

Диагностика газового тракта центробежного нагнетателя природного газа с приводом от свободной турбины

Дмитрий Александрович Иноземцев¹✉, Алексей Вадимович Бунякин²,
Владислав Игоревич Дунаев¹

¹ Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

² Майкопский государственный технологический университет,

филиал в п. Яблоновский, Республика Адыгея, Россия

Контакт для переписки: d.a.inozemtsev@mail.ru✉

Аннотация. Газогенератор и центробежный нагнетатель с приводом от свободной турбины представляет собой кинематически незамкнутую механическую систему. Сам газогенератор является кинематически замкнутой системой, поскольку компрессор и турбина находятся на одном валу, но его связь с нагнетателем только лишь газодинамическая. Это определяет специфику математической модели данного агрегата, позволяющую проводить его диагностику методами неразрушающего контроля, в частности вычисление мощности привода нагнетателя возможно только с помощью измерения частот вращения газогенератора и свободной турбины отдельно и одновременно. Целью представленной работы является построение зависимости мощности от этих частот на основе обработки экспериментальных данных из паспорта, представленного заводом изготовителем. Эта зависимость позволяет вывести безразмерный диагностический параметр, имеющий физический смысл, аналогичный КПД нагнетателя, а отклонение его значения от того, что характеризует нормальный (штатный) режим работы агрегата, является признаком развития внештатной ситуации.

Ключевые слова: нагнетатель природного газа, привод от свободной турбины, безразмерный диагностический параметр, мощностная характеристика газотурбинного двигателя

Цитирование: Иноземцев Д. А., Бунякин А. В., Дунаев В. И. 2026. Диагностика газового тракта центробежного нагнетателя природного газа с приводом от свободной турбины // Вестник Тюменского государственного университета. Фи-

зико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 12. № 2 (46).
С. 105–116. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2026-12-2-105-116>

Поступила 08.12.2025; одобрена 10.03.2026; принята 11.03.2026

Diagnostics of the gas path of a centrifugal supercharger of natural gas with a drive from a free turbine

Dmitry A. Inozemtsev¹✉, Aleksey V. Bunyakin², Vladislav I. Dunaev¹

¹ Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

² Maykop State Technological University, branch in Yablonovsky village, Republic of Adygea, Russia

Corresponding author: d.a.inozemtsev@mail.ru✉

Abstract. A gas generator and a centrifugal supercharger driven by a free turbine represent kinematically open mechanical system. The gas generator itself is a kinematically closed system, since the compressor and turbine are located on the same shaft, but its connection to the supercharger is purely gas-dynamic. This determines the specificity of the mathematical model of this unit, which allows its diagnostics to be carried out using non-destructive testing methods; in particular, the calculation of the supercharger drive power is possible only by measuring the rotation frequencies of the gas generator and the free turbine separately and simultaneously. The purpose of this work is to construct the dependence of power on these frequencies based on the processing of experimental data from the passport provided by the manufacturer. This dependence allows us to derive a dimensionless diagnostic parameter that has a physical meaning similar to the efficiency of a gas pump unit, and the deviation of its value from that which characterizes the normal (standard) operating mode of the unit is a sign of the development of an emergency situation.

Keywords: natural gas pump unit, free turbine drive, dimensionless diagnostic parameter, energy characteristic of a gas turbine engine

Citation: Inozemtsev, D. A., Bunyakin, A. V. & Dunaev, V. I. (2026). Diagnostics of the gas path of a centrifugal supercharger of natural gas with a drive from a free turbine. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 12(2), 105–116. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2026-12-2-105-116>

Received Dec. 8, 2025; Reviewed Mar. 10, 2026; Accepted Mar. 11, 2026

Введение и обзор литературы

Важнейшим методом определения текущего технического состояния газотурбинного агрегата является параметрическая диагностика, опирающаяся на математическое моделирование процессов, протекающих в его тракте, см., например, работы [Смирнов и др., 2018; Иноземцев и др., 2025].

В некоторых работах [Перевошиков, 2014; Перевошиков, 2019] при помощи корреляционных матриц получена зависимость политропного КПД от газодинамических параметров в тракте газоперекачивающего агрегата. Это позволяет осуществлять диагностику компрессора высокого давления.

Кроме того, доказано, что загрязнение лопаток агрегата влияет на параметры газотурбинного двигателя (ГТД) [Струговец и др., 2010]. Для диагностики технического состояния ГТД также используются методы, опирающиеся на прямое измерение мощности и крутящего момента на валу [Чичутин, Носков, 2011]. Для анализа совокупности параметров ГТД используется эффективный метод построения фазовых портретов [Аверьянов, 2006]. Для описания отклонения текущего режима от режима работы при нулевой наработке вводится комплексный критерий [Кривошеев и др., 2017], позволяющий эффективно обрабатывать данные измерения. Этому созвучно применение нейронных сетей с выборкой большого числа обучающих показателей [Раэиндзатуву, Гишваров, 2017].

Достаточную эффективность имеет статистический метод оценки времени до разрушения элементов агрегата по параметру Ларсона–Миллера [Чекардовский, Демура, 2013]. Помимо этого, следует отметить статистическую методику диагностики, предложенную в работе [Стельмах и др., 2015].

Математическое описание некоторых зависимостей, моделирующих работу газоперекачивающего агрегата (ГПА) с учетом паспортных характеристик центробежного компрессора (нагнетателя природного газа), позволяет рассчитать затрачиваемую мощность при ухудшении технического состояния и изменения параметров внешней среды [Багерман и др., 2015]. В работе [Гилязиев, Васильев, 2018] предлагается диагностический параметр, характеризующий уровень потребления топливного газа.

Математическое моделирование параметров газового тракта, непосредственное измерение которых затруднительно, открывает возможности проводить диагностику агрегата методами неразрушающего контроля [Иванов, 2012; Заславский, Блинов, 2018; Кампти, 2000].

Методы исследования

Построение математической модели агрегата, в котором связь между газогенератором и нагнетателем газодинамическая, а не жесткая, не представляется возможным на основе приравнивания мощностей компрессора и турбины, как делается, например, в работах [Галиуллин, Леонтьев, 1991; Бунякин, Торбеев, 2006]. При этом необходимо измерение частот вращения двух валов — газогенератора и свободной турбины — отдельно и одновременно. В данной работе рассматривается именно такая газодинамическая

связка, и в основу диагностического моделирования агрегатов такого типа положена обработка эмпирических данных из паспорта, предоставляемого заводом изготовителем. Подобная методика построения зависимостей описана в работах [Лефевр, 1986]. Отклонение от нормального (штатного) режима отслеживается посредством значения безразмерного диагностического параметра, имеющего физический смысл, аналогичный КПД агрегата.

Построение математической модели течения газа через тракт газотурбинного двигателя

Текущая мощность N_0 на валу свободной турбины определяется равенством:

$$N_0 = m_0 N \left(\frac{n_{zz}}{n_0}, \frac{n_{cm}}{n_0} \right) \frac{P_{\text{воз}}}{P_0} \sqrt{\frac{T_0}{T_{\text{воз}}}}. \quad (1)$$

В равенстве (1) введены следующие обозначения: $N \left(\frac{n_{zz}}{n_0}, \frac{n_{cm}}{n_0} \right)$ — приведенная мощность на валу свободной турбины; n_{zz} — частота вращения вала газогенератора (рад/с); n_{cm} — частота вращения вала свободной турбины (рад/с); $m_0 = 100$ кВт — масштабирующий множитель для мощности; $n_0 = 1000$ рад/с — масштабирующие множитель для частот вращения n_{cm} и n_{zz} ; $P_{\text{воз}}$, $T_{\text{воз}}$ — текущие атмосферное давление воздуха (Па) и температура атмосферного воздуха (К) соответственно; P_0 , T_0 — параметры нормальной атмосферы, где $P_0 = 101325$ Па, $T_0 = 293$ К.

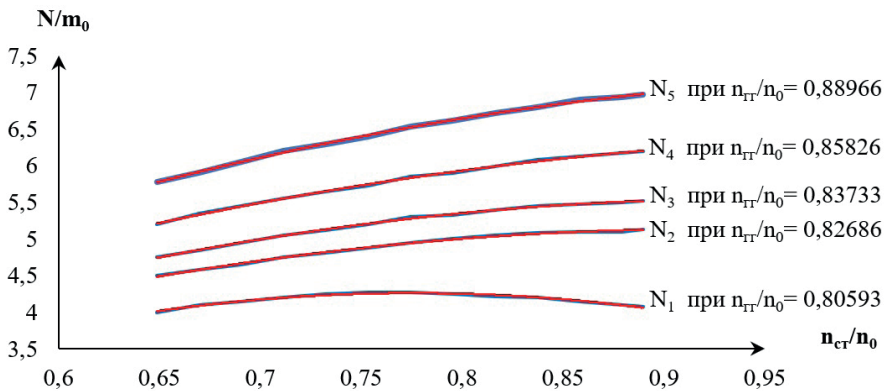


Рис. 1. Приведенная мощность свободной турбины (ГТД «НК-12»)

Fig. 1. Relative power of the free turbine (gas turbine engine "NK-12")

На рис. 1 изображены графики функции $N \left(\frac{n_{zz}}{n_0}, \frac{n_{cm}}{n_0} \right)$ в зависимости от масштабированных частот вращения вала свободной турбины n_{zz}/n_0 и газогенератора n_{cm}/n_0 вала

ГТД (приведенная мощность, построенная по данным испытаний на гидротормозном стенде в стационарных условиях).

Данные графики получены по данным, представленным в инструкции по эксплуатации и техническому обслуживанию двигателя НК-12 СТ, для связки «газогенератор – свободная турбина», когда свободная турбина находится на одном валу с нагнетателем (маркировка «НК-12») [Двигатель НК-12СТ..., 1984].

Определим величину приведенной мощности $N\left(\frac{n_{zz}}{n_0}, \frac{n_{cm}}{n_0}\right)$ как функцию от n_{cm}/n_0 при различных n_{zz}/n_0 . Уравнения зависимостей, изображенных на рис. 1, аппроксимированы методом наименьших квадратов [Прохоров, 1988] по двенадцати точкам:

$$\begin{aligned}\frac{N_1}{1000} &= -15,415 \left(\frac{n_{cm}}{n_0}\right)^2 + 23,916 \frac{n_{cm}}{n_0} - 5,013 \quad \text{при } \frac{n_{zz}}{n_0} = 0,80593, \\ \frac{N_2}{1000} &= -8,6406 \left(\frac{n_{cm}}{n_0}\right)^2 + 15,961 \frac{n_{cm}}{n_0} - 2,2342 \quad \text{при } \frac{n_{zz}}{n_0} = 0,82686, \\ \frac{N_3}{1000} &= -9,0232 \left(\frac{n_{cm}}{n_0}\right)^2 + 17,112 \frac{n_{cm}}{n_0} - 2,5613 \quad \text{при } \frac{n_{zz}}{n_0} = 0,83733, \\ \frac{N_4}{1000} &= -7,3092 \left(\frac{n_{cm}}{n_0}\right)^2 + 15,366 \frac{n_{cm}}{n_0} - 1,6815 \quad \text{при } \frac{n_{zz}}{n_0} = 0,85826, \\ \frac{N_5}{1000} &= -8,4508 \left(\frac{n_{cm}}{n_0}\right)^2 + 18,008 \frac{n_{cm}}{n_0} - 2,3536 \quad \text{при } \frac{n_{zz}}{n_0} = 0,88966.\end{aligned}\tag{2}$$

Отметим, что в выражениях (2) коэффициенты при степенях n_{cm}/n_0 имеют одинаковый порядок — это результат нормировки на $n_0 = 1000$ рад/с.

Будем искать зависимость $N\left(\frac{n_{zz}}{n_0}, \frac{n_{cm}}{n_0}\right)$ от $x = \frac{n_{cm}}{n_0}$, $y = \frac{n_{zz}}{n_0}$ в виде:

$$N\left(\frac{n_{zz}}{n_0}, \frac{n_{cm}}{n_0}\right) = ax^2 + bx + c,\tag{3}$$

$$a = \alpha_1 y^2 + \beta_1 y + \gamma_1, \quad b = \alpha_2 y^2 + \beta_2 y + \gamma_2, \quad c = \alpha_3 y^2 + \beta_3 y + \gamma_3.$$

Аппроксимация зависимостей коэффициентов парабол a, b, c от $y = \frac{n_{zz}}{n_0}$

$$\begin{aligned}
 a &= -2545y^2 + 4390,6y - 1900,4, \\
 b &= 3214,2y^2 - 5510,9y + 2377, \\
 c &= -1060,3y^2 - 1826,9y + 788,47,
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

производится также методом наименьших квадратов по пяти точкам $y = \frac{n_{zz}}{n_0}$, которые соответствуют на графиках рис. 2 точкам излома сплошной линии.

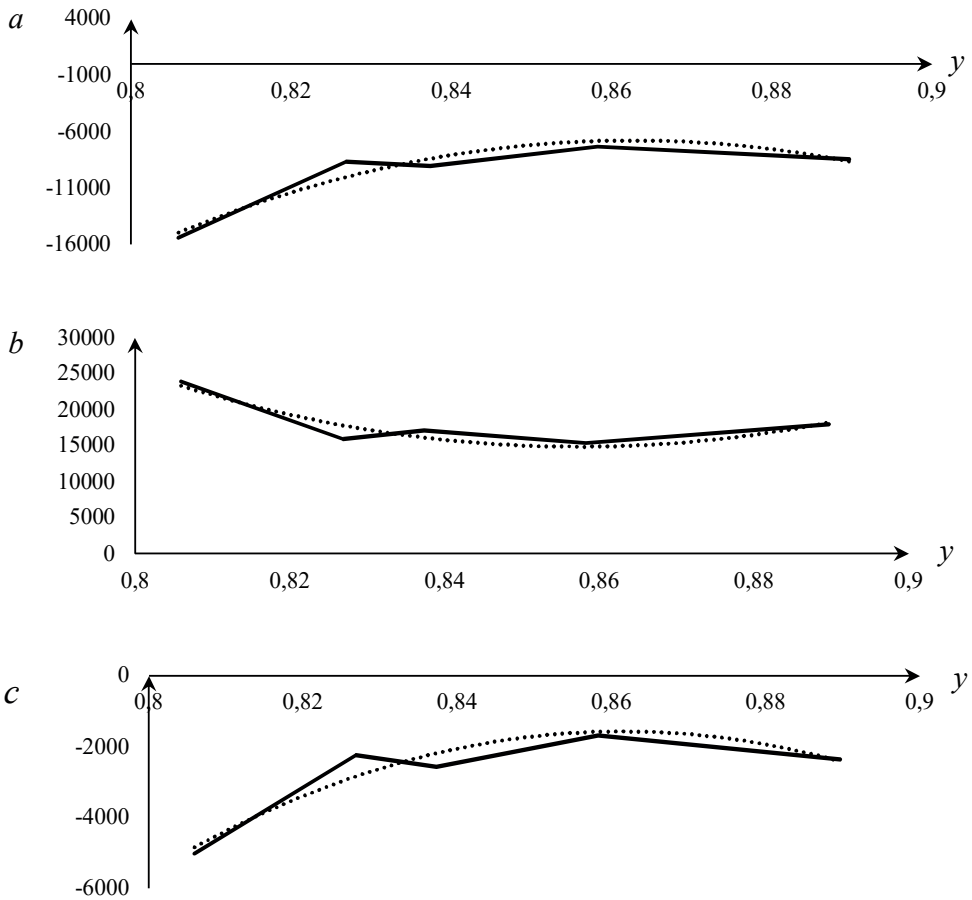


Рис. 2. Графики зависимостей коэффициентов a , b , c от частот вращения газогенератора

Fig. 2. Graphs of the coefficients' dependence on the rotational speed of the gas generator

Подставляя в формулу (3) коэффициенты a , b , c , вычисленные по формуле (4), получим аппроксимацию приведенной мощности:

$$N(x,y)=\left[\begin{matrix}(-2545y^2+4390,6y-1900,4)x^2+\\+(3214,2y^2-5510,9y+2377)x+\\+1060,3y^2-1826,9y+788,5\end{matrix}\right]. \tag{5}$$

Значения приведенной мощности от масштабированных частот в точках аппроксимации представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значения приведенной мощности от масштабированных частот в точках аппроксимации
Table 1. Values of the relative power from scaled frequencies at the approximation points

N_0/m_0	n_{rr}/n_0	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5
$n_{сг}/n_0$		0,805933	0,826867	0,837333	0,858267	0,889667
x_1	0,64893	4,0297367	4,535208	4,772744	5,217425	5,808471
x_2	0,66987	4,1055387	4,631749	4,878676	5,340185	5,951583
x_3	0,69080	4,1682653	4,719529	4,977271	5,456989	6,087145
x_4	0,71173	4,2179165	4,798547	5,068529	5,567836	6,215157
x_5	0,73267	4,2544922	4,868803	5,152448	5,672727	6,335619
x_6	0,75360	4,2779924	4,930297	5,229029	5,771661	6,448532
x_7	0,77453	4,2884173	4,98303	5,298272	5,864638	6,553896
x_8	0,79547	4,2857667	5,027001	5,360177	5,95166	6,651709
x_9	0,81640	4,2700406	5,06221	5,414744	6,032724	6,741973
x_{10}	0,83733	4,2412392	5,088658	5,461973	6,107832	6,824688
x_{11}	0,85827	4,1993623	5,106344	5,501865	6,176983	6,899852
x_{12}	0,87920	4,1444099	5,115268	5,534418	6,240178	6,967468

Такой способ аппроксимации экспериментальных данных для нахождения величины N_0 по формуле (1) с учетом формулы (5) позволяет определить безразмерный диагностический параметр (БДП), имеющий физически смысл аналогичный КПД нагнетателя по формуле:

$$\eta_{наг}=\frac{\gamma}{\gamma-1}\frac{R}{\mu}\frac{Q_m}{N_0}(T_{вых}-T_{вх}). \tag{6}$$

В формуле (6) обозначено:

$\gamma = 1,31$ — показатель адиабаты перекачиваемого (природного с основной метановой фракцией) газа.

$\mu = 0,016$ кг/моль — молярная масса газа с основной метановой фракцией.

Величины γ и μ могут считаться постоянными в течение диагностического периода и меняться лишь при существенном изменении состава перекачиваемого газа.

$R = 8,31$ Дж/град · моль — универсальная газовая постоянная.

Q_m (кг/с) — массовый расход перекачиваемого газа на каждом из нагнетателей связан с объемным расходом Q_V (нм³/час) зависимостью $Q_m = Q_V \frac{\rho_0}{3600}$.

Общий расход всего компрессорного цеха может быть разделен между агрегатами пропорционально их частотам вращения.

$(T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})$ — разность температур газа на выходе и входе нагнетателя.

$\rho_0 = 0,68$ кг/м³ — плотность метана при нормальных условиях (считается постоянной).

Отметим, что подобные БДП были введены в работе [Иноземцев и др., 2025] для диагностики осевого компрессора и турбины ГТД отдельно, находящихся в жесткой кинематической связке (на одном валу). В такой схеме измеряется частота вращения вала, почти вся мощность, вырабатываемая турбиной, затрачивается на компрессоре, и задача сводится к нахождению расхода воздуха через тракт ГТД. Задача же, рассматриваемая в данной работе, отличается тем, что связка ГТД — свободная турбина нагнетателя не кинематическая, а газодинамическая, поэтому мощность приходится вычислять посредством измерения двух частот, а расход газа через нагнетатель находится отдельно.

Результаты и обсуждение

В работе введен безразмерный диагностический параметр $\eta_{\text{наг}}$, являющийся функцией от масштабированных частот вращения газогенератора, свободной турбины, расхода перекачиваемого газа и нагнетаемой разницы температур (режимные параметры), а также условно постоянных величин. Параметр $\eta_{\text{наг}}$ определенный в начальный период эксплуатации (после планового техобслуживания), характеризует штатную работу центробежного нагнетателя в составе газоперекачивающего агрегата со свободной турбиной. Установление границ отклонения параметра $\eta_{\text{наг}}$ от штатных значений производится для каждого конкретного агрегата в условиях его эксплуатации.

Уменьшение параметра $\eta_{\text{наг}}$ позволяет диагностировать такие нарушения в тракте центробежного нагнетателя, как отложения на стенках каналов рабочего колеса (уменьшение расхода при сохранении перепада температур), а также предпомпажные режимы. Кроме того, диагностике поддаются эрозионный износ рабочих колес, увеличение зазора в уплотнениях покрывающего диска, увеличение механических примесей в газе.

Список источников

- Аверьянов А. Б. 2006. Совершенствование методов параметрической диагностики компрессора высокого давления // Научный вестник МГТУ ГА. № 109. С. 85–89. EDN KPHFGL.
- Багерман А. З., Конопатова А. В., Леонова И. П., Шитков В. Н. 2015. От параметрической диагностики до прогнозирования жизненного цикла газотурбинного двигателя // Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика А. Н. Крылова. № 89 (373). С. 81–84. EDN JRZVWA.

- Бунякин А. В., Торбеев С. А. 2006. Диагностика проточной части авиационных газотурбинных двигателей на примере ТРДД Д-36 // Научный вестник МГТУ ГА. № 109. С. 30–37.
- Галиуллин З. Т., Леонтьев Е. В. 1991. Интенсификация магистрального транспорта газа. М.: Недра. 271 с.
- Гилязиев М. Г., Васильев Э. Р. 2018. Параметрическая диагностика газоперекачивающих агрегатов ГПА-Ц-25 НК-РС // Новые направления инновационной деятельности на предприятиях газовой промышленности: сборник докладов расширенного совещания Научно-технического совета и Совета молодых ученых и специалистов ООО «Газпром трансгаз Казань». Казань: ООО «КОНВЕРТ». С. 30–38. – EDN YRPIIX.
- Двигатель НК-12СТ: инструкция по эксплуатации и техническому обслуживанию. Куйбышев: Изд. Куйбышевского обкома КПСС, 1984. — 323 с. + [1] отд. л. схем.
- Заславский Е. А., Блинов В. А. 2018. Параметрическая диагностика и оценка технического состояния газотурбинных газоперекачивающих агрегатов // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти проф. Данилова Н. И. (1945–2015) — Даниловских чтений, Екатеринбург, 10–14 декабря 2018 г. Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. С. 203–206. EDN CFYVKM.
- Иванов Э. С. 2012. Особенности моделирования режимов работы газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций магистрального транспорта газа в современных условиях эксплуатации // Нефтегазовое дело. № 5. С. 99–123. EDN RLOAKH.
- Иноземцев Д. А., Бунякин А. В., Дунаев В. И. 2025. Моделирование течения в тракте газотурбинного двигателя для диагностирования его технического состояния // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 11. № 3 (43). С. 130–146. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2025-11-3-130-146>
- Кампсти Н. 2000. Аэродинамика компрессоров / пер. с англ. М.: Мир. 688 с.
- Кривошеев И. А., Рожков К. Е., Симонов Н. Б. 2017. Применение метода параметрической диагностики с использованием комплексных показателей для оценки состояния газотурбинного привода в составе газоперекачивающего агрегата // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. № 3 (50). С. 46–57.
- Лефевр А. 1986. Процессы в камерах сгорания ГТД / пер. с англ. М.: Мир. 566 с.
- Перевощиков С. И. 2014. Диагностика газотурбинных двигателей по их эффективной мощности // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. № 3. С. 112–121.
- Перевощиков С. И. 2019. Анализ методик параметрической диагностики технического состояния газотурбинных установок // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. № 1. С. 101–112.
- Прохоров Ю. В. (глав. ред.). 1988. Математический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия. 847 с.
- Разриндзатуву Ж. С., Гишваров А. С. 2017. Параметрическая диагностика одновального ГТД на основе нейросетевого моделирования рабочих процессов // Вестник УГАТУ. № 4 (78). С. 86–96.

- Смирнов Е. А., Толстихин Ю. Ю., Блинов Ф. В., Шишов А. В. 2018. Решение актуальных задач параметрической диагностики газоперекачивающих агрегатов ГТК-25ИР // Газовая промышленность. № 2 (764). С. 62–65. EDN YPOSAW.
- Стедьмах М. В., Кривошеев И. А., Горюнов И. М. 2015. Совершенствование методов технической диагностики газоперекачивающих агрегатов с авиационным газотурбинным приводом АЛ-31СТ(Н) // Современные проблемы науки и образования. № 1-1. С. 333. EDN VIDYBR.
- Струговец С. А., Кривошеев И. А., Галиулин Р. М., Камаева Р. Ф., Рожков К. Е. 2010. Разработка метода параметрической диагностики технического состояния ГТД на основе анализа эрозии лопаток и закономерностей протекания характеристик компрессора // Вестник УГАТУ. № 4 (39). С. 3–10.
- Чекардовский С. М., Демура М. Н. 2013. Параметрическая диагностика газоперекачивающего агрегата // Нефть и газ Западной Сибири: материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Тюменского индустриального института, Тюмень, 17 октября 2013 г. / отв. ред. О. А. Новоселов. Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет. Том 1. С. 117–120. EDN SYVJUH.
- Чичугин В. А., Носков С. В. 2011. Методика оперативной параметрической диагностики газоперекачивающего агрегата при эксплуатации. Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. № 5 (89). С. 62–70. EDN OQPKYF.

References

- Averyanov, A. B. (2006). Improvement of methods of parametric diagnostics of a high-pressure compressor. Civil Aviation High Technologies, (109), 85–89. EDN KPHFGL [In Russian]
- Bagerman, A. Z., Konopatova, A. V., Leonova, I. P., & Shitkov, V. N. (2015). From parametric diagnostics to prediction of gas-turbine engine lifecycle. Transactions of the Krylov Shipbuilding Research Institute, (89), 81–84. EDN JRZVWA. [In Russian]
- Bunyakin, A. V., & Torbeev, S. A. (2006). Diagnostics of the flow part of aviation gas-turbine engines using the example of the D-36 turbofan engine. Civil Aviation High Technologies, (109), 30–37. [In Russian]
- Galiullin, Z. T., & Leontiev, E. V. (1991). Intensification of the Main Gas Transport. Nedra. [In Russian]
- Gilyaziev, M. G., & Vasiliev, E. R. (2018). Parametric diagnostics of GPA-C-25 NK-RS gas pumping units. In Collection of Reports of the Expanded Meeting of the Scientific and Technical Council and the Council of Young Scientists and Specialists of Gazprom Transgaz Kazan LLC “New Directions of Innovation Activity at Gas Industry Enterprises” (pp. 30–38). KONVERT LLC. EDN YRPIIX. [In Russian]
- NK-12ST Engine: Operation and Maintenance Manual. 1984. Publishing House of the Kuibyshev Regional Committee of the CPSU. [In Russian]
- Zaslavsky, E. A., & Blinov, V. L. (2018). Parametric diagnostics and technical condition estimation of gas pumping units. In Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists dedicated to the memory of Prof. Danilov N. I. (1945–2015) — Danilovsky Readings “Energy and resource conservation. Energy supply. Non-traditional and renewable energy sources. Atomic Energy” (pp. 203–

- 206). Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin. EDN CFYBKM. [In Russian]
- Ivanov, E. S. (2012). Modeling details of the performance modes of gas transmittal units at gas transmission compressor stations in modern operational conditions. *Petroleum Engineering*, (5), 99–123. EDN RLOAKH. [In Russian]
- Inozemtsev D. A., Bunyakin A. V., & Dunaev V. I. (2025). Modeling of the flow in the gas turbine engine path for technical state diagnostics. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 11 (3), 130–146. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2025-11-3-130-146> [In Russian]
- Cumpsty, N. (2000). *Compressor Aerodynamics* (Transl. from English). Mir. [In Russian]
- Krivosheev, I. A., Rozhkov, K. E., & Simonov, N. B. (2017). Application of the parametric diagnostic method using complex indicators to assess the state of the gas turbine drive in the gas pumping unit. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, (3), 46–57. [In Russian]
- Lefebvre, A. (1986). *Processes in the Combustion Chambers of the Gas-Turbine Engine* (Transl. from English). Mir. [In Russian]
- Perevoshchikov, S. I. (2014). Diagnostics of gas turbine engines by their effective capacity. *Oil and Gas Studies*, (3), 112–121. [In Russian].
- Perevoshchikov, S. I. (2019). Analysis of methods for parametric diagnostics of technical condition of gas turbine units. *Oil and Gas Studies*, (1), 101–112. [In Russian]
- Prokhorov, Yu. V. (1988). *Mathematical Encyclopedic Dictionary*. Sov. Encyclopedia. [In Russian]
- Raherinjatovo, J. C., & Gishvarov, A. S. (2017). Parametric diagnostics of single-GTE on the basis of on neural network modeling workflows. *Vestnik USATU*, (4), 86–96. [In Russian]
- Smirnov, E. A., Tolstikhin, Yu. Yu., Blinov, F. V., & Shishov, A. V. (2018). Solution of the actual problems of parametric diagnostics of GTK-25IR gas compressor units. *Gas Industry*, (2), 62–65. EDN YPOSAW. [In Russian]
- Stelmakh, M. V., Krivosheev, I. A., & Goryunov, I. M. (2015). Perfecting methods of technical diagnostics of gas compressor plants with gas turbine drive AL-31ST(N). *Modern Problems of Science and Education*, (1-1), 333. EDN VIDYBR. [In Russian]
- Strugovets, S. A., Krivosheev, I. A., Galiulin, R. M., Kamaeva, R. F., & Rozhkov, K. E. (2010). Development of a method for parametric diagnostics of the technical condition of a gas turbine engine based on the analysis of blade erosion and patterns of compressor characteristics. *Vestnik USATU*, (4), 3–10. [In Russian].
- Chekardovsky, S. M., & Demura, M. N. (2013). Parametric diagnostics of a gas pumping unit. In O. A. Novoselov (Ed.), *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference Dedicated to the 50th Anniversary of the Tyumen Industrial Institute “Oil and Gas of Western Siberia”* (Vol. 1, pp. 117–120). Tyumen Industrial University. EDN SYVJUH. [In Russian]
- Chichugin, V. A., & Noskov, S. V. (2011). Method of on-line parametric diagnostics of a gas-pumping aggregate during its operation. *Oil and Gas Studies*, (5), 62–70. EDN OQPKYF. [In Russian]

Информация об авторах

Дмитрий Александрович Иноземцев, старший преподаватель, кафедра газонефтетранспортных систем и оборудования нефтяной и газовой промышленности, Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия
d.a.inozemtsev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3855-3204>

Алексей Вадимович Бунякин, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра нефтегазового дела, Майкопский государственный технологический университет, филиал в п. Яблоновский, Республика Адыгея, Россия
alex.bunyakina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1849-1667>

Владислав Игоревич Дунаев, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра газонефтетранспортных систем и оборудования нефтяной и газовой промышленности, Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия
dunayev1964@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4166-6808>

Information about the authors

Dmitry A. Inozemtsev, Senior Lecturer, Department of Gas and Oil Transportation Systems and Equipment of the Oil and Gas Industry, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia
d.a.inozemtsev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3855-3204>

Aleksei V. Bunyakin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Oil and Gas Industry, Maykop State Technological University, branch in Yablonovsky village, Republic of Adygea, Russia
alex.bunyakina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1849-1667>

Vladislav I. Dunaev, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Department of Gas and Oil Transportation Systems and Equipment of the Oil and Gas Industry, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia
dunayev1964@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4166-6808>