

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 519: 62+004.451.25+12.09

doi: 10.30987/2658-4026-2026-1-58-65

Управление эксплуатационной надёжностью в газотранспортных системах с использованием прогнозирования интенсивности отказов газодинамического оборудования на основании статистической регрессионной модели

Михаил Геннадьевич Шалыгин^{1✉}, Николай Михайлович Борбаць², Александр Владимирович Симонов³

^{1,2,3} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹migshalygin@yandex.ru

²borbact@mail.ru

³007september@mail.ru

Аннотация.

Рассмотрены статистические данные отказов газодинамического оборудования на примере парка стационарных газотурбинных установок (далее – ГТУ) за 10-летний период эксплуатации с точки зрения применения регрессионной модели для прогнозирования отказов газодинамического оборудования. Проведен анализ данных о числе отказов различных типов (неисправности системы электроснабжения и электрооборудования - $r1$, неисправности систем автоматики и безопасности - $r2$, неисправности механического оборудования без разрушений узлов и деталей - $r3$, неисправности механического оборудования с разрушением узлов и деталей - $r6$) в зависимости от наработки после ремонта. Подобранный обобщенная линейная модель с распределением Пуассона позволяет оценить среднее число отказов и демонстрирует значимый вклад как наработки, так и признака отказа. Результаты сопоставляются с концепцией кривой Вейбулла (ваннообразной кривой) для подтверждения выявленных закономерностей. Установлено, что наиболее значимый признак отказа $r2$ и он же более других признаков коррелируется со стадией периода приработки кривой Вейбулла-Гнеденко.

Ключевые слова: предсказание отказов, газодинамическое оборудование, статистическая регрессия, модель Пуассона, кривая Вейбулла, надёжность, наработка после ремонта

Для цитирования: Шалыгин М.Г., Борбаць Н.М., Симонов А.В. Управление эксплуатационной надёжностью в газотранспортных системах с использованием прогнозирования интенсивности отказов газодинамического оборудования на основании статистической регрессионной модели// Эргодизайн. 2026. №1 (31). С. 58-65. <http://dx.doi.org/10.30987/2658-4026-2026-1-58-65>.

Original article

Open access article

Operational Reliability Management in Gas Transportation Systems Using Failure Intensity Prediction of Gas-Dynamic Equipment Based on a Statistical Regression Model

Mikhail G. Shalygin^{1✉}, Nikolai M. Borbatz², Alexander V. Simonov³

^{1,2,3} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹migshalygin@yandex.ru

²borbact@mail.ru

³007september@mail.ru

Abstract.

The paper examines statistical data on failures of gas-dynamic equipment, exemplified by a fleet of stationary gas turbine units (GTUs) over a 10-year operational period from the perspective of applying a regression model for predicting

gas-dynamic equipment failures. The authors conduct an analysis of data on the number of failures of various types (electrical supply and equipment malfunctions – r1, automation and safety system malfunctions – r2, mechanical equipment malfunctions without node and component destruction – r3, mechanical equipment malfunctions with node and component destruction – r6) depending on operating time after repair. The selected generalized linear model with a Poisson distribution allows estimating the average number of failures and demonstrates a significant contribution of both operating time and the failure indicator. The results are compared with the Weibull curve (bathtub curve) concept to confirm the identified patterns. The work establishes that the most significant failure indicator is r2, which also correlates more with other indicators with the wear-in period stage of the Weibull-Gnedenko curve.

Keywords: failure prediction, gas-dynamic equipment, statistical regression, Poisson model, Weibull curve, reliability, operating time after repair

For citation: Shalygin M.G., Borbatz N.M., Simonov A.V. Operational Reliability Management in Gas Transportation Systems Using Failure Intensity Prediction of Gas-Dynamic Equipment Based on a Statistical Regression Model. Ergodizayn [Ergodesign]. 2026;1(31):58-65. Doi: 10.30987/2658-4026-2026-1-58-65.

Введение

Надежность и безотказность работы газодинамического оборудования являются критически важными аспектами в различных отраслях промышленности, включая энергетику, нефтегазовую и химическую промышленность. В рамках продолжения работы по нормативно-методическому сопровождению перехода на ремонт газодинамического оборудования по техническому состоянию [1] разработка и применение эффективных методов прогнозирования отказов приобретает особую актуальность. Статистические методы, в частности регрессионный анализ [2], [3], [4], [5], предоставляют мощный инструмент для моделирования зависимости числа отказов от различных эксплуатационных факторов, таких как наработка оборудования после ремонта.

В настоящей статье рассматриваются статистические данные отказов газодинамического оборудования на примере парка стационарных газотурбинных установок (далее – ГТУ) за 10-летний период эксплуатации с точки зрения применения регрессионной модели для прогнозирования отказов газодинамического оборудования. Анализируются данные о числе отказов различных типов (неисправности системы электроснабжения и электрооборудования - r1, неисправности систем автоматики и безопасности - r2, неисправности механического оборудования без разрушений узлов и деталей - r3, неисправности станционных систем газа - r4, нарушение правил технической эксплуатации оборудования и систем r5, неисправности механического оборудования с разрушением узлов и деталей - r6) в зависимости от наработки после ремонта. При этом данные по отказам типов r4 и r5 не учитываются при дальнейшем анализе, так как не имеют непосредственного отношения к неисправностям систем, входящих в состав рассматриваемого оборудования, а носят

«внешний» или субъективный характер и могут быть рассмотрены отдельно или в составе технологического комплекса.

Цель работы построение и анализ статистической регрессионной модели для прогнозирования роста числа отказов газодинамического оборудования, а также установление связи полученных результатов с теоретическими концепциями надежности, в частности с кривой Вейбулла-Гнedenко (ваннообразной кривой) [6], [7], [8], [9], [10].

Результаты и обсуждение

На основании собранных данных об отказах ГТУ была построена диаграмма рассеивания для зависимости числа отказов от наработки после ремонта с учётом различных признаков отказа (рис.1). Построенная диаграмма рассеивания демонстрирует наличие явной зависимости между числом отказов и наработкой после ремонта, причём характер этой зависимости различен для различных признаков отказа. Поэтому имеет смысл подобрать регрессионную модель для описания этой зависимости.

Поскольку переменная отклика «Число отказов» является счётной, то подбирается обобщённая линейная модель с использованием распределения Пуассона [2],[3],[4],[5]. Общий вид подбираемой модели:

$$\hat{y}_i = \exp(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{i1} + \hat{\beta}_2 z_{i2} + \hat{\beta}_3 z_{i3} + \hat{\beta}_4 z_{i4}),$$

где x_{i1} – переменная, соответствующая среднему времени наработки после ремонта (в часах); z_{i2} , z_{i3} и z_{i4} – индикаторные переменные, соответствующие признаку отказа:

$$z_{i2} = \begin{cases} 1, & \text{если признак отказа } r2; \\ 0, & \text{если признак отказа не } r2, \end{cases}$$
$$z_{i3} = \begin{cases} 1, & \text{если признак отказа } r3; \\ 0, & \text{если признак отказа не } r3, \end{cases}$$
$$z_{i4} = \begin{cases} 1, & \text{если признак отказа } r6; \\ 0, & \text{если признак отказа не } r6. \end{cases}$$

При этом признаку отказа r_1 соответствуют нулевые значения всех индикаторных переменных. В результате

подбора получены следующие оценки параметров модели (таблица 1).

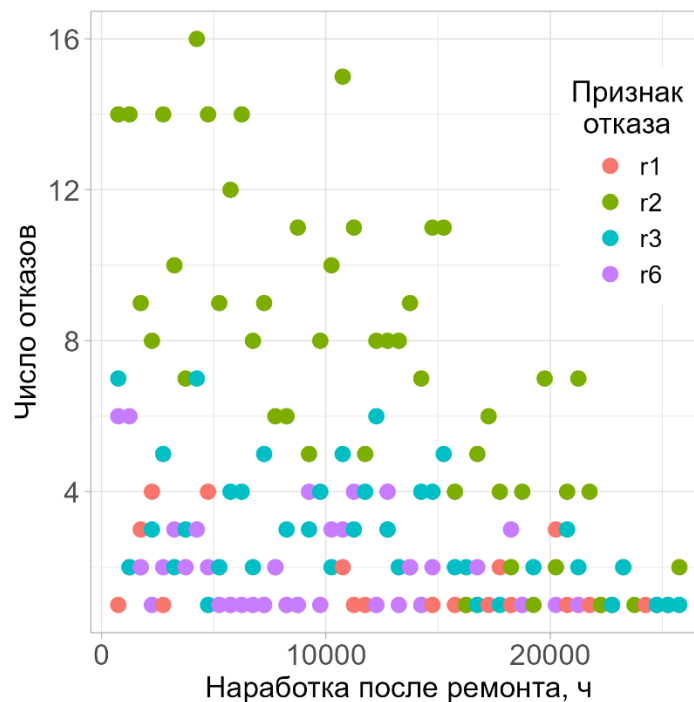


Рис. 1. Диаграмма рассеивания числа отказов ГТУ в зависимости от времени наработки после ремонта

Fig. 1. Diagram of the dispersion of the number of failures of GTU depending on the operating time after repair

Таблица 1.

Оценка параметров подобранной модели регрессии.

Table 1.

Estimation of the parameters of the selected regression model.

Параметр	Оценка	Стандарт ошибки	Значение статистики z	p-значение
β_0	1.090	0.151	7.221	$5.14 \cdot 10^{-13}$ ***
β_1	$-5.623 \cdot 10^{-5}$	$6.168 \cdot 10^{-6}$	-9.117	$< 2 \cdot 10^{-16}$ ***
β_2	1.527	0.147	10.371	$< 2 \cdot 10^{-16}$ ***
β_3	0.549	0.165	3.329	0.00087 ***
β_4	0.139	0.183	0.761	0.44657

Коды значимости: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

На основе оценок параметров, приведённых в табл. 1, подобранная модель может быть записана в виде:

$$\hat{y}_i = \exp(1.090 - 5.623 \cdot 10^{-5}x_{i1} + 1.527z_{i2} + 0.549z_{i3} + 0.139z_{i4}).$$

Таким образом, например, для предсказания среднего числа отказов для заданного среднего времени наработки после ремонта x_{i1} с признаком отказа r_1 следует использовать уравнение вида:

$$\hat{y}_i = \exp(1.090 - 5.623 \cdot 10^{-5}x_{i1}),$$

а, например для предсказания среднего числа отказов для заданного среднего времени наработки после ремонта x_{i1} и с признаком отказа r_2 – уравнение:

$$\hat{y}_i = \exp(1.090 - 5.623 \cdot 10^{-5}x_{i1} + 1.527) = \exp(2.617 - 5.623 \cdot 10^{-5}x_{i1}).$$

То есть, фактически подбирались четыре линии регрессии (для каждого признака отказа своя линия) с одинаковым параметром $\hat{\beta}_1$ (угловым коэффициентом), но с разными параметрами β_0 (постоянная регрессии). Это наглядно видно из рисунка 2, на котором по

точкам, относящимся к разным признакам отказа, подобраны отдельные кривые. Кроме того, для каждой кривой на рисунке

приведены границы 95% доверительных интервалов (области вокруг кривых соответствующего цвета).

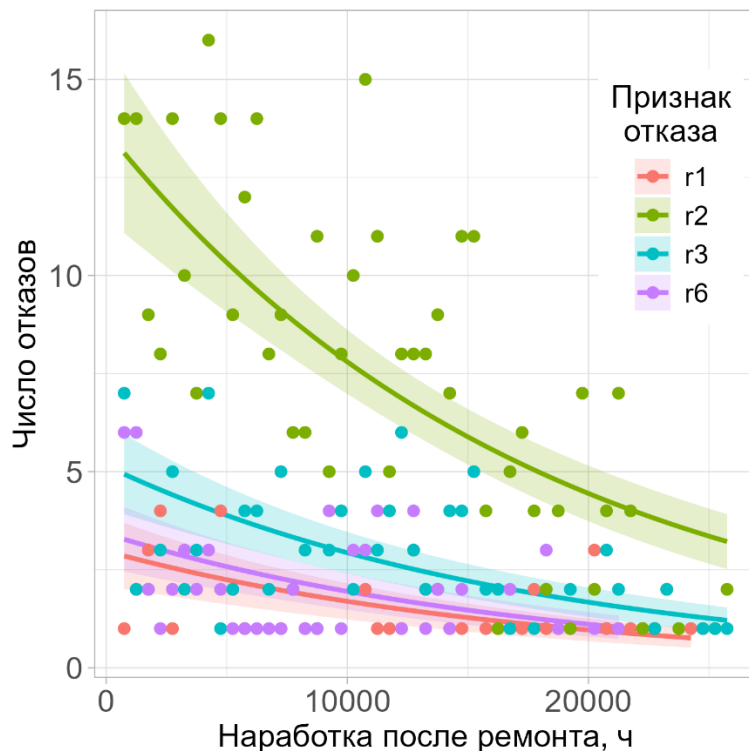


Рис. 2. Модель отказов ГТУ в диапазоне наработки 0-24 000 ч
Fig. 2. GTU failure model in the operating time range of 0-24,000 hours

Все оценки параметров модели, за исключением β_4 , являются статистически значимыми (p -значения намного меньше 0,05). Незначимость оценки параметра β_4 означает, что при заданном времени наработки после ремонта среднее число отказов для признака r_6 такое же, как и для признака r_1 .

Для проверки адекватности подобранной модели был выполнен анализ остатков. Основные графики для остатков приведены на рисунке 3.

На основе анализа значений расстояния Кука влиятельные наблюдения в данных не выявлены (все значения расстояний значительно меньше 1). График зависимости остатков от значений наработки после ремонта, а также диаграммы «ящик с усами» для остатков в зависимости от признака отказа, не демонстрируют каких-либо неслучайных структур. Однако график зависимости остатков от предсказанных по модели значений указывает на наличие некоторой коррелированности.

Для оценки доли общей изменчивости зависимой переменной (числа отказов), объясняемой подобранной моделью, в случае обобщённых линейных моделей, можно использовать долю объяснённой девиансы –

меры различия правдоподобия двух моделей (оценка разницы логарифмов правдоподобий для этих моделей) [2], [3], [4], [5]. Доля объяснённой девиансы является аналогом коэффициента детерминации R^2 для множественной линейной регрессии и часто называется псевдо- R^2 :

$$pR^2 = \frac{d_{null} - d_{res}}{d_{null}},$$

где d_{null} – девианса для нулевой модели, то есть модели, включающей только один параметр β_0 ; d_{res} – остаточная девианса, которая остаётся после включения в модель всех рассматриваемых параметров.

Для подобранной модели имеем:

нулевая девианса: 434.67 с 158 степенями свободы;

остаточная девианса: 133.27 с 154 степенями свободы.

Следовательно:

$$pR^2 = \frac{434.67 - 133.27}{434.67} \cong 0.693,$$

таким образом подобранная модель объясняет 69,3% девиансы.

С целью оценки вклада каждого из предикторов (среднего времени после ремонта и признака отказа) в долю объясняемой девиансы можно выполнить анализ девиансы, результаты которого приведены в таблице 2.

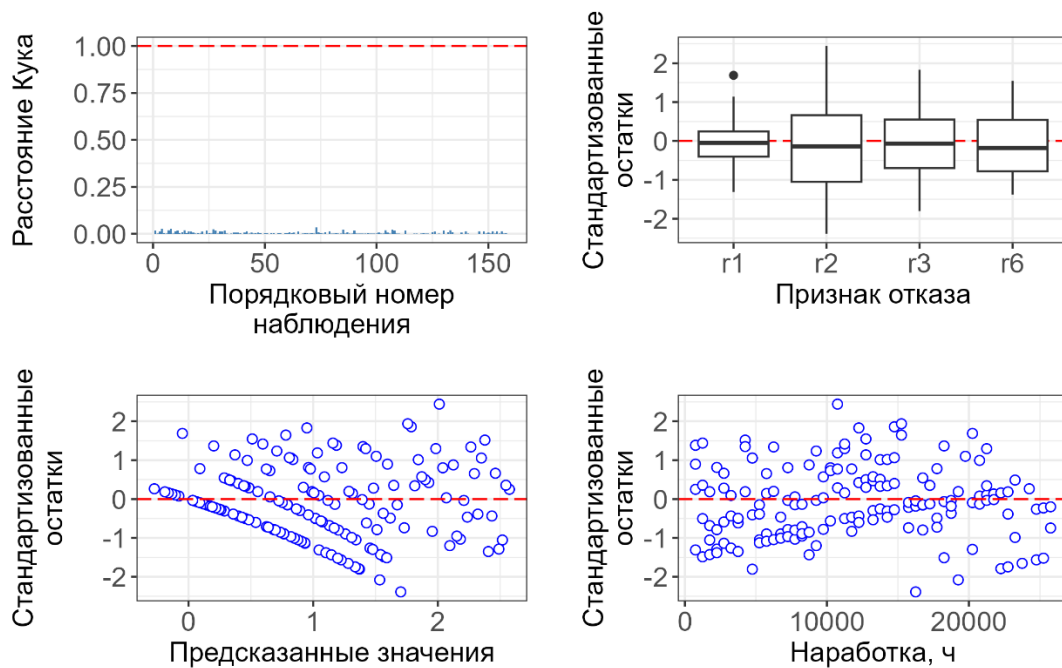


Рис. 3. Основные графики остатков для подобранной модели
Fig. 3. Basic graphs of residuals for the selected model

Таблица 2.

Анализ девиансы

Table 2.

Analysis of deviations

<i>Источник</i>	<i>df</i>	<i>Девианса</i>	<i>Ост. df</i>	<i>Ост. девианса</i>	<i>p-значение</i>
Нулевая модель	–	–	158	434.67	–
Наработка после ремонта	1	61.583	157	372.81	$3.701 \cdot 10^{-15} ***$
Признак отказа	3	239.545	154	133.27	$< 2.2 \cdot 10^{-16} ***$
Коды значимости: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

Из таблицы результатов анализа девиансы видно, что оба предиктора, использованных в подборе модели, сносят значимый вклад в уменьшение остаточной девиансы, при этом для признака отказа этот вклад является наибольшим.

Полученные результаты, особенно тенденция к снижению числа отказов с увеличением наработки для некоторых типов отказов (например, r2), могут быть интерпретированы в контексте кривой Вейбулла (ваннообразная кривая), которая широко используется в теории надежности [6].

Кривая Вейбулла описывает три основные фазы жизненного цикла оборудования:

1 Период приработки (Infant Mortality): характеризуется высокой, но убывающей интенсивностью отказов. Это связано с дефектами производства, ошибками монтажа или некачественными компонентами, которые проявляются на ранних стадиях эксплуатации. На графиках (Рис. 5) для признака r2 можно наблюдать сходство с этой фазой, где число отказов относительно высоко в начале эксплуатации и затем снижается.

2 Период нормальной эксплуатации (Useful Life): Интенсивность отказов остается относительно постоянной и низкой. Отказы в этот период носят случайный характер и могут быть вызваны внешними факторами или скрытыми дефектами. На графиках для r1, r3 и r6 наблюдается более стабильное, хотя и

снижающееся, число отказов после начального периода, что может соответствовать переходу к этой фазе.

3 Период износа (Wear-Out): Интенсивность отказов начинает возрастать

из-за естественного старения, износа материалов и компонентов. Этот период часто описывается распределением Вейбулла с параметром формы (β) больше 1.

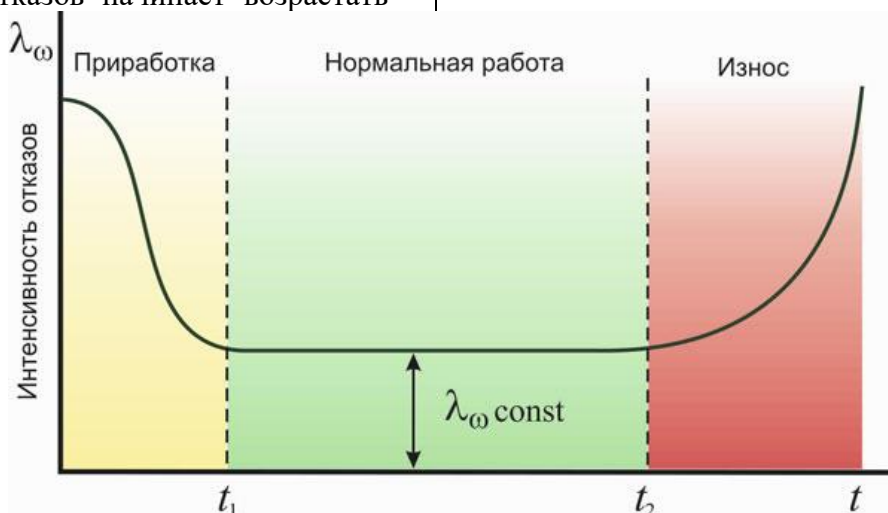


Рис. 4. Кривая Вейбулла (ваннообразная кривая)
Fig. 4. Weibull curve (tub-shaped curve)

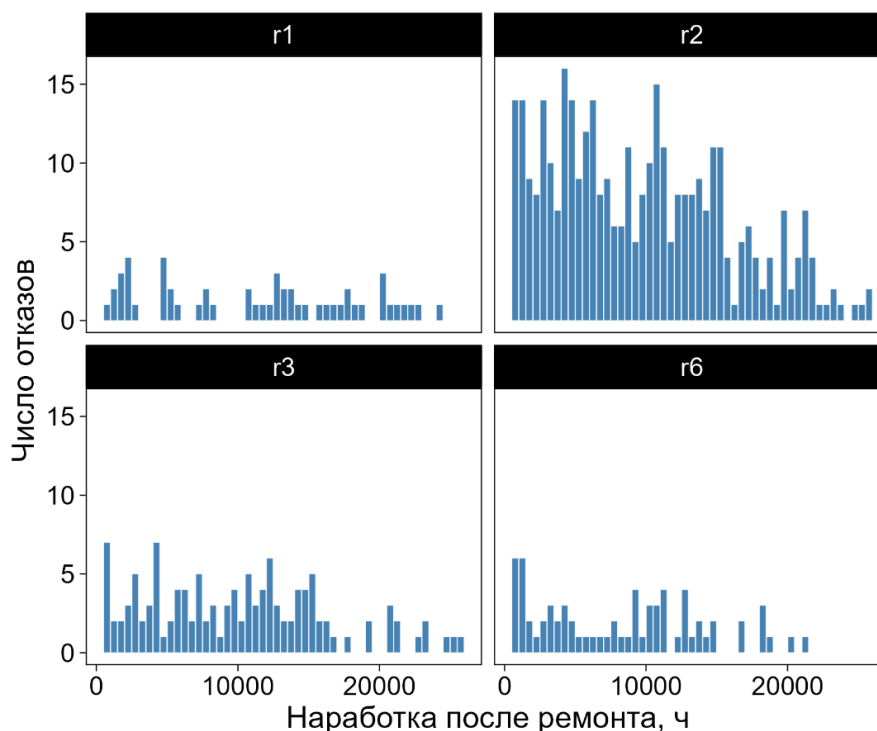


Рис. 5. Диаграммы числа отказов для каждого признака в отдельности
Fig. 5. Diagrams of the number of failures for each feature individually

Модель Вейбулла позволяет гибко описывать различные режимы отказов благодаря своим параметрам формы (β) и масштаба (η). Если $\beta < 1$, это соответствует убывающей интенсивности отказов (период приработки). Если $\beta = 1$, интенсивность отказов постоянна (период нормальной эксплуатации, экспоненциальное распределение). Если $\beta > 1$, интенсивность отказов возрастает (период износа). В нашем

случае, убывающая тенденция числа отказов с наработкой (отрицательный коэффициент β_1 в экспоненциальной модели) для некоторых признаков отказов указывает на то, что оборудование находится либо в периоде приработки, либо в ранней стадии нормальной эксплуатации, где еще проявляются остаточные дефекты.

Заключение

Подобранная регрессионная модель на

основе распределения Пуассона успешно прогнозирует число отказов газодинамического оборудования в зависимости от наработки после ремонта и типа отказа. При этом, судя по характеру графиков остатков, а также величины коэффициента псевдо R-квадрат, признак отказа r_2 является наиболее предпочтительным. Модель демонстрирует высокую объясняющую способность и статистическую значимость большинства предикторов. Выявленные тенденции изменения числа отказов по признакам отказа

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стрельников О.Ю., Коровицын В.С., Маликов А.П., Симонов А.В. Нормативно-методическая основа перехода на ремонт по техническому состоянию // Газовая промышленность. 2024. № 11(873). С. 116-118. EDN BUQNEZ.
2. McCullagh P., Nelder J.A. Generalized Linear Models. 2nd ed., Chapman and Hall: London. 1989. 532 p. ISBN 978-0-412-31760-6.
3. Myers R.H., Montgomery D.C., Vining G.G., Robinson T.J. Generalized Linear Models. With Application in Engineering and the Sciences. 2nd ed., Wiley: Hoboken, New Jersey. 2010. 520 p. ISBN 978-0-470-45463-3.
4. Montgomery D.C., Peck E.A., Vining G.G. Introduction to Linear Regression Analysis. 5th ed, Wiley: Hoboken, New Jersey. 679 p. ISBN 978-0-470-54281-1.
5. Rencher A.C., Schaalje G.B. Linear Models in Statistics. 2nd ed., Wiley: New Jersey. 2008. 688 p. ISBN 978-0-471-75498-5.
6. Rinne H. The Weibull Distribution: A Handbook. Boca Raton: CRC Press. 2008. 808 p. ISBN 9781420087444.
7. Дружинина Н.И. Статистические методы в управлении качеством и надежностью. М.: Форум, 2019. 224 с.
8. Афанасьев В.Н., Юзбашев М.М. Эконометрика для профессионалов: современный статистический и эконометрический инструментарий научных исследований. М.: Финансы и статистика, 2018. 352 с.
9. Li Y.G., Nilkitsaranon P. Gas turbine performance prognostic for condition-based maintenance. Applied Energy. 2009;86:2152–2161. DOI 10.1016/j.apenergy.2009.02.011.
10. Moubray J. Reliability-centred maintenance. 2nd ed. Oxford (UK): Butterworth-Heinemann. 1997. 448 p. ISBN 9780831131463.

Информация об авторах:

Шалыгин Михаил Геннадьевич - Брянский государственный технический университет (БГТУ), 241035, Брянская область, город Брянск, бульвар 50 лет Октября, дом 7, кафедра «Трубопроводные транспортные системы», доктор технических наук, доц., заведующий кафедрой, телефон (4832) 58-82-12 e-mail: migshalygin@yandex.ru

Борбач Николай Михайлович - Брянский государственный технический университет (БГТУ), 241035, Брянская область, город Брянск, бульвар 50 лет Октября, дом 7, кафедра «Управление качеством, стандартизация и метрология», кандидат технических наук, доцент, телефон (4832) 58-82-35 e-mail: borbact@mail.ru

r_1 , r_2 , r_3 , r_6 согласуются с теоретическими положениями кривой Вейбулла, что позволяет сделать выводы о текущем состоянии надежности оборудования и преобладающих механизмах отказов на различных этапах эксплуатации после ремонта. Дальнейшие исследования могут быть направлены на включение дополнительных эксплуатационных параметров и более детальный анализ параметров распределения Вейбулла для каждого типа отказа, в том числе с учетом процессов износа и деградации элементов оборудования.

REFERENCES

1. Strelnikov O.Yu., Korovitsyn V.S., Malikov A.P., Simonov A.V. Normative and Methodological Basis for Transition to Repair Based on Technical Condition. Gas Industry. 2024;11(873):116-118.
2. McCullagh P, Nelder J.A. Generalized Linear Models. 2nd ed. London: Chapman and Hall; 1989. 532 p.
3. Myers R.H., Montgomery D.C., Vining G.G., Robinson T.J. Generalized Linear Models. With Application in Engineering and the Sciences. 2nd ed. Hoboken (New Jersey): Wiley; 2010. 520 p.
4. Montgomery D.C., Peck E.A., Vining G.G. Introduction to Linear Regression Analysis. 5th ed. Hoboken, New Jersey: Wiley. 679 p.
5. Rencher A.C., Schaalje G.B. Linear Models in Statistics. 2nd ed. New Jersey: Wiley; 2008. 688 p.
6. Rinne H. The Weibull Distribution: A Handbook. Boca Raton: CRC Press; 2008. 808 p.
7. Druzhinina N.I. Statistical Methods for Quality and Reliability Management. Moscow: Forum; 2019. 224 p.
8. Afanasyev V.N., Yuzbashev M.M. Econometrics for Professionals: Modern Statistical and Econometric Tools for Scientific Research. Moscow: Finansy i statistika; 2018. 352 p.
9. Li Y.G., Nilkitsaranon P. Gas Turbine Performance Prognostic for Condition-Based Maintenance. Applied Energy. 2009;86:2152-2161. DOI 10.1016/j.apenergy.2009.02.011.
10. Moubray J. Reliability-Centred Maintenance. 2nd ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann; 1997. 448 p.

Information about the authors:

Shalygin Mikhail Gennadievich – Doctor of Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Pipeline Transport Systems at Bryansk State Technical University (BSTU), 7, Bulvar 50 let Oktyabrya, Bryansk, Bryansk Region, 241035, ph.: (4832) 58-82-12. Email: migshalygin@yandex.ru

Borbats Nikolai Mikhailovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Quality Management, Standardization and Metrology of Bryansk State Technical University (BSTU), 7, Bulvar 50 let Oktyabrya, Bryansk, Bryansk Region, 241035, ph.: (4832) 58-82-35. Email: borbact@mail.ru

Симонов Александр Владимирович
Брянский государственный технический университет
(БГТУ), 241035, Брянская область, город Брянск,
бульвар 50 лет Октября, дом 7, кафедра
«Турбиностроение и трубопроводные транспортные
системы», аспирант, телефон (4832) 58-82-12, 8-910-
298-08-52

Simonov Alexander Vladimirovich – Postgraduate
Student at the Department of Turbomachinery and Pipeline
Transport Systems of Bryansk State Technical University
(BSTU), 7, Bulvar 50 let Oktyabrya, Bryansk, Bryansk
Region, 241035, ph.: (4832) 58-82-12, 8-910-298-08-52.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.12.2025; одобрена после рецензирования 16.01.2026; принята к публикации 19.01.2026. Рецензент – Печников А.Н., доктор технических наук, доктор педагогических наук, профессор, профессор Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, член редакционного совета журнала «Эргодизайн»

The paper was submitted for publication on the 22nd of December 2025; approved after the peer review on the 16th of January 2026; accepted for publication on the 19th of January 2026. Reviewer – Pechnikov A.N., Doctor of Technical Sciences, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Professor of S.M. Budyonny Military Academy of the Signal Corps, member of the editorial board of the journal “Ergodesign”.

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!

Образец ссылок на литературные источники в журнале «Эргодизайн»

Ракитов А.И., Райков А.Н., Ковчуго Е.А. Наука, образование, инновации: стратегическое управление. М.: Наука. 2007. 228 с. ISBN 5-02-035395-7.

Меденников В.И., Муратова Л.Г., Сальников С.Г. Эффективность использования информационных интернет-ресурсов научно-исследовательских учреждений аграрного направления. М.: Аналитик. 2018. 237 с. ISBN 978-5-6040748-3-1. EDN YUTLRR.

Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Издательский центр «Академия». 2003. 464 с. ISBN 5769510528.

Беспалько В.П., Татур Ю.Г. Системно-методическое обеспечение учебного процесса // М.: МГУ. 1992. 348 с. ISBN 5-06-000170-9.

Бююль А., Цёфель П. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей. М.: DiaSoft, 2002. 601 с. ISBN 593772-014-8.