

УДК 621.452.3

**Ф.Г. СОРОГИН**

*АО «Мотор Сич», Украина*

## **МЕТОД РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГТП**

*Газотурбинные приводы (ГТП) широко используются в составе различных энергетических установок и в различных климатических зонах. Обоснованный выбор типа ГТП определяет необходимость детального учета его энергетических показателей в конкретных условиях эксплуатации энергоустановки. Подобная задача возникает и для конкретного типа ГТП при анализе вариантов модернизации энергоустановки. Для ее решения целесообразно использовать достаточно простой метод расчета энергетических показателей ГТП в целом, пригодный во всем возможном диапазоне режимов работы. При этом время расчета основных параметров ГТП должно быть минимальным, а метод универсальным с точки зрения возможности применения для других ГТП. Такой метод сформирован в данной работе на основе базовых характеристик, предоставляемых производителем при поставке ГТП.*

**Ключевые слова:** газотурбинный привод, климатическая характеристика, частичная нагрузка, энергетическая эффективность.

### **Введение**

Широкое использование ГТП в энергетике и нефтегазовой отрасли определяется не только их высокой удельной мощностью и маневренностью, но также экономичностью и низкой удельной стоимостью, эксплуатационной надежностью и развитой службой сервиса [1]. Выбор ГТП зачастую определяется назначением, режимом работы и регионом эксплуатации энергоустановки. Последнее обусловлено снижением мощности ГТП с ростом температуры атмосферного воздуха в связи с ограничениями по температуре газа перед турбиной [2, 3].

Наряду с производством механической работы в установках с ГТП часто используется выработка тепловой энергии за счет утилизации теплоты выхлопных газов. Поэтому в числе основных энергетических показателей газотурбинной энергоустановки рассматриваются механическая и тепловая мощность, эффективный КПД (при производстве механической работы) и коэффициент использования топлива. При реализации процедуры выбора ГТП разработчики энергоустановки используют, как правило, набор характеристик ГТП в целом [4].

### **Постановка задачи**

Эти характеристики зачастую представляют обобщение результатов испытаний ГТП в конкретных условиях и в этом смысле не дают целостную модель рабочего процесса ГТП во всем возможном диапазоне режимов работы. Такая модель необходима, в частности, для оценки термоэкономической эффективности любой теплоэнергетической установки, вари-

антов ее комплектации и модернизации, например, путем охлаждения циклового воздуха [5]. Модель должна быть максимально простой, чтобы обеспечивать малое время расчета основных параметров ГТП, но в то же время универсальной с точки зрения возможности применения для других ГТП. И, главное, она должна учитывать количественное влияние на рабочий процесс ГТП всех факторов, возникающих при эксплуатации.

Нелинейная поузловая математическая модель ГТД [6] опирается на описание рабочего процесса в его элементах и позволяет получить не только характеристики ГТП в целом, но и параметры рабочего тела в его проточной части. Однако для ее реализации необходим значительный объем исходных данных по элементам ГТП, которые разработчиком при поставке привода не передаются.

**Целью** данного исследования является разработка метода расчета энергетических параметров ГТП на основе базовых характеристик, предоставляемых производителем при поставке, который учитывает количественное влияние на рабочий процесс ГТП всех факторов, возникающих при его работе в составе энергоустановки, в том числе на режимах с частичной нагрузкой. В числе этих факторов температура и давление воздуха на входе ГТП, отбор воздуха от компрессора, гидросопротивление на выхлопе.

### **Основная часть**

Для ГТП параметрами, определяющими его максимальную мощность и эффективный КПД, являются температура и давление воздуха на входе, противодействие со стороны газоот-

водящего тракта, а также расход и параметры отбираемого от компрессора воздуха. Все эти факторы количественно учитываются характеристиками ГТП, зависящими от его типа и закона регулирования.

Аппроксимация климатической характеристики ГТП АИ-336-2-8 (рис. 1) для стандартного атмосферного давления при отсутствии внешних отборов воздуха и гидروطерь на входе и выхлопе [4] дает для мощности в кВт при температуре выше 15 °С:

$$N_{ГТП0} = 9071,45 - 71,43t_0, \quad (1)$$

для эффективного КПД в процентах относительно атмосферной температуры  $t_0$  в °С:

$$\eta_{ГТП0} = 31,5 - 0,0253t_0 - 4,03 \cdot 10^{-4} t_0^2 - 5,97 \cdot 10^{-6} t_0^3 \quad (2)$$

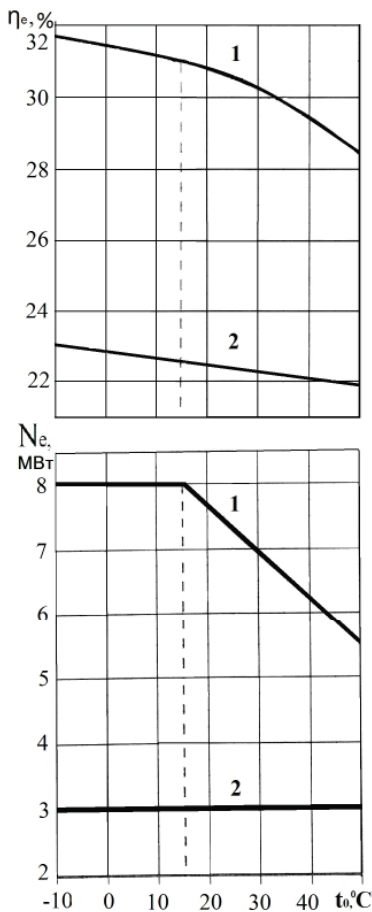


Рис. 1. Климатическая характеристика ГТП

При стандартных атмосферных условиях эффективный КПД составляет 31%, номинальная мощность 8000 кВт (линии 1 на рис. 1). Минимальная мощность этого ГТП 3 МВт (линии 2 на рис. 1).

Подобный характер имеют эти зависимости и для других ГТП семейства Д-336 и АИ-336.

Максимальная мощность при температурах окружающей среды (ОС) выше 15 °С снижается в связи с ограничением температуры газа перед ТВД. При фиксированной мощности ГТП обороты свободной турбины оказывают незначительное влияние на КПД и в задачах анализа термоэкономических показателей установок могут не рассматриваться.

В случае работы ГТП на частичных режимах эффективный КПД снижается. Данные испытаний приводятся, как правило, для параметров ISO. Их аппроксимация для ГТП АИ-336-2-8 дает:

$$\bar{\eta}_e = 0,361 + 1,21\bar{N}_e - 0,571\bar{N}_e^2, \quad (3)$$

где относительные КПД  $\bar{\eta}_e$  и мощность  $\bar{N}_e$  определяются путем деления на соответствующую величину при номинальном режиме.

При других температурах воздуха на входе определить эффективный КПД ГТП на частичных режимах можно, используя параметры продуктов сгорания (ПС), данные о которых практически всегда присутствуют среди базовых характеристик ГТП в связи с широким использованием когенерационных схем. Температура  $T_{ПС}$  и расход  $G_{ПС}$  продуктов сгорания зависят от двух аргументов – температуры воздуха на входе и мощности ГТП (рис. 2).

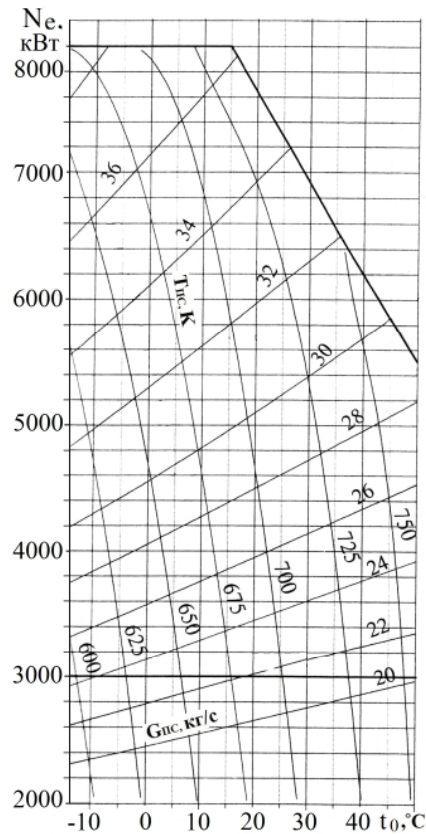


Рис. 2. Расход и температура продуктов сгорания

Эти двухпараметрические функции для ГТП АИ-336-2-8 при отсутствии потерь в газозвоздушном тракте аппроксимировались полиномом вида:

$$Y = C_1 + C_2 \cdot N_e + C_3 \cdot t_0 + C_4 \cdot N_e \cdot t_0 + C_5 \cdot N_e^2 + C_6 \cdot t_0^2 + C_7 \cdot N_e^2 \cdot t_0 + C_8 \cdot N_e \cdot t_0^2 + C_9 \cdot N_e^3 + C_{10} \cdot t_0^3 \quad (4)$$

При использовании температуры в градусах Цельсия и мощности в МВт коэффициенты для температуры продуктов сгорания  $T_{ПС}$ , К:

$$C_1 = 535,3; C_2 = 50,71; C_3 = 5,202; C_4 = -0,7084;$$

$$C_5 = -8,257; C_6 = -0,05146; C_7 = 0,04792; C_8 = 4,07110 \cdot 10^{-3}; C_9 = 0,5710; C_{10} = 3,88510 \cdot 10^{-4};$$

для расхода продуктов сгорания  $G_{ПС}$ , кг/с:  
 $C_1 = -0,4953; C_2 = 10,97; C_3 = -0,01748; C_4 = -0,02552; C_5 = -1,168; C_6 = 0,355810 \cdot 10^{-3}; C_7 = 0,229010 \cdot 10^{-2};$

$$C_8 = -0,1125 \cdot 10^{-4}; C_9 = 0,04843; C_{10} = -0,108910 \cdot 10^{-5}.$$

Другие параметры получим, решая систему уравнений, базирующуюся на законах сохранения массы и энергии для ГТП в целом. С учетом тепловых потерь  $Q_{OC}$  в окружающую среду она имеет вид:

$$G_0 i_{B0} + G_{ТГ} (H_{ТГ} + i_{ТГ}) = G_{ПС} i_{ПС} + N_e + Q_{OC}, \quad (5)$$

$$G_0 + G_{ТГ} = G_{ПС}, \quad (6)$$

$$\eta_e = \frac{N_e}{G_{ТГ} H_{ТГ}}. \quad (7)$$

Учитывая незначительную долю топлива и пренебрегая отличием теплоемкости продуктов сгорания и воздуха, для расчета подведенной теплоты получим выражение

$$G_{ТГ} H_{ТГ} = G_{ПС} c_{pB} (t_{ПС} - t_0) + N_e + Q_{OC} \quad (8)$$

При заданной мощности ГТП расход воздуха на входе в ГТП:

$$G_0 = G_{ПС} - \frac{N_e}{\eta_e H_{ТГ}}. \quad (9)$$

В приведенных уравнениях  $N_e, \eta_e$  - мощность и КПД ГТП;  $H_{ТГ}$  - теплотворная способность топлива. Для природного газа, используемого в запорожском регионе, она составляет около 47,8 МДж/кг. Тогда при параметрах ISO расход природного газа для ГТП АИ-336-2-8 составляет около 0,54 кг/с или менее 1,5% расхода продуктов сгорания.

Таким образом, при заданной мощности ГТП и температуре воздуха на его входе для

расчета эффективного КПД и расхода циклового воздуха на частичных режимах работы необходимы значения тепловых потерь  $Q_{OC}$  в окружающую среду. Эти данные можно получить для режимов, где представлены значения эффективного КПД, решая систему уравнений (4), (7) и (8). Выполненные расчеты показали, что для ГТП АИ-336-2-8 эти тепловые потери в рабочем диапазоне мощностей могут быть приняты постоянными.

Наилучшие результаты при аппроксимации имеющихся экспериментальных данных по КПД получены для значения тепловых потерь 1080 кВт. В этом случае среднеквадратичное отклонение КПД, рассчитанного на основе параметров продуктов сгорания (4), от экспериментальных данных составляет менее 0,2%, а максимальное 0,37% абсолютных.

Вклад гидравлических потерь на входе и выхлопе ГТП характеризуется снижением мощности и эффективного КПД относительно режима без таковых. Для ГТП АИ-336-2-8 снижение мощности, приходящееся на 981 Па гидравлических потерь на входе в ГТП, аппроксимируется полиномом:

$$\Delta N_{ВХ} = 54,52 + 0,01285 N_0 - 3,08 \cdot 10^{-7} \cdot N_0^2 \quad (10)$$

Снижение мощности, приходящееся на 981 Па гидравлических потерь в выхлопном тракте ГТП АИ-336-2-8, аппроксимируется полиномом:

$$\Delta N_{ВЫХ} = 50,0 + 0,00379 N_0 - 1,7857 \cdot 10^{-7} \cdot N_0^2, \quad (11)$$

Мощность и ее снижение даны в киловаттах.

Уменьшение эффективного КПД в абсолютных процентах, приходящееся на 981 Па гидравлических потерь, представлено для входа и выхлопа ГТП АИ-336-2-8 единой зависимостью, которая аппроксимируется полиномом:

$$\Delta \eta_{ВХ} = 0,5533 - 7,1083 \cdot 10^{-5} \cdot N_0 + 4,0015 \cdot 10^{-9} \cdot N_0^2. \quad (12)$$

В приведенных соотношениях  $N_0$  отвечает мощности ГТП без гиросотерь в газозвоздушном тракте и отборов воздуха от компрессора.

Снижение мощности и эффективного КПД зависит не только от расхода отбираемого воздуха, но и от места отбора. Из существующих наиболее подходящим в ГТП АИ-336-2-8 является отбор воздуха для противообледенительной системы. При отборе до 0,5 кг/с воздуха зависимость для снижения мощности в кВт определяется как:

$$\Delta N_{DG} = -390 \cdot \Delta G, \quad (13)$$

а снижение КПД в абсолютных процентах как:

$$\Delta\eta_{DG} = -1,4 \cdot \Delta G. \quad (14)$$

Представленные результаты дают возможность сформировать целостную модель рабочего процесса ГТП, позволяющую, во-первых, определить параметры, необходимые для его интеграции с другими элементами энергоустановки и, во-вторых, учесть их влияние на показатели ГТП. Из параметров циклового воздуха на входе для расчета характеристик ГТП на режиме максимальной мощности (см. рис. 1) используется только его температура. По ее величине определяются значения мощности (1) и эффективного КПД (2) базового (без гидрпотерь и отборов) ГТП. Расход и температура продуктов сгорания определяются аппроксимациями (4). Потребляемая элементами энергоустановки суммарная мощность при температурах выше 15 °С не должна превышать максимальную.

На режимах с частичной нагрузкой по заданным значениям температуры атмосферного воздуха и мощности ГТП находятся параметры продуктов сгорания (4). Далее при известной теплотворной способности топлива из соотношений (7), (8) и (9) рассчитываются эффективный КПД, расходы топливного газа и циклового воздуха на входе.

Для полученных значений расходов определяются гидравлические потери на входе и выхлопе, позволяющие скорректировать мощность и КПД на основе соотношений (10)..(12). При наличии отборов воздуха от компрессора ГТП дополнительные потери определяются соотношениями (13), (14).

Рассмотренный метод расчета параметров ГТП на режимах частичного нагружения применим и при работе на максимальной мощности. Но в этом случае следует учитывать ее ограничение (1) при высоких температурах, которое не вытекает из данных (4) по параметрам продуктов сгорания.

### Заключение

В ГТП параметрами, определяющими его максимальную мощность и эффективный КПД, являются температура и давление воздуха на входе, противодавление на выходе со стороны газоотводящего тракта, а также расход и параметры отбираемого от компрессора воздуха. Базовые характеристики, предоставляемые производителем ГТП при его поставке, позволяют учесть соответствующие факторы и определить эти энергетические показатели.

Однако для их расчета на режимах частичной нагрузки нужны дополнительные характери-

сти. В работе для этого используются данные по расходу и температуре продуктов сгорания. Предложенный метод объединяет эти характеристики с базовой климатической характеристикой ГТП, полученной для стандартного атмосферного давления при отсутствии внешних отборов воздуха и гидрпотерь на входе и выхлопе за счет аппроксимации значений тепловых потерь в окружающую среду.

При использовании постоянного значения тепловых потерь среднеквадратичная погрешность расчетного и экспериментального значений эффективного КПД не превышает 0,2% абсолютных. Ее уменьшение возможно при более детальном анализе закономерностей изменения тепловых потерь от мощности ГТП и температуры атмосферного воздуха.

Разработанный метод расчета энергетических параметров ГТП на основе базовых характеристик, предоставляемых производителем при поставке, учитывает влияние на рабочий процесс ГТП всех факторов, возникающих при его работе в составе энергоустановки, в том числе на режимах с частичной нагрузкой. Простота и достаточная точность алгоритма позволяют использовать разработанный подход при оптимизации энергоустановок с ГТП и режимов их работы при детальном учете условий эксплуатации, в том числе климатических.

### Литература

1. Халатов А.А. Современное состояние и перспективы использования газотурбинных технологий в тепловой и ядерной энергетике, металлургии и ЖКХ Украины [Текст] / А. А. Халатов, К. А. Ющенко // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т. 35, № 1. – С. 18-29.
2. Анализ эффективности ГТП Д-336-2 с распылительной системой охлаждения циклового воздуха [Текст] / Ф. Г. Сорогин, Ю. Ф. Басов, П. Д. Жеманюк и др. // Газотурбинные технологии. – 2011. – №9. – С. 24-27.
3. Епифанов С. В. Развитие принципов конвертирования авиационных ГТД с целью создания на их основе промышленного газотурбинного привода [Текст] / С. В. Епифанов, П. Д. Жеманюк, В. П. Парафейник, И. И. Петухов // Вестник двигателестроения. – 2007. – №3. – С. 70-76.
4. 3380000000-06 ТУД - Технические условия на изготовление, приемку и поставку. Газотурбинный привод АИ-336-2-8. – 1997. – 42 с.
5. Сорогин Ф. Г. К вопросу комплексной оценки эффективности ГТП с охлаждением циклового воздуха [Текст] / Ф. Г. Сорогин, П. Д. Жеманюк, В. П. Трофимов, Ю. В. Шахов, И. И. Петухов // Авиационно-космическая

техника и технология – 2016. – № 4(131). – С.25-33.

С. В. Епифанов, Б. И. Кузнецов, И. Н. Богаенко и др. - Київ.: Техніка, 1998. - 312 с.

6. Синтез систем управления и диагностики газотурбинных двигателей [Текст] /

Поступила в редакцию 10.07.2017 г.

#### **Ф.Г. Сорогін. Метод розрахунку енергетичних показників ГТП**

*Газотурбінні приводи (ГТП) широко використовуються в складі різних енергетичних установок і в різних кліматичних зонах. Обґрунтований вибір типу ГТП визначає необхідність детального обліку його енергетичних показників в конкретних умовах експлуатації енергоустановки. Подібна задача виникає і для конкретного типу ГТП при аналізі варіантів модернізації енергоустановки. Для її вирішення доцільно використовувати досить простий метод розрахунку енергетичних показників ГТП в цілому, придатний у всьому можливому діапазоні режимів роботи. При цьому час розрахунку основних параметрів ГТП має бути мінімальним, а метод універсальним з точки зору можливості застосування для інших ГТП. Такий метод сформований в даній роботі на основі базових характеристик, що надаються виробником при постачанні ГТП.*

**Ключові слова:** газотурбінний привід, кліматична характеристика, часткове навантаження, енергетична ефективність.

#### **F.G.Sorogin. The gas-turbine drives energy factors calculation method**

*Gas turbine drives (GTD) are widely used in various power plants and in different climatic zones. The well-founded GTD type choice determines the need of its energy performance detailed accounting in the specific power plant operating conditions. A similar problem arises for the GTD specific type at the analysis of the power plant upgrading options. A fairly simple method for the whole GTD energy parameters calculating is expediently to use for solution of this problem for the entire possible operating modes range. In this case, the GTD main parameters calculating time should be minimal, and the method must be universal from the point of view of the possibility for other GTD application. Such method was formed in this work around the fundamental characteristics provided by the manufacturer at the GTD delivering.*

**Keywords:** gas turbine drive; climatic characteristics, partial load, energy efficiency.