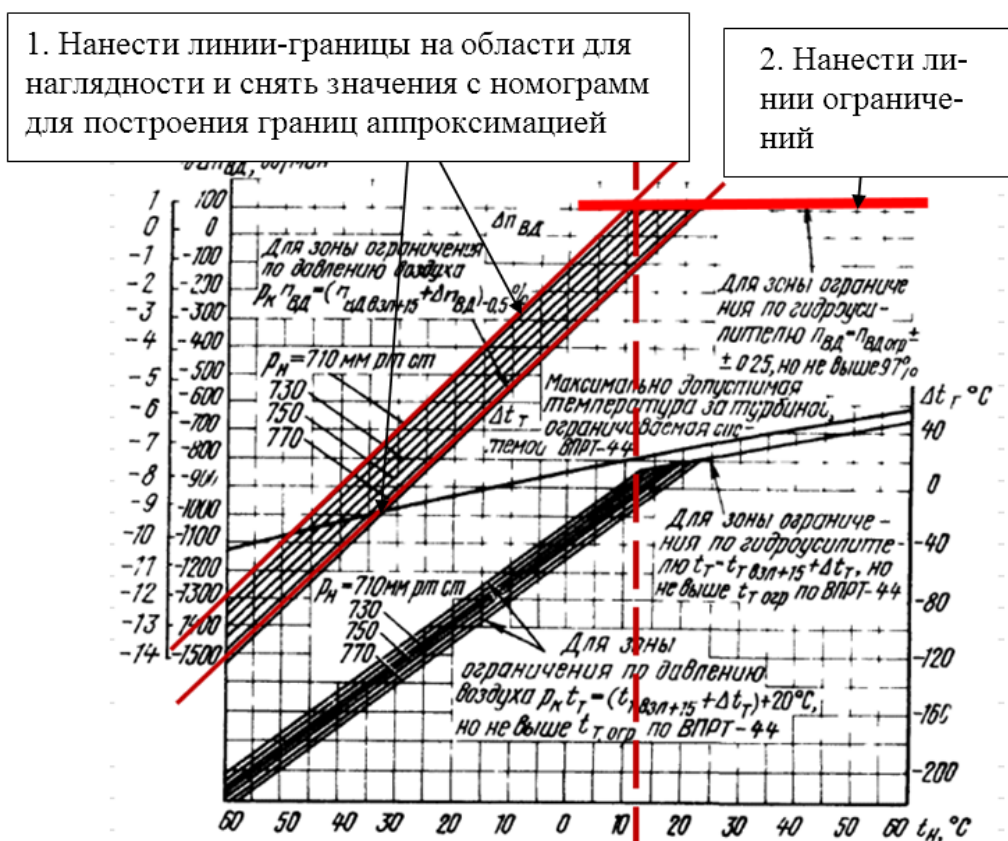


Рис. 1. К получению зависимости изменения максимально допустимой температуры газов за турбиной (t_r) и частоты вращения ротора высокого давления (ВД) (пвд) от атмосферных условий (t_H , P_H) при работе на земле на взлетном режиме [1]

Fig. 1. To obtaining the dependence of the gas temperature capability change behind the turbine (t_r) and high pressure (HP) rotor (пвд) rotation frequency on atmospheric conditions (t_H , P_H) during the ground operation at a take-off mode [1]



Рис. 2. Получение аналитического описания зависимости изменения частоты вращения ротора ВД от атмосферных условий (давления P_H и температуры T_H) при работе двигателя на земле на взлетном режиме

Fig. 2. Obtaining the analytical description of the dependence of HP rotor rotation frequency change on atmospheric conditions (pressure P_H and temperature T_H) during the ground engine operation at a take-off mode

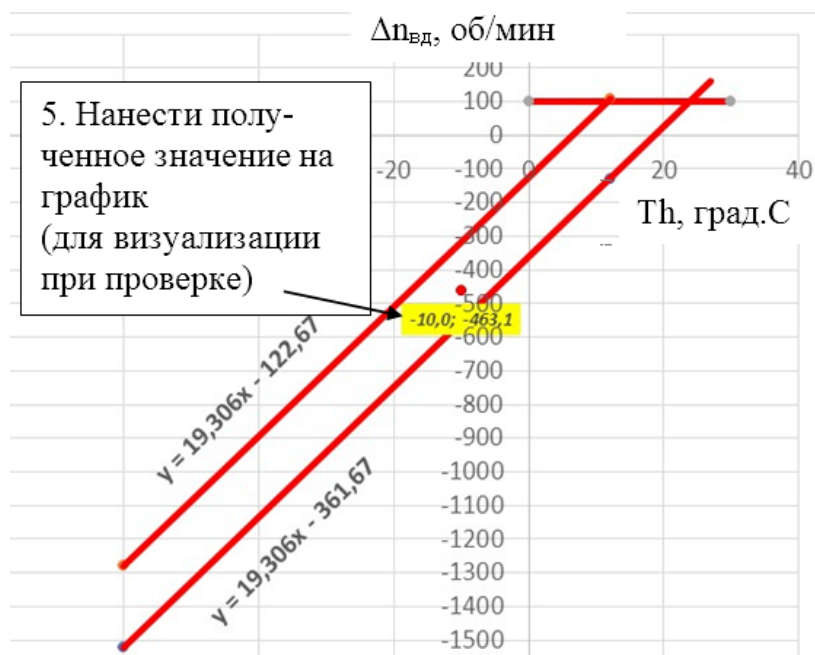


Рис. 3. Пример аналитического описания зависимости изменения частоты вращения ротора ВД от атмосферных условий при работе на земле на взлетном режиме

Fig. 3. Example of the analytical dependence description of HP rotor rotation frequency change on atmospheric conditions during the ground operation at a take-off mode

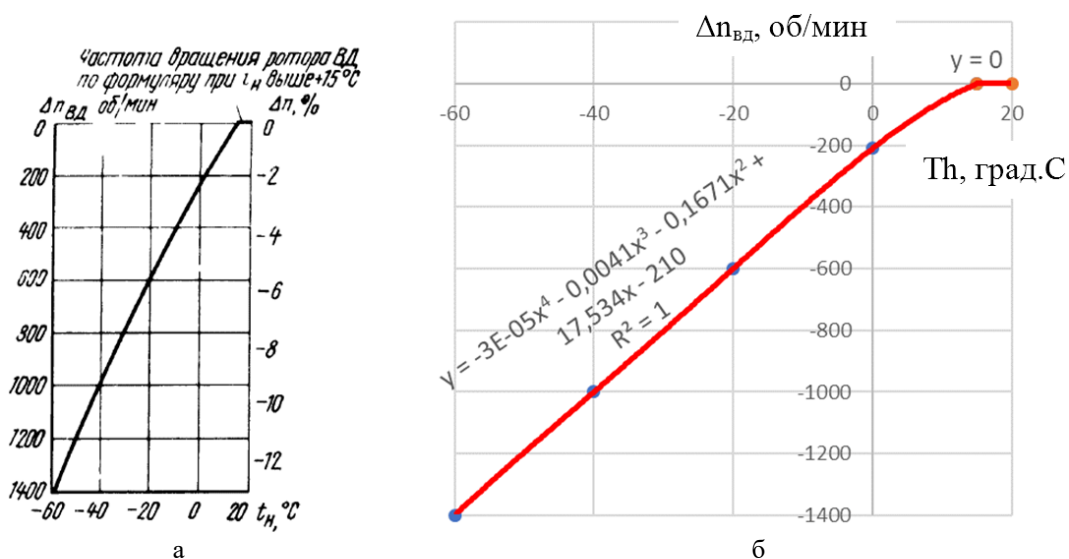


Рис. 4. Оценка поправки (а) на частоту вращения ротора ВД при работе двигателя на земле на номинальном режиме и крейсерских режимах при температуре наружного воздуха ниже +15 °C [1] и ее аналитическое описание (б)

Fig. 4. Assessment of the correction (a) for the frequency of HP rotor rotation during the ground engine operation at nominal and cruise modes at an open-air temperature of lower +15 °C [1] and its analytical description (б)

Дополнительно к номинальным расчетным значениям определяются допустимые граничные значения, например для оценок частоты вращения ротора ВД в процентах по

указателю ИТЭ в кабине при работе двигателя на земле на режиме малого газа в зависимости от атмосферных условий и граничные аппроксимации кривых (рис. 5).

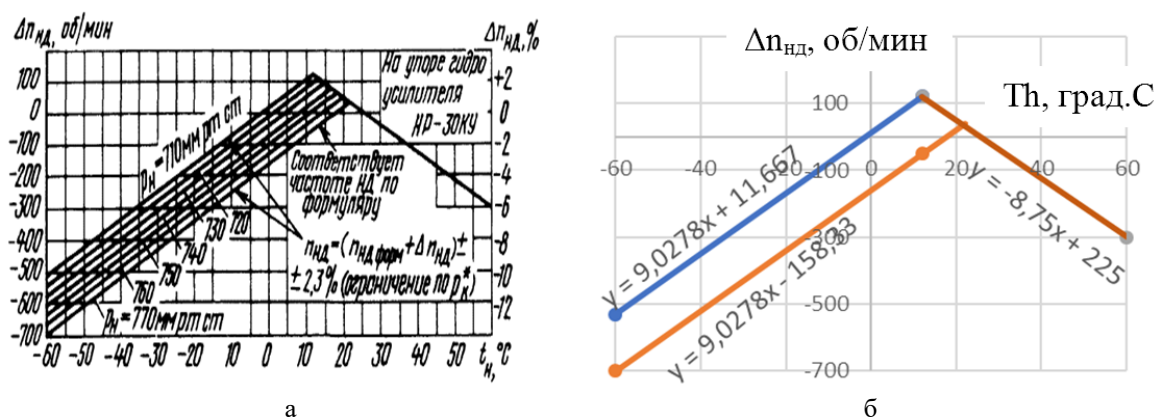


Рис. 5. Зависимость (а) изменения приращения частоты вращения ротора НД ($n_{нд}$) на взлетном режиме от атмосферных условий при работе на земле [1] и линейные аппроксимации границ (б)
Fig. 5. Dependence (a) of the increment change of LP rotor rotation frequency ($n_{нд}$) at a take-off mode on atmospheric conditions during the ground operation [1] and linear approximations of boundaries (б)

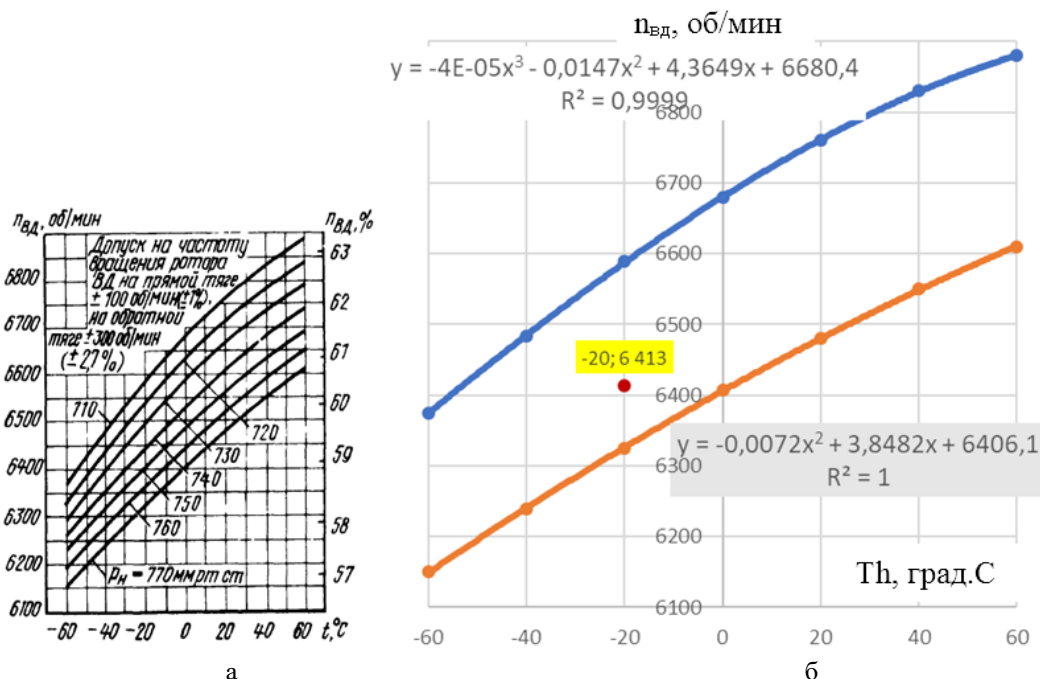


Рис. 6. Зависимость (а) изменения частоты вращения ротора ВД при работе двигателя на земле на режиме малого газа от атмосферных условий [1] и граничные аппроксимации кривых (б)
Fig. 6. Dependence (a) of the HP rotor rotation frequency change during the ground engine operation at idle on atmospheric conditions [1] and boundary approximations of curves (б)

При практическом использовании выражения для расчета аппроксимирующих кривых не столь важны, как нанесение на диаграмму фактического значения оцениваемого параметра и допустимого диапазона его изменения (рис. 7) и могут не представляться пользователю.

Алгоритмы и аналитические зависимости для оценки параметров работы ТРДД типа

Д30КП на земле в зависимости от условий окружающей среды реализуемы средствами электронных таблиц, например пакета Libre-Office, бесплатного ПО, лицензируемого по лицензии Apache².

² Лицензия Apache [Электронный ресурс] // Wikipedia. https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Лицензия_Apache&oldid=109714083 (дата обращения: 12.06.2021).

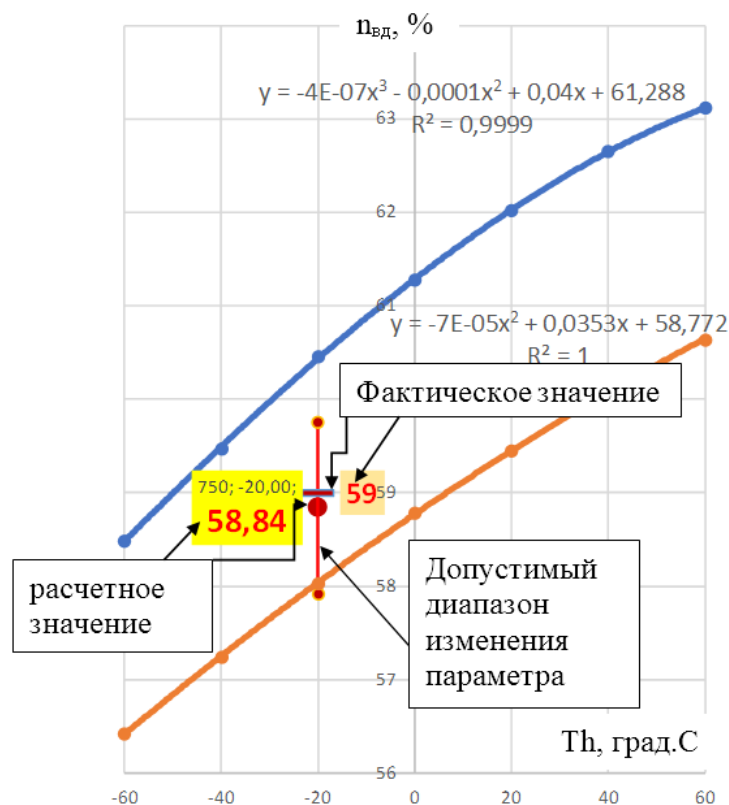


Рис. 7. Зависимость изменения частоты вращения ротора ВД в процентах по указателю ИТЭ в кабине при работе двигателя на земле на режиме малого газа от атмосферных условий, номинальное расчетное значение, граничные значения изменения параметра для заданных внешних условий и фактическое значение параметра, граничные аппроксимации кривых

Fig. 7. Dependence of the HP rotor rotation frequency change in percent according to TI data in a cockpit during the ground engine operation at idle on atmospheric conditions, the nominal calculated value, the boundary values of the parameter change for the assigned ambient conditions and the actual parameter value, boundary approximations of curves

Помимо описанного графического представления обеспечивается и вывод количественных оценок параметров (рис. 8).

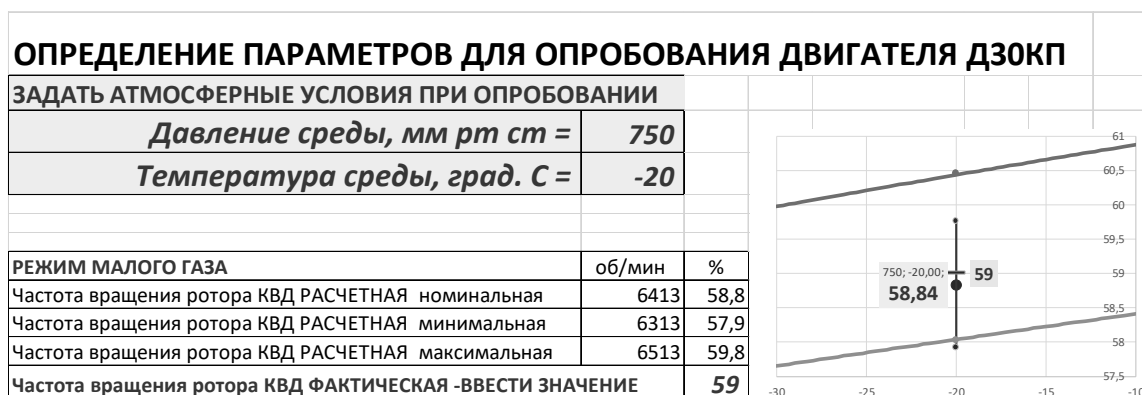


Рис. 8. Фрагмент задания исходных данных и оценок частоты вращения ротора КВД в зависимости от условий эксплуатации

Fig. 8. Fragment of the basic data assignment and assessments of HPC rotor rotation frequency depending on operation conditions

Заключение

Изложен порядок автоматизации оценок характеристик ТРДД при проведении запуска и опробовании двигателя в зависимости от условий эксплуатации.

Получены примеры аналитических описаний зависимостей параметров двигателей, оцениваемых при проверке работы типа ТРДД на земле.

Программное обеспечение реализуемо средствами табличного процессора, например, Calc из состава пакета LibreOffice, бесплатного ПО, лицензируемого по лицензии Apache. Использование электронных таблиц позволяет выполнять рассматриваемые оценки на устройствах с различными операционными системами – Windows, Linux, Android.

Список литературы

1. Лозицкий Л.П., Авдошко М.Д. и др. Авиационные двухконтурные двигатели Д-30КУ и Д-30КП. М.: Машиностроение, 1988. 228 с.
2. Иноземцев А.А. Авиационный двигатель ПС-90А / А.А. Иноземцев, Е.А. Коняев, В.В. Медведев, А.В. Нерадько, А.Е. Ряссов. М.: Физматлит, 2007. 320 с.
3. Литвинов Ю.А., Боровик В.О. Характеристики и эксплуатационные свойства авиационных турбореактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1979. 288 с.
4. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами / Пер. с англ. В.Д. Скаржинского, под ред. В.Г. Горского. М.: Мир, 1973. 957 с.
5. Ефимова М.Р., Рябцев В.М. Общая теория статистики: учебник. М.: Финансы и статистика, 2009. 288 с.
6. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 13-е изд., испр. М.: Наука, 1986. 544 с.
7. Вапник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным: монография. М.: Наука, 1979. 448 с.

8. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные уравнения. М.: Наука, 1962. 368 с.

9. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. В 2 кн. Кн.1. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.

10. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. В 2 кн. Кн. 2. М.: Финансы и статистика, 1987. 351 с.

11. Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным: монография. М.: Радио и связь, 1987. 120 с.

12. Теория прогнозирования и принятия решений / Под ред. С.А. Саркисяна. М.: Высшая школа, 1977. 351 с.

13. Котюков В.И. Многофакторные кусочно-линейные модели. М.: Финансы и статистика, 1984. 216 с.

References

1. Lozitsky, L.P., Avdoshko, M.D. et al. (1988). Aircraft D-30KU and D-30KP bypass engines. Moscow: Mashinostroyeniye, 228 p. (in Russian)
2. Inozemtsev, A.A., Konyaev, E.A., Medvedev, V.V., Neradko, A.V., Ryasov, A.E. (2007). PS-90A aircraft engine. Moscow: Fizmatlit, 320 p. (in Russian)
3. Litvinov, Yu.A., Borovik, V.O. (1979). Characteristics and operational properties of aircraft turbojet engines. Moscow: Mashinostroyeniye, 288 p. (in Russian)
4. Himmelblay, D.M. (1970). Process analysis by statistical methods. Publisher: John Wiley & Sons Inc, 463 p.
5. Efimova, M.R., Ryabtsev, V.M. (2009). General theory of statistics. Moscow: Finansy i statistika, 288 p. (in Russian)
6. Bronstein, I.N., Semendyaev, K.A. (1986). Handbook of mathematics for engineers and students of higher educational institutions. 13th ed., ispr. Moscow: Nauka, 544 p. (in Russian)
7. Vapnik, V.N. (1979). Restoration of dependences according to empirical data: monograph. Moscow: Nauka, 448 p. (in Russian)

8. Demidovich, B.P., Maron, I.A., Shuvalova, E.Z. (1962). Numerical methods of the analysis. Approximation of functions, differential equations. Moscow: Nauka, 368 p. (in Russian)

9. Draper, N., Smith, H. (1981). Applied regression analysis. 2nd ed. New York: Wiley, 709 p.

10. Draper, N., Smith, H. (1981). Applied regression analysis. 2nd ed. New York: Wiley, 709 p.

11. Ivakhnenko, A.G., Yurachkovsky, Yu.P. (1987). Modeling complex systems based on experimental data: monograph. Moscow: Radio i svyaz, 120 p. (in Russian)

12. Sarkisyan, S.A. (Ed.). (1977). Theory of forecasting and decision-making. Moscow: Vysshaya shkola, 351 p. (in Russian)

13. Kotyukov, V.I. (1984). Multiple-factor piecewise and linear models. Moscow: Finansy i statistika, 216 p. (in Russian)

Сведения об авторе

Чичков Борис Анатольевич, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры двигателей летательных аппаратов МГТУ ГА, b.chichkov@mstuca.aero.

Information about the author

Boris A. Chichkov, Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Aircraft Engines Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, b.chichkov@mstuca.aero.

Поступила в редакцию 24.09.2022
Принята в печать 23.03.2023

Received 24.09.2022
Accepted for publication 23.03.2023