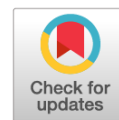


Оригинальное исследование

УДК 621.438

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_189

EDN: YPBHKS



Использование критериев подобия при анализе результатов натурных испытаний современных газотурбинных двигателей; введение мощностного параметра

П.Н. Коок¹, В.В. Поярков²¹ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия;² АО «Невский завод», Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. С усложнением газотурбинных установок получили распространение методы обработки результатов испытаний газотурбинных двигателей, основанные не на принципах подобия, а на использовании математических моделей газотурбинных двигателей и карт климатических характеристик. При этом сложилось мнение, что методы, основанные на приведенных параметрах, устарели или имеют ограниченное применение только для газотурбинных двигателей простейших конструкций. В настоящей работе показано, что выводы теории подобия режимов можно успешно применять для решения некоторых практических инженерных задач для современных газотурбинных установок.

Цель работы — рассмотреть возможность применения методов теории подобия для обработки результатов испытаний и анализа работы современных газотурбинных установок. Предложить модернизированные безразмерные комплексы.

Методы. Для анализа возможностей использования приведенных характеристик газотурбинных установок были выполнены соответствующие расчеты переменных режимов на разработанной и верифицированной по результатам натурных испытаний термодинамической модели газотурбинных установок со свободной силовой турбиной при различных температурах наружного воздуха.

Результаты. На основе расчетов переменных режимов на математической модели газотурбинных установок произведен анализ применимости существующих типовых приведенных характеристик газотурбинных установок и соответствующих безразмерных комплексов. Предложен модернизированный безразмерный комплекс — мощностной параметр, проиллюстрированы возможности его инженерного применения.

Выводы. На основании вариантных расчётов на математической модели газотурбинных установок показано, что на основе мощностного параметра можно представлять результаты испытаний при произвольных условиях в удобной представимой форме, даже если подобие режимов в традиционном виде не соблюдается. Применение мощностного параметра позволяет проводить непрерывную оценку номинальной мощности газотурбинных установок на произвольном фактическом режиме её работы в целях непрерывной диагностики технического состояния.

Ключевые слова: критерии подобия; мощностной параметр; испытания газотурбинных двигателей; газотурбинный двигатель; математическая модель; теория подобия; режимы работы газотурбинных установок.

Как цитировать

Коок П.Н., Поярков В.В. Использование критериев подобия при анализе результатов натурных испытаний современных газотурбинных двигателей; введение мощностного параметра // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 189–196. DOI: 10.52899/24141437_2025_02_189 EDN: YPBHKS

Original study article

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_189

EDN: YPBHKS

Similarity Tests Used to Analyze Field Tests of State-of-the-Art Gas Turbine Engines: Introducing Power Parameter

Petr N. Kook¹, Victor V. Poyarkov²¹ Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia;² JSC Nevsky Zavod, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: With the increasing complexity of gas turbine units, processing of gas turbine engine (GTE) test results have become a frequent practice. However, the methods are mostly based on mathematical GTE models and climatic reference maps rather than the principles of similarity. In this case, it is believed that that methods based on the specified parameters are outdated or their application is limited to only the simplest gas turbine engine designs. This paper shows that the similarity theory of modes can be successfully applied to solve some real-life engineering problems for state-of-the-art gas turbine units.

AIM: To consider application of similarity theory methods to process test results and analyze the operation of state-of-the-art gas turbine units and to propose advanced dimensionless groups.

METHODS: To analyze the possible use of the reduced gas turbine unit (GTU) parameters, we calculated the corresponding variable modes using a thermodynamic GTU model with a free power turbine developed and verified based on field tests at various outside air temperatures.

RESULTS: Calculations of variable modes based on a mathematical GTU model were used to analyze the applicability of existing standard reduced GTU parameters and the corresponding dimensionless groups. The authors propose an advanced dimensionless group (a power parameter) and show its possible engineering applications.

CONCLUSIONS: Variant calculations based on a mathematical GTU model show that it is possible to present the outcomes of tests in arbitrary conditions in a convenient representable form based on the power parameter, even if the conventional similarity of modes is not achieved. The power parameter allows for continuous testing of the rated GTU power in any actual operating mode for continuous monitoring of its status.

Keywords: similarity tests; power parameter; gas turbine engine tests; gas turbine engine; mathematical model; similarity theory; gas turbine operating modes.

To cite this article

Kook PN, Poyarkov VV. Similarity Tests Used to Analyze Field Tests of State-of-the-Art Gas Turbine Engines: Introducing Power Parameter. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):189–196. DOI: 10.52899/24141437_2025_02_189 EDN: YPBHKS

Submitted: 26.02.2025

Accepted: 03.04.2025

Published online: 30.06.2025

ВВЕДЕНИЕ

Параметры процессов, протекающих в элементах газотурбинных двигателей, работающих по разомкнутому циклу, существенным образом зависят от температуры и давления атмосферного воздуха. Номинальные показатели газотурбинных двигателей обычно приводятся для нормальных внешних условий по ГОСТ Р 52200-2004, или для других спецификационных условий, указываемых в договоре на поставку.

Однако, испытания двигателя приходится проводить при различных давлении и температуре атмосферного воздуха. Отсюда возникает необходимость применения соответствующей методики проведения испытаний ГТД и обработки их результатов.

В качестве основы для разработки таких методов используется теория подобия. Сущность её использования базируется на допущении существования подобных режимов при произвольных внешних условиях. Таким образом, при выполнении условий подобия опытные значения параметров можно пересчитать на номинальные (спецификационные) атмосферные условия.

Из теории подобия известно, что подобными являются процессы одной физической природы, имеющие подобные условия однозначности и равные одноименные определяющие критерии, то есть безразмерные комплексы, составленные из величин, входящих в условия однозначности.

С усложнением газотурбинных установок получили распространение методы обработки результатов испытаний ГТД, основанные не на принципах подобия, а на использовании математических моделей ГТД и карт климатических характеристик. При этом сложилось мнение, что методы, основанные на приведенных параметрах, устарели или имеют ограниченное применение только для ГТД простейших конструкций.

В настоящей работе будет показано, что выводы теории подобия режимов можно успешно применять для решения некоторых практических инженерных задач для современных газотурбинных установок.

ПРИВЕДЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОТУРБИНЫХ УСТАНОВОК

Из принципа подобия следует, что если одноименные критерии, подсчитанные по параметрам двух режимов работы двигателя, оказываются равными, то эти режимы подобны.

Подход к анализу ГТУ с определением приведенных параметров состоит в предположении, что любому режиму работы ГТУ при произвольной температуре наружного воздуха всегда найдется подобный ему режим при спецификационной температуре.

В сложившейся инженерной практике приведения параметров ГТУ к нормальным (спецификационным) условиям, согласно теории подобия, применяются следующие соотношения [1]:

$$N_e^{пр} = N_e \cdot \frac{P_{a_0}}{P_a} \cdot \sqrt{\frac{T_{1к_0}}{T_{1к}}}, \quad (1)$$

$$G_{тг}^{пр} = G_{тг} \cdot \frac{P_{a_0}}{P_a} \cdot \sqrt{\frac{T_{1к_0}}{T_{1к}}} \cdot \frac{(Q_M + h_{тг})}{Q_{M_0}}, \quad (2)$$

$$n^{пр} = n \cdot \sqrt{\frac{T_{1к_0}}{T_{1к}}}, \quad (3)$$

где N_e — мощность ГТУ на валу силовой турбины; $N_e^{пр}$ — приведенная мощность ГТУ на валу силовой турбины; $G_{тг}$ — расход топливного газа; $G_{тг}^{пр}$ — приведенный расход топливного газа; n — частота вращения роторов ГТУ; $n^{пр}$ — приведенная частота вращения роторов ГТУ; P_a — атмосферное давление; P_{a_0} — атмосферное давление при нормальных условиях, 101,3кПа; $T_{1к}$ — абсолютная температура воздуха на входе в ОК; $T_{1к_0}$ — температура воздуха на входе в ОК при нормальных условиях, 288,15 К; Q_M — массовая низшая теплота сгорания ТГ; $h_{тг}$ — относительная энтальпия ТГ; Q_{M_0} — массовая низшая теплота сгорания ТГ при нормальных условиях, 50 МДж/кг.

Для однозначного определения режима работы двигателя необходимо задать, в том числе, параметры состояния и физические свойства атмосферного воздуха, а также физические свойства рабочего тела во всех элементах двигателя, которые характеризуются газовой постоянной R , показателем адиабаты k , коэффициентами вязкости и теплопроводностью [2].

Одним из основных факторов, влияющих на параметры рабочего тела, является влажность атмосферного воздуха.

Так, в [3] показано, что расчет параметров ГТД по традиционным формулам приведения без учета влажности приводит к заметным погрешностям и может затруднить отладку двигателя.

Однако на практике учет изменения свойств рабочего тела осложнен тем, что рабочее тело в компрессоре и турбине ГТУ разные, и имеют разный характер зависимости их свойств от температуры.

В сложившейся инженерной практике при использовании приведенных характеристик ГТУ изменением свойств рабочего тела было принято пренебрегать. В настоящей работе используются приведенные параметры в традиционно принятой форме.

ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДОВ ПОДОБИЯ РЕЖИМОВ В ГАЗОТУРБИНЫХ УСТАНОВКАХ

Основными факторами, вызывающими искажения подобия режимов являются:

- изменение теплофизических свойств воздуха и продуктов сгорания;

- изменение зазоров в проточной части (изменение КПД ОК и турбины);
- положение поворотных лопаточных аппаратов компрессоров и турбин;
- отбор воздуха за ОК на ПОС или переменный отбор (сброс) воздуха на иные нужды ГТУ агрегата или станции.

Первые два фактора могут быть учтены введением соответствующих поправок к приведенным параметрам в зависимости от температуры наружного воздуха.

Учет влияния поворотных лопаточных венцов компрессоров и турбин зависит от конструкции ГТУ и программы регулирования.

Для режимов с отбором циклового воздуха требуется определение величины его расхода (измерение или расчетная оценка) и введение соответствующих поправок, позволяющих привести параметры режима с отбором к условиям без отбора воздуха.

Вместе с тем необходимо отметить, что искажения условий подобия, вносимые перечисленными выше факторами, не означают исключения возможности использования характеристик ГТУ, построенных в приведенных параметрах. Такие искажения по-разному влияют на изменение (расслоение) различных приведенных характеристик ГТУ (некоторые расслаиваются сильнее, некоторые слабее). И при введении необходимых корректирующих поправок отдельные приведенные характеристики вполне могут применяться в практических целях с приемлемыми погрешностями.

АНАЛИЗ ТИПОВЫХ ПРИВЕДЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Для анализа возможностей использования приведенных характеристик ГТУ были выполнены соответствующие

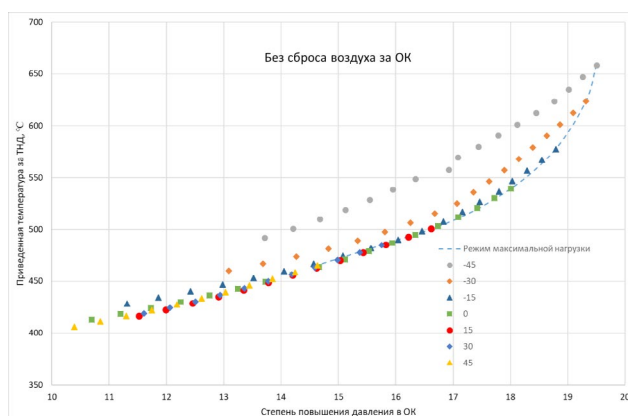


Рис. 1. Зависимость приведенной температуры за ТНД от степени повышения давления ОК (без сброса воздуха за ОК).

Fig. 1. Relationship between the reduced temperature past the low pressure turbine (LPT) and the degree of the axial compressor (AC) pressure increase (without air discharge past the AC).

расчеты переменных режимов на разработанной и верифицированной по результатам натурных испытаний термодинамической модели ГТУ со свободной силовой турбиной при различных температурах наружного воздуха.

В расчетах учитывалось изменение теплофизических свойств воздуха и продуктов сгорания. Влияние нарушения геометрического подобия (тепловых расширений) не учитывалось.

Расчеты были выполнены для двух возможных вариантов работы ГТУ: без сброса циклового воздуха после осевого компрессора, и с переменным сбросом циклового воздуха за осевым компрессором, в зависимости от режима работы ГТУ, согласно штатному алгоритму САУ.

В соответствии с широко распространенной практикой для построения приведенных характеристик ГТУ в качестве аргумента выбрана степень повышения давления в ОК. На рис. 1 показана зависимость приведенной температуры за ТНД от степени сжатия ОК для случая без сброса воздуха за осевым компрессором.

На рис. 2 показана зависимость приведенной температуры за ТНД от степени сжатия ОК при наличии сброса воздуха за осевым компрессором.

Из рис. 1, 2 видно, что без сброса воздуха за ОК и положительных температурах наружного воздуха точки практически точно ложатся на одну кривую (расслоение составляет примерно $\pm 1^\circ\text{C}$). Но при низких температурах расслоение становится уже очень существенным.

А при работе ГТД со штатным сбросом воздуха за ОК говорить о какой-либо единой приведенной характеристике вообще не приходится.

ВВЕДЕНИЕ МОЩНОСТНОГО ПАРАМЕТРА

В практике Невского завода для определения мощности ГПА в условиях эксплуатации широко использовались

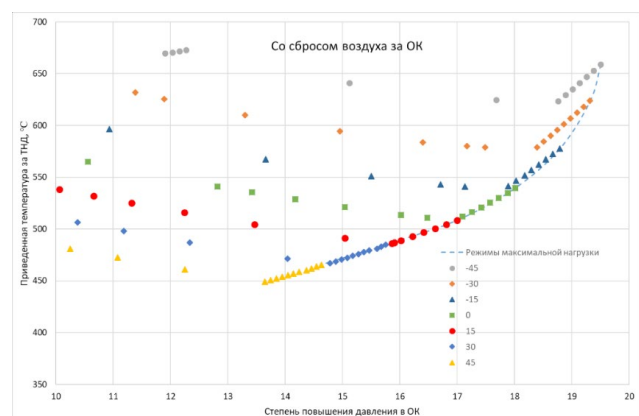


Рис. 2. Зависимость приведенной температуры за ТНД от степени повышения давления ОК (со сбросом воздуха за ОК).

Fig. 2. Relationship between the reduced temperature past the low pressure turbine (LPT) and the degree of the axial compressor (AC) pressure increase (with air discharge past the AC).

мощностные характеристики ГТУ, построенные на базе, так называемого, мощностного параметра [5]:

$$\frac{N_e}{P_{2\text{ТНД}} \cdot \sqrt{T_{2\text{ТНД}}}} = f(\pi_T).$$

Из баланса мощностей по турбине низкого давления (силовой турбине) вытекает следующее соотношение:

$$\frac{N_e}{P_{2\text{ТНД}} \cdot \sqrt{T_{2\text{ТНД}}}} = \left(\frac{G_{1\text{ТНД}} \cdot \sqrt{T_{1\text{ТНД}}}}{P_{1\text{ТНД}}} \right)^{1 + \frac{k_{\text{ТНД}} - 1}{2k_{\text{ТНД}}} \cdot \eta_{\text{ТНД}}^{\text{пол}}} \times$$

$$\times \kappa_{\text{Р ТНД}} \cdot \left(1 - \pi_{\text{ТНД}}^{\frac{k_{\text{ТНД}} - 1}{k_{\text{ТНД}}}} \right) \cdot \eta_{\text{ТНД}}.$$

Поскольку расходный параметр ТНД является практически однозначной функцией степени понижения давления в ТНД, получается, что мощностной параметр турбины является функцией степени расширения ТНД с точностью до изменения КПД ТНД. А степень понижения давления в ТНД в свою очередь является практически однозначной функцией степени понижения давления во всей турбине. При этом, если рассматривать ГТУ с простым выхлопом (без дополнительных теплообменников), то допустимо в качестве аргумента в мощностной характеристике использовать степень повышения давления в цикле ГТД, определенного как отношение абсолютного давления за ОК к атмосферному давлению.

Так, в настоящей работе рассмотрен мощностной параметр турбины как функция степени повышения давления $\frac{P_{2\text{К}}}{P_{\text{атм}}}$:

$$\frac{N_e}{P_{\text{атм}} \cdot \sqrt{T_{2\text{ТНД}}}} = f(\pi_K). \tag{7}$$

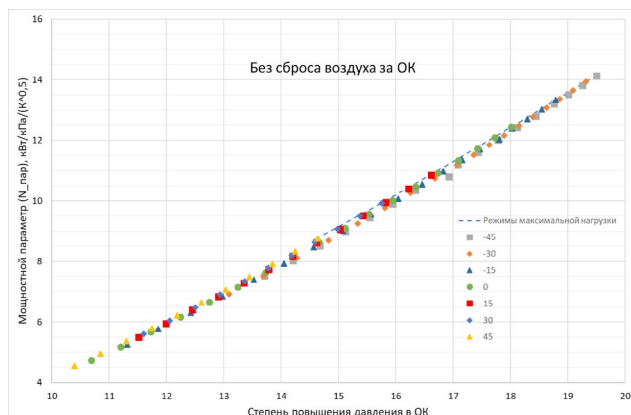


Рис. 3. Зависимость мощностного параметра от степени повышения давления при переменных оборотах ТНД ($\text{КПД}_{\text{ТНД}} \approx \text{const}$).
Fig. 3. Relationship between the power parameter and the degree of pressure increase at variable LPT speeds ($\text{КПД}_{\text{ТНД}} \approx \text{const}$).

В исходной методике [5] формула расчета мощностного параметра не учитывала влияние изменения оборотов ТНД $n_{\text{ТНД}}$. Это в некоторой степени справедливо для реальных условий работы нагнетателя на линейной компрессорной станции, когда можно предположить примерно кубическую зависимость мощности нагнетателя от оборотов $N \sim n^3$, а следовательно $\frac{u}{c_0} \approx \text{const}$, а значит изменением КПД ТНД можно пренебречь.

На основе серии расчетов, проведенных на математической модели ГТУ, получена зависимость мощностного параметра, посчитанного по (7), от степени повышения давления (рис. 3).

Как видно из рис. 3, полученная зависимость мощностного параметра турбины от степени повышения давления оказалась устойчивой к внешним возмущениям.

На практике соотношение $N \sim n^3$ выполняется далеко не всегда, например, в условиях работы приводимого компрессора на ГПЗ. В реальных условиях эксплуатации КПД ТНД не является постоянной величиной, а меняется на режимах в соответствии с изменением параметра u/c ТНД.

Для того чтобы показать влияние учета изменения КПД ТНД на зависимость мощностного параметра турбины от степени повышения давления в ОК были проведены серии расчетов на математической модели ГТУ. При этом частота вращения ТНД была принята постоянной (номинальной), что приводило к изменению параметра u/c ТНД, а соответственно и КПД ТНД, при изменении режима работы ГТУ.

На рис. 4 представлена зависимость мощностного параметра от степени повышения давления при постоянных оборотах ТНД.

Из рис. 4 видно, что зависимость мощностного параметра от степени повышения давления при постоянных оборотах ТНД начинает существенно расслаиваться. Среднеквадратичное отклонение разброса точек относительно средней линии составляет 2,5%.

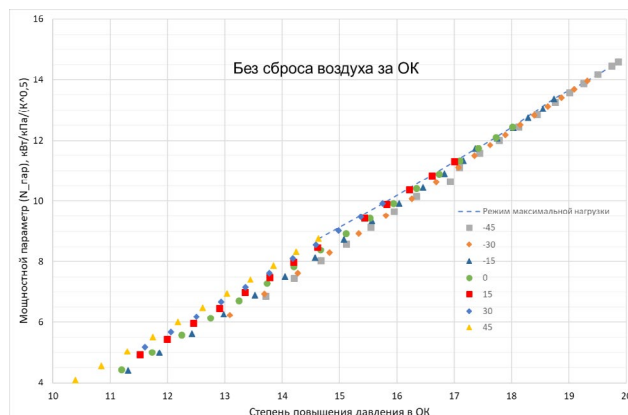


Рис. 4. Зависимость мощностного параметра от степени повышения давления ОК при фиксированных оборотах ТНД ($\text{КПД}_{\text{ТНД}} \neq \text{const}$).
Fig. 4. Relationship between the power parameter and the degree of AC pressure increase at fixed LPT speeds ($\text{КПД}_{\text{ТНД}} \neq \text{const}$).

Мощностной параметр с поправкой на обороты ТНД

Для учета изменения КПД ТНД при определении мощностного параметра турбины, например, при анализе результатов испытаний, предлагается ввести соответствующую поправку:

$$\vartheta_{n_{\text{ТНД}}} = 1 + \alpha \cdot \delta n_{\text{ТНД}}^{\beta}.$$

Величина поправки $\vartheta_{n_{\text{ТНД}}}$ зависит от отклонения фактической частоты вращения ТНД от оптимальной для данного режима работы ГТУ.

Как правило, ТНД ГТУ проектируется так, чтобы номинальная частота вращения находилась вблизи оптимума КПД, поэтому оптимальную частоту вращения на переменных режимах приблизительно можно оценить из следующего соотношения:

$$n_{\text{ТНД}}^{\text{пр}} \approx n_{\text{ТНД}}^{\text{ном}} \cdot \sqrt[3]{\frac{N_e^{\text{пр}}}{N_e^{\text{ном}}}}.$$

Переменный сброс воздуха за ОК на частичных режимах приводит к относительному повышению располагаемого теплоперепада в ТНД примерно пропорционально доле сбрасываемого воздуха $\delta H_0^{\text{ТНД}} \sim \delta G_{\text{сброс}}$.

С учетом данного обстоятельства оптимальная частота вращения ТНД на частичных режимах рассчитывалась по следующему уравнению:

$$n_{\text{ТНД}}^{\text{опт}} = n_{\text{ТНД}}^{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{T_{1\text{К}}}{T_{1\text{К}0}}} \cdot \sqrt[3]{\frac{N_e^{\text{пр}}}{N_e^{\text{ном}}}} \cdot \sqrt{1 + \delta G_{\text{сброс}}}.$$

По результатам численного анализа на математической модели получены следующие значения коэффициентов: $\alpha=1,3$, $\beta=2$.

Как видно из рис. 5, введение предложенной поправки на обороты ТНД значительно уменьшает разброс точек,

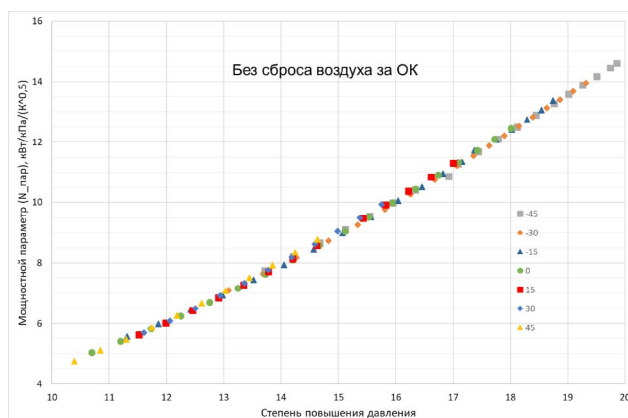


Рис. 5. Зависимость мощностного параметра с поправкой $\vartheta_{n_{\text{ТНД}}}$ от степени повышения давления.

Fig. 5. Relationship between the adjusted power parameter $\vartheta_{n_{\text{ТНД}}}$ and the degree of pressure increase.

все они ложатся на одну линию. Среднеквадратичное отклонение разброса точек относительно средней линии составляет 0,6%.

ИЛЛЮСТРАЦИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОЩНОСТНОГО ПАРАМЕТРА

При рассмотрении мощностного параметра в [4] отмечалось, что он существенным образом зависит от состояния проточной части, изменения КПД компрессора, расходной характеристики турбины.

Однако, исследования на модели показали, что мощностной параметр, особенно с внесением корректирующих поправок, оказался устойчив не только к внешним условиям, но и к изменению КПД проточных частей компрессора и турбин, а также к переменному сбросу воздуха за ОК. Это обстоятельство позволяет использовать подходы теории подобия и мощностной параметр для практических инженерных целей при испытаниях и диагностики ГТУ.

Целесообразность описанного подхода можно продемонстрировать на математической модели ГТУ. В табл. 1 представлены основные параметры ГТУ, полученные на трех произвольно выбранных режимах работы при произвольно выбранной температуре наружного воздуха -17°C .

Режим 1 — режим полной нагрузки, режим 2 — частичный режим, режим 3 — частичный режим, при котором был намеренно заметно снижен КПД осевого компрессора.

Рассмотренные произвольные режимы не являются подобными — они имеют разное значение угла входного направляющего аппарата ОК, а также различную величину сброса воздуха за ОК. На режиме 3 принудительно занижен КПД осевого компрессора.

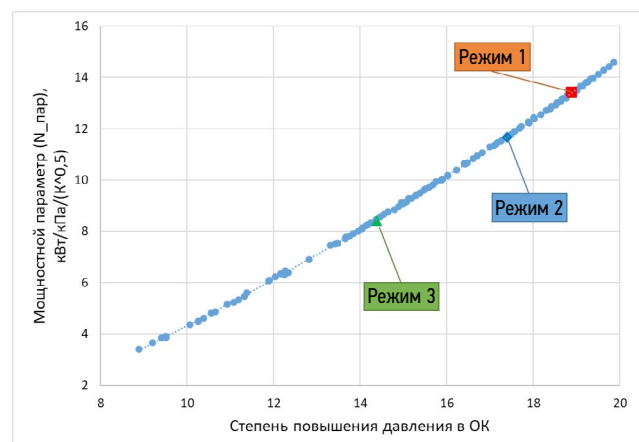


Рис. 6. Зависимость мощностного параметра на произвольных режимах ГТУ от степени повышения давления в ОК.

Fig. 6. Relationship between the power parameter at arbitrary GTU modes and the degree of AC pressure increase.

Таблица 1. Основные параметры ГТУ на произвольных режимах

Table 1. Main GTU parameters in arbitrary modes

Номер режима	1	2	3
Температура перед ОК, °С	–17	–17	–17
Температура перед ТВД, °С	1204	1124	1124
Положение ВНА ОК, град	2,7	0,6	–11,4
КПД ОК, %	79,2	82,4	78
Степень повышения давления ОК	18,9	17,4	14,4
Относительный обороты ТНД, %	105,5	99,9	90,1
Мощность на валу ТНД, МВт	37,5	31,9	23,4
Сброс воздуха за ОК, кг/с	0	1,8	4,6
Мощностной параметр, кВт/кПа/К ^{0.5}	13,4	11,7	8,4

Представленные в табл. 1 значения мощностного параметра и степени повышения давления в ОК для режимов 1–3 нанесены на график (рис. 6). На этот же график нанесены все точки (зависимости мощностного параметра от степени повышения давления в ОК), полученные на математической модели ГТУ в широком диапазоне температур наружного воздуха и режимов работы, с учетом поправки на частоту вращения ТНД.

Как видно из рис. 6, несмотря на сильные отличия рассмотренных режимов (изменение режима работы, изменение КПД осевого компрессора), зависимость мощностного параметра от степени повышения давления в ОК для этих режимов с высокой точностью ложится на одну линию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе рассчитанного мощностного параметра можно проводить оценку мощности ГТУ, когда нет других средств измерения, а также использовать как альтернативное средство контроля корректности определения мощности по крутящему моменту (ИКМ) или по нагнетателю.

Применение методик на основе мощностного параметра позволяет представлять результаты испытаний при произвольных условиях в удобной представимой форме, даже если подобие режимов в традиционном виде не соблюдается.

На основе этого можно, в том числе, проводить непрерывную оценку номинальной мощности ГТУ на

произвольном фактическом режиме её работы в целях непрерывной диагностики технического состояния.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. П.Н. Коок — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, создание изображений; В.В. Поярков — редактирование текста рукописи, экспертная оценка, утверждение финальной версии. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Источники финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

ADDITIONAL INFO

Author contributions: P.N. Kook: investigation, writing—original draft, visualization; V.V. Poyarkov: writing—review & editing. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Funding sources: The study was not supported by any external sources.

Disclosure of interests: The authors have no explicit or potential conflicts of interests associated with the publication of this article.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по проведению теплотехнических и газодинамических расчетов при испытаниях газотурбинных газоперекачивающих агрегатов. М.: ВНИИГАЗ, 1999.
2. Дондошанский В.К., Дергач В.Ф., Либенсон М.Н. Расчет и испытание проточной части газотурбинного двигателя. М.: Машиностроение, 1972.
3. Горюнов И.М. Оценка влияния влагосодержания воздуха на параметры ГТД // Вестник самарского государственного аэрокосмического университета им. ак. С.П. Королёва. 2006. № 2-1(10). С. 154–156. EDN: IPJAMP
4. Корневский Л.Г. Газотурбинный агрегат ГТК-10 Определение эффективной мощности газотурбинной установки в эксплуатационных условиях. Л.: Производственное объединение «Невский завод» имени В.И. Ленина, Научно-исследовательский конструкторско-технологический институт, 1979.
5. Методика по определению мощности газотурбинных установок ГТ-700-5, ГТ-750-6, ГТК-10 в эксплуатационных условиях на компрессорных станциях ТМ-3/40-69. Работа № 806. НЗЛ; 1969.

REFERENCES

1. *Guidelines for conducting heat engineering and gas dynamic calculations during testing of gas turbine gas pumping units.* Moscow: VNIIGAZ; 1999. (In Russ.)
2. Dondoshansky VK, Dergach VF, Libenson MN. *Calculation and testing of the flow path of a gas turbine engine.* Moscow: Mashinostroenie, 1972. (In Russ.)
3. Goryunov IM. Assessment of the influence of air moisture content on GTE parameters // *Bulletin of the Samara State Aerospace University named after ac. S.P. Korolev.* 2006;2-1(10):154–156. (In Russ.) EDN: IPJAMP
4. Korenevsky LG. *Gas turbine unit GTK-10 Determination of the effective power of a gas turbine plant under operating conditions.* Leningrad: Production Association "Nevsky Plant" named after V.I. Lenin, Research Design and Technology Institute; 1979. (In Russ.)
5. Methodology for determining the capacity of gas turbine units GT-700-5, GT-750-6, GTK-10 under operating conditions at compressor stations TM-3/40-69. Work No. 806. NZL. 1969. (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

***Петр Николаевич Коок**, аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3; eLibrary SPIN: 2920-9076; e-mail: peter.kook@yandex.ru

Виктор Викторович Поярков, главный специалист, АО «Невский завод»; e-mail: v-poyarkov@yandex.ru

AUTHORS' INFO

***Petr N. Kook**, Postgraduate Student, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, 190121, Russia; eLibrary SPIN: 2920-9076; e-mail: peter.kook@yandex.ru

Victor V. Poyarkov, Chief Officer, JSC Nevsky Zavod; e-mail: v-poyarkov@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author