

Научная статья
УДК 338.3

Е.Ю. Сергеева, В.П. Постников

E.Y. Sergeeva, V.P. Postnikov

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ НА НАРАБОТКУ
ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ЭКОНОМИЧЕСКУЮ
ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ПРЕДПРИЯТИЯ
В ТЕЧЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА**

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF FACTORS
ON THE OPERATING TIME OF GAS TURBINE ENGINES
AND THE ECONOMIC ACTIVITY OF THE ENTERPRISE
DURING THE LIFE CYCLE**

Важность исследований состояния оборудования на протяжении его жизненного цикла очевидна, так как количество отказов, частота выхода техники из строя, а также возникающие в связи с этим издержки могут оказать существенное влияние на себестоимость выпускаемой продукции, экономические показатели деятельности компании, а также конкурентоспособность на рынке. Эффективное использование оборудования находится в неразрывной связи с его наработкой. В данной статье проводится анализ зависимости наработки парка газотурбинных двигателей от количества отказов и количества эксплуатируемых единиц двигателей, определяется влияние факторов на экономическую деятельность предприятия. Используя найденную модель, возможно прогнозировать наработку газотурбинных двигателей промышленных предприятий в будущем, что определяет практическую значимость работы.

Ключевые слова: наработка, ремонт, оборудование, двигатель, анализ, связь, влияние

The importance of studying the condition of equipment throughout its life cycle is obvious, since the number of failures, the frequency of equipment failure, as well as the costs associated with this can have a significant impact on the cost of production, the economic performance of the company, as well as competitiveness in the market. The effective use of equipment is inextricably linked with its operating time. In this paper, the analysis of the dependence of the operating time of the gas turbine engine fleet on the number of failures and the number of engine units in operation is carried out, the influence of factors on the economic activity of the enterprise is determined. Using the found model, it is possible to predict the operating time of gas turbine engines of industrial enterprises in future periods, which determines the practical significance of the work.

Keywords: operating time, repair, equipment, engine, analysis, communication, influence

Введение

Изучение характера и динамики отказов технических систем является основой их эффективного использования на протяжении всего жизненного цикла. Информация о состоянии и надежности оборудования позволит рационально организовывать ремонт и эксплуатацию технических объектов [1, с. 104]. Поддерживая оптимальные условия эксплуатации, удастся максимально использовать ресурс как в деталях оборудования, так и в самом оборудовании.

Важность исследований состояния оборудования очевидна, так как количество отказов, частота выхода техники из строя, а также возникающие в связи с этим издержки могут оказать существенное влияние на себестоимость выпускаемой продукции, экономические показатели деятельности компании, а также конкурентоспособность на рынке [2, с. 54].

Эффективное использование оборудования находится в неразрывной связи с его наработкой в течение жизненного цикла. Нарботка определяется продолжительностью работы изделия в некоторый промежуток времени [3, с. 79].

Корреляционно-регрессионный анализ

В статье приводится анализ зависимости наработки парка газотурбинных двигателей (ГТД) от количества отказов и количества эксплуатируемых единиц.

На основании эксплуатационных наблюдений за ГТД определяется вероятность безотказной работы и средней наработки на отказ при различных программах исследования [4, с. 114].

Результирующим показателем в исследовании выступает наработка ГТД, измеряемая в часах.

К числу влияющих факторов относятся:

- количество аварийных (АО) и вынужденных остановов (ВО), шт.;
- количество съемов двигателей в ремонт (СДР), шт.;
- количество неисправностей, устраненных в ходе эксплуатации (НУЭ), шт.;
- количество эксплуатируемых ГТД, шт.

Результирующий показатель и влияющие факторы представлены в табл. 1.

Из табл. 1 можно сделать вывод о том, что на протяжении исследуемого периода суммарная наработка парка двигателей в основном увеличивалась. Количество влияющих факторов также возрастало. Исключением стал период с марта по май 2022 г., когда суммарная наработка снижалась. Однако в апреле 2022 г. количество влияющих факторов уменьшалось, при этом количество эксплуатируемых двигателей не изменилось.

Исходя из этого представляется интересным проведение анализа степени влияния отказов ГТД и их количества на суммарную наработку двигателей.

Таблица 1

Исходные статистические данные

Период	Наработка, ч	АО и ВО, шт.	СДР, шт.	НУЭ, шт.	Эксплуатируемые двигатели, шт.
01.22	282 885	20	22	33	80
02.22	283 978	23	25	32	80
03.22	283 753	24	27	30	81
04.22	277 619	22	22	28	81
05.22	276 945	23	23	27	83
06.22	280 690	24	21	31	82
07.22	286 812	24	20	28	83
08.22	305 862	23	19	27	82
09.22	310 784	21	18	24	80
10.22	313 492	19	17	25	81
11.22	324 541	19	15	25	83
12.22	338 222	18	15	23	85

Для определения тесноты связи между изучаемыми показателями проведен расчёт коэффициентов корреляции.

Матрица коэффициентов парных корреляций представлена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица коэффициентов парных корреляций

	Наработка, ч	АО и ВО, шт.	СДР, шт.	НУЭ, шт.	Эксплуатируемые двигатели, шт.
Наработка, ч	1				
АО и ВО, шт.	-0,7761	1			
СДР, шт.	-0,8589	0,7350	1		
НУЭ, шт.	-0,7921	0,5543	0,7748	1	
Эксплуатируемые двигатели, шт.	0,4680	-0,2152	-0,5022	-0,5250	1

На основе матрицы коэффициентов парных корреляций, представленной в табл. 2, можно сделать ряд выводов:

- Сильная корреляционная связь наблюдается между суммарной наработкой двигателя и всеми изучаемыми факторами, так как значения коэффициентов парной корреляции $> 0,7$. Исключение составляет связь между наработкой и количеством эксплуатируемых двигателей (0,4680), здесь она является слабой.

- Между наработкой и количеством аварийных и вынужденных остановов (-0,7761), а также количеством съёмов двигателей в ремонт (-0,8589), неисправностями, устраненными в ходе эксплуатации (-0,7921), существует

обратная связь. Прямая связь наблюдается между наработкой и количеством эксплуатируемых двигателей (0,4680).

- Практически отсутствует связь между такими независимыми переменными, как количество эксплуатируемых двигателей и количество аварийных и вынужденных остановов (-0,2152).

- Наибольшая связь между изучаемыми показателями наблюдается между наработкой и количеством съёмов двигателей в ремонт (-0,8589).

Данные о количестве эксплуатируемых ГТД следует исключить, поскольку они оказывают слабое влияние на суммарную наработку.

Поддержание оптимальных условий эксплуатации позволяет максимально использовать ресурс, заложенный как в детали двигателя, так и в двигатель в целом. Поэтому необходим постоянный контроль за условиями эксплуатации, так как лишь в этом случае будет достигнут ощутимый результат.

Для дальнейшего анализа произведем построение и оценку уравнения множественной линейной регрессии в естественной форме:

$$Y = 463\,065,46x_i - 3\,074,06x_1 - 2\,077,21x_2 - 2\,108,67x_3, \quad (1)$$

где Y – зависимая переменная; x_i – независимые переменные: x_1 – количество аварийных и вынужденных остановов; x_2 – количество съёмов двигателей в ремонт; x_3 – количество неисправностей, устраненных в эксплуатации.

Параметры уравнения выявили, что

- при увеличении количества аварийных и вынужденных остановов на 1 единицу суммарная наработка двигателей уменьшится в среднем на 3 074 ч;
- если количество съёмов двигателей в ремонт возрастет на 1 единицу, то наработка снизится примерно на 2 077 ч;
- увеличение на 1 штуку количества неисправностей, устраненных в ходе эксплуатации, повлияет также на снижение наработки в среднем на 2109 ч.

Далее рассмотрим стандартизованное уравнение. Оно позволит сравнить факторы по силе их влияния на результат.

$$t_y = -0,326x_1 - 0,365x_2 - 0,329x_3. \quad (2)$$

где t_y , x_1 , x_2 , x_3 – стандартизированные переменные.

Исходя из уравнения регрессии в стандартизованном виде (2) делаем вывод о том, что все предложенные факторы оказывают примерно одинаковое влияние на результирующий показатель, но в большей степени влияет на суммарную наработку ГТД съёмы двигателей в ремонт (-0,365), а наименьшее – количество аварийных и вынужденных остановов (-0,326).

Прогнозирование суммарной наработки двигателей

Прогнозирование проводится на основе регрессионного моделирования динамики изменения параметров двигателя в процессе наработки [5, с. 76]. Для прогнозирования изменения суммарной наработки ГТД можно использовать построение трендов на основе исходных статистических данных (см. табл. 1).

Для выбора наилучшего уравнения линии воспользуемся такими показателями, как F-критерий Фишера, коэффициент корреляции, средняя ошибка аппроксимации и среднеквадратическое отклонение (табл. 3).

Таблица 3

Анализ уравнений трендов суммарной наработки

№ п/п	Линия тренда	Формула	F-критерий	Коэф. корреляции	Средняя ошибка аппроксимации, %	Среднеквадратическое отклонение
1	Экспоненциальная	$266\ 163e^{0,0166x}$	35,49	0,89	0,03	9 893,24
2	Линейная	$5\ 037,2x + 264\ 390$	34,18	0,88	0,03	10 303,27
3	Логарифмическая	$19\ 215\ln(x) + 265\ 127$	9,79	0,70	0,04	15 393,85
4	Полиномиальная	$800,27x^2 - 5\ 366,3x + 288\ 665$	216,78	0,98	0,01	4 547,65
5	Степенная	$266770x^{0,0634}$	9,33	0,72	0,04	15 116,53

Поскольку для статистического ряда наработки $F_{\text{табл}}$ составляет 4,96, то все уравнения трендов статистически значимы. Коэффициенты корреляции трендов демонстрируют сильную связь, но наибольшая наблюдается в экспоненциальном, линейном и полиномиальном трендах. Средняя ошибка аппроксимации практически у всех трендов имеет небольшое значение. Поскольку наименьшее значение среднеквадратического отклонения имеет полиномиальная линия тренда (рисунок), то именно ее используем для прогнозирования суммарной наработки.

Уравнение полиномиального тренда выглядит следующим образом:

$$y = 800,27x^2 - 5\ 366,3x + 288\ 665. \quad (3)$$

Найдем прогнозные значения суммарной наработки ГТД до июня 2023 г. Получится так называемый точечный прогноз. Для оценки надежности прогнозных значений необходимо найти интервал, в который попадут фактические величины с вероятностью 95 %. Коэффициент Стьюдента в данном случае равен 2,23, так как число степеней свободы равно 10, а уровень надежности 0,95. Представим полученные значения в табл. 4.

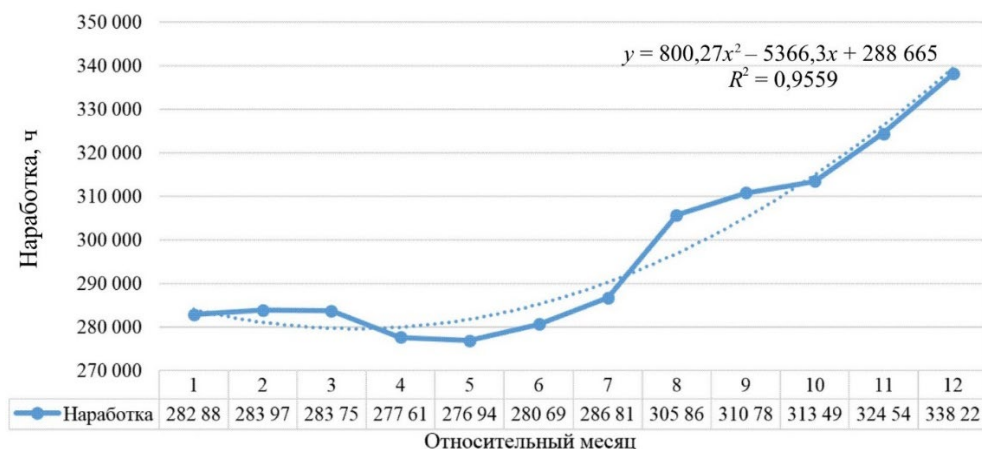


Рис. Полиномиальный тренд суммарной наработки

Таблица 4

Прогнозные значения суммарной наработки ГТД

Месяц	Наработка, ч	Интервал прогноза, ч
01.2023	339 508	±512
02.2023	354 149	±512
03.2023	370 390	±512
04.2023	388 231	±512
05.2023	407 673	±512
06.2023	428 716	±512

Данные табл. 4 свидетельствуют, что наработка по прогнозу увеличится в 1,3 раза и составит $428\,716 \pm 512$ ч.

Прогнозирование дает возможность эксплуатировать двигатели по состоянию, что существенно сокращает затраты на обслуживание техники. Уменьшение затрат на обслуживание происходит за счет максимального снижения вероятности возникновения неисправностей и отказов, достигаемого за счет прогнозирования технического состояния, при этом сокращается время обслуживания и ремонта и уменьшается время простоя двигателей.

Влияние факторов на экономическую деятельность предприятия

Рассмотрим влияние факторов с экономической точки зрения. Газотурбинные двигатели располагаются на компрессорных станциях (КС). КС магистральных газопроводов предназначены для поддержания рабочего давления, обеспечивающего транспортировку газа. Далее газ попадает на

газораспределительные станции (ГРС), которые нужны непосредственно для равномерного снабжения и подготовки газа для потребителей.

По состоянию на 01.01.2023 г. средняя нагрузка ГРС составляет около 8 тыс. м³/ч [6]. Средняя оптовая цена на газ в России, реализуемый потребителям, составляет 5 323,2 руб/1 000 м³ без НДС [7].

Упущенная выгода, которую могла бы получить газотранспортная компания при стабильной работе двигателей, представлена в табл. 5.

Таблица 5

Упущенная выгода газотранспортной компании

Фактор	Снижение наработки при возникновении фактора, ч	Возможный объем транспортировки газа за время простоя, тыс. м ³	Упущенная выгода, тыс. руб.
АО и ВО	3 074	24 592	130 908,1
СДР	2 077	16 616	88 450,3
НУЭ	2 109	16 872	89 813,0

Табл. 5 свидетельствует о том, что при увеличении количества аварийных и вынужденных остановов на 1 единицу суммарная наработка двигателей уменьшится в среднем на 3 074 ч. За это время возможно осуществить транспортировку газа в объеме 24 592 тыс. м³. Упущенная выгода, которую могла бы получить компания за данное время, составит 130 908,1 тыс. руб.

Если количество съёмов двигателей в ремонт возрастет на 1 единицу, то наработка снизится примерно на 2 077 ч. Возможный объем транспортировки за указанное время составит 16 616 тыс. м³. За данный период времени компания могла бы получить доходы в размере 88 450,3 тыс. руб.

Увеличение на 1 шт. количества неисправностей повлияет также на снижение наработки в среднем на 2 109 ч. Газотранспортное предприятие в результате этого упускает доходы в размере 89 813 тыс. руб., так как объем транспортируемого газа уменьшается на 16 872 тыс. м³.

Таким образом, предприятие теряет большой объем прибыли, которую могло бы получить при исключении указанных факторов и стабильной работе ГТД.

Стоит отметить, что возникновению рассматриваемых влияющих факторов способствуют неисправности оборудования, в результате компания не может обойтись без его ремонта. Отсюда следует, что затраты предприятий на ремонт и техобслуживание являются неотъемлемой частью функционирования производства. В табл. 6 представлены наиболее важные для нормального функционирования ГТД виды ремонта и средняя стоимость их выполнения [8].

Таблица 6

Виды ремонта и стоимость их выполнения

Ремонт комплекта направляющих аппаратов, руб.	Вид ремонта	
	Ремонт маслосистемы, руб.	Ремонт камеры сгорания, руб.
240 127	365 779	636 984

Из табл. 6 можно сделать вывод, что при возникновении неисправностей компании приходится нести большие затраты на устранение неполадок. Расходы по ремонту и техническому обслуживанию оборудования на промышленных предприятиях являются важнейшей статьёй, которая оказывает влияние на себестоимость. В зависимости от масштаба и отраслевой принадлежности компаний они могут колебаться в районе 10–40 %. К тому же, по оценкам специалистов, на многих предприятиях в ремонте может простаивать до 50 % технологического оборудования. И, естественно, это оказывает негативное влияние на общую экономическую деятельность предприятия.

В данной работе проанализированы факторы, влияющие на суммарную наработку ГТД, а также выявлены взаимосвязи результирующих показателей и влияющих факторов. Путем подстановки влияющих факторов в уравнение регрессии рассчитаны прогнозные значения наработки ГТД, а также определено влияние факторов на экономическую деятельность предприятия.

Список литературы

1. Головин С.И., Ревякин М.М., Жосан А.А. К вопросу оценки условий эксплуатации и прогнозирования остаточного ресурса двигателей внутреннего сгорания // *Агротехника и энергообеспечение*. – 2019. – № 3(24). – С. 103–110.
2. Яковлев Г.С., Иванов Ф.Ф. Выявление зависимости между наработкой и количеством отказов установок электроцентробежного насоса при нефтедобыче // *Вестник кибернетики*. – 2020. – № 3(39). – С. 54–61.
3. Надыршин А.И., Горюнов И.М. Исследование изменения параметров ТРДДФ в процессе эксплуатации // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. – 2019. – Т. 23, № 3(85). – С. 79–87.
4. Королев А.Е. Анализ методов испытаний техники на надёжность // *International Journal of Professional Science*. – 2020. – No. 12. – P. 114–118.
5. Прогнозирование технического состояния ГТД за пределы интервала наработки / К.Л. Изиметов [и др.] // *Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. – 2020. – № 1(22). – С. 76–80.

6. Газпром трансгаз Чайковский: офиц. сайт // О компании. Раскрытие информации. – URL: <https://tchaikovsky-tr.gazprom.ru/about/svobodnye-moshchnosti-grs/> (дата обращения: 17.03.2023).

7. Об утверждении оптовых цен на газ, добываемый ПАО «Газпром» и его аффилированными лицами, реализуемый потребителям Российской Федерации: Приказ ФАС России от 16.11.2022г. №820/22. Доступ через СПС «КонсультантПлюс».

8. Базовые цены на работы по ремонту энергетического оборудования, адекватные условиям функционирования конкурентного рынка услуг по ремонту и техперевооружению. Часть 9. Базовые цены на работы по ремонту газотурбинных установок [Электронный ресурс]: Справочник. – URL: <http://gost.gtsever.ru/Data2/1/4293831/4293831703.htm#i13816> (дата обращения: 25.03.2023).

Сведения об авторах

Сергеева Елена Юрьевна – магистрант, гуманитарный факультет, кафедра «Экономика и управление промышленным производством», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: lena.lenasergeeva@yandex.ru.

Научный руководитель **Постников Владимир Павлович** – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Экономика и управление промышленным производством», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: postnikov-pstu@mail.ru.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Получена: 24.05.2023

Одобрена: 24.05.2023

Принята к публикации: 25.05.2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Сергеева, Е.Ю. Анализ влияния факторов на наработку газотурбинных двигателей и экономическую деятельность предприятия в течение жизненного цикла / Е.Ю. Сергеева, В.П. Постников // *Master's Journal*. – 2023. – № 1. – Art. № 08.

Please cite this article in English as: Sergeeva E.Y., Postnikov V.P. Analysis of the influence of factors on the operating time of gas turbine engines and the economic activity of the enterprise during the life cycle. *Master's Journal*, 2023, no. 1, art. no. 08.