

УДК 622.691.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО КПД ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Коновалов А.А.

*Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина
г. Москва, e-mail: a.konovarov@gpr.gazprom.ru*

Аннотация. Одним из эффективных методов снижения энергетических затрат в транспорте газа является оптимизация режимов работы газоперекачивающих агрегатов (ГПА) и компрессорных цехов. Для решения этой задачи необходимо иметь значения коэффициента полезного действия газотурбинных установок (ГТУ). Как показали результаты исследований, использование в данном случае номинальных значений КПД ГТУ в ряде случаев может привести к некорректным решениям. Это указывает на необходимость при решении задач оптимизации режимов работы ГПА использовать действительные значения эффективного КПД ГТУ установок на переменных режимах их работы. В статье дана оценка возможности использования зависимости относительного КПД от относительной приведенной мощности для прогнозирования КПД ГТУ.

Ключевые слова: коэффициент полезного действия, КПД, компрессорный цех, газоперекачивающий агрегат, ГПА, газотурбинная установка, ГТУ, оптимизация, прогнозирование коэффициента полезного действия

Десятилетия неэффективного использования энергоресурсов создали в России огромный потенциал энергосбережения, достигающий порядка 30 - 35 % современного потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Нерациональное расходование энергии, сохранившееся со времен искусственной дешевизны ресурсов, в настоящее время усугубляется не только общим экономическим кризисом, но и низким техническим уровнем основного оборудования топливно-энергетического комплекса, спадом инвестиций в реконструкцию и техническое перевооружение и, как следствие, быстро растущей изношенностью оборудования.

На газовую промышленность приходится основная нагрузка по обеспечению экономики России топливно-энергетическими ресурсами. За последние годы доля газа в структуре потребления ТЭР возросла с 42 % до 51,5 %. Рост потребления газа превышает динамику потребления других видов топлива. Имея не менее трети мировых запасов газа, наша страна во многих отраслях не обладает эффективными технологиями его использования.

ОАО «Газпром» является одним из крупнейших потребителей энергетических ресурсов в России. Потребление в Обществе распределяется следующим образом:

- природный газ – 93,2 %;
- электроэнергия – 6,5 %;
- другие виды топлива – 0,3 %.

Одним из эффективных способов снижения энергетических затрат при магистральном транспорте природного газа является оптимизация режимов работы газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на компрессорных станциях (КС) магистральных газопроводов.

В качестве критерия оценки эффективности режимов работы ГПА в системах компримирования КС, оснащенных газоперекачивающими агрегатами с газотурбинным (ГГПА) и электроприводом (ЭГПА), предлагается использовать значение энергетической составляющей эксплуатационных затрат на сжатие природного газа [2]:

$$C_{\text{эн.с.к.}} = \frac{3,6 \cdot u_{m2}}{Q_H^p} \cdot \sum_{i=1}^x \frac{N_{ii}}{\eta_{e,i}} \cdot \eta_{\text{мех},i} + u_{\text{эз}} \cdot \sum_{j=1}^y \frac{N_{ij}}{\eta_{\text{эл},j} \cdot \eta_{\text{ред},j}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{эн.с.к.}}$ – часовые энергетические затраты в денежном выражении, руб./час; u_{m2} – цена топливного газа, руб./тыс. м³; $\eta_{e,i}$ – эффективный КПД газотурбинной установки (ГТУ) i -го работающего ГГПА; N_{ii} , N_{ij} – значения внутренней мощности, расходуемой на сжатие газа в центробежных нагнетателях (ЦБН) i -го ГГПА и j -го ЭГПА, включенных в систему компримирования КС, кВт; $u_{\text{эз}}$ – цена электрической энергии, руб/(кВт·ч); $\eta_{\text{мех}}$ – механический КПД ГГПА, учитывающий механические потери при передаче энергии от ГТУ к нагнетателю; $\eta_{\text{эл},j}$, $\eta_{\text{ред}}$ – КПД электродвигателя и редуктора j -го работающего ЭГПА.

Определение критерия оценки эффективности режимов работы ГПА в системах компримирования КС требует знания значений эффективного КПД газотурбинных установок $\eta_{e,i}$. Как показывают результаты исследований, использование при решении задач оптимизации режимов работы ГПА паспортных (номинальных) значений эффективного КПД ГТУ η_{e0} в ряде случаев может привести к некорректным решениям [2]. Это указывает на необходимость использовать при определении критерия оптимизации действительных значений эффективного КПД газотурбинных установок η_e на переменных режимах их работы.

Эффективность работы газотурбинных установок в общем случае зависит от загрузки ГТУ и их технического состояния. Значение эффективного КПД ГТУ, определяющего эффективность работы газотурбинных установок, предлагается находить из соотношения [2]

$$\eta_e = \eta_{e0} \cdot \bar{\eta}_e \cdot K_{\eta_e}, \quad (2)$$

где η_{e0} – значение паспортного эффективного КПД ГТУ; $\bar{\eta}_e$ – относительный КПД ГТУ, $\bar{\eta}_e = \eta_{e0p} / \eta_{e0}$; η_{e0p} – значение эффективного КПД ГТУ при идеальном техническом состоянии установки в рассматриваемом режиме эксплуатации; K_{η_e} – коэффициент технического состояния ГТУ, $K_{\eta_e} = \eta_{en} / \eta_{e0}$; η_{en} – эффективный КПД ГТУ при действительном техническом состоянии установки в номинальном режиме эксплуатации.

В стандартах ОАО «Газпром» предлагается соотношение для определения относительного КПД ГТУ $\bar{\eta}_e$ в зависимости от приведенной относительной мощности установки [1, 3, 4]:

$$\bar{\eta}_e = \frac{\bar{N}_{e,np}}{1 - 0,75 \cdot (1 - \bar{N}_{e,np})}, \quad (3)$$

где $\bar{N}_{e,np}$ – приведенная относительная мощность установки,

$$\bar{N}_{e,np} = \frac{N_e}{N_{e0}} \cdot \sqrt{\frac{T_{ex,0}}{T_{ex}} \cdot \frac{p_{oc,0}}{p_{oc}}}, \quad (4)$$

N_e, N_{e0} – действительная и паспортная мощность ГТУ; $T_{ex}, T_{ex,0}$ – действительная температура воздуха на входе осевого компрессора и значение температуры воздуха на входе осевого компрессора при стандартных станционных условиях, $T_{ex,0} = 288$ К; $p_{oc}, p_{oc,0}$ – действительное атмосферное давление и значение атмосферного давления при стандартных станционных условиях, $p_{oc,0} = 760$ мм рт. ст.

Следует отметить, что предлагаемая зависимость относительного КПД ГТУ от приведенной относительной мощности установки (3) рекомендуется только для отечественных двухвальных газотурбинных установок стационарного типа [1, 4]. Между тем, в настоящее время основным видом ГТУ на КС являются установки авиационного типа, часть из которых – трехвальные. Существенную долю агрегатов составляют ГТУ импортного производства, часть агрегатов, имеет поворотные направляющие аппараты силовой турбины. Кроме того, современные ГТУ по сравнению с установками более ранних поколений имеют существенно более высокие значения не только эффективного КПД, но и степени повышения давления воздуха в осевом компрессоре и температуры продуктов сгорания перед турбиной высокого давления. В связи с этим возникает задача проверки возможности использования предлагаемого соотношения по определению относительного КПД ГТУ для современных газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом.

Решение поставленной задачи проводилось на основе обработки эксплуатационных характеристик и результатов теплотехнических испытаний ГПА различных типов и единичной мощности. В процессе исследования обобщались результаты обработки эксплуатационных данных и результатов теплотехнических испытаний авиационных двух – и трехвальных ГТУ газоперекачивающих агрегатов ГПА-Ц-8, ГПА-16 «Урал», ГПА-Ц-16; стационарных регенеративных газотурбинных установок отечественного производства ГТК-10-4, а также импортных стационарных безрегенеративных и регенеративных ГТУ агрегатов ГТК- 25И и ГТК-25ИР.

Следует отметить, что в процессе исследования использовались данные теплотехнических испытаний ГПА, в ряде которых эффективная мощность агрегата определялась с помощью бесконтактного измерителя крутящего момента (БИКМ), что повышает достоверность полученных результатов.

В результате обработки эксплуатационных данных и данных теплотехнических испытаний агрегатов различных типов и единичной мощности были получены значения относительно КПД ГТУ $\bar{\eta}_e$ при различных значениях приведенной относительной мощности установки $\bar{N}_{e,np}$ и зависимости, обобщающие полученные результаты (рис. 1). Однако, анализ полученных результатов показал, что для каждой установки даже одного типа смещение точки *A* от значения $\bar{\eta}_e = 1$ при номинальной нагрузке агрегата имеет свое собственное значение, которое определяется коэффициентом технического состояния ГТУ по эффективному КПД K_{η_e} . В связи с этим использование полученных данных, которые учитывают техническое состояние ГТУ, для прогнозирования эффективного КПД установок некорректно, так как каждая газотурбинная установка имеет свое собственное техническое состояние, меняющееся во времени.

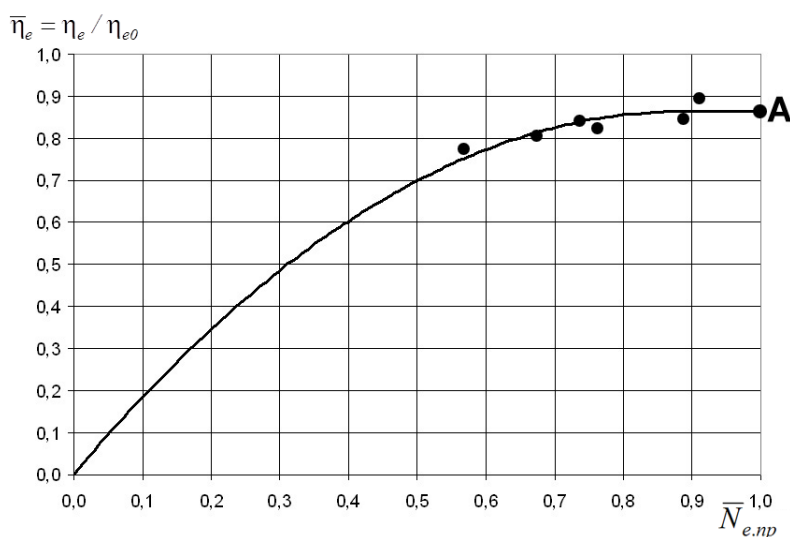


Рис. 1. Зависимость относительного КПД ГТУ от приведенной относительной мощности установки $\bar{N}_{e,np}$

Для обобщения результатов обработки теплотехнических испытаний агрегатов различных типов, имеющих различное техническое состояние, предлагается найти зависимость относительного КПД ГТУ от приведенной относительной мощности при идеальном техническом состоянии установок $\bar{\eta}_e = \eta_{e0p} / \eta_{e0} = f(\bar{N}_{e,np})$, т.е. при значении коэффициента технического состояния ГТУ $K_{\eta_e} = 1$.

Для построения такой зависимости следует определить КТС ГТУ по эффективному КПД а затем, используя найденное значение K_{η_e} , скорректировать полученные результаты определения значений относительного КПД ГТУ. При

этом кривые полученных зависимостей сдвинутся вверх, а точка A совпадет со значением $\bar{\eta}_e = \eta_{e0p} / \eta_{e0} = 1$ (рис. 2).

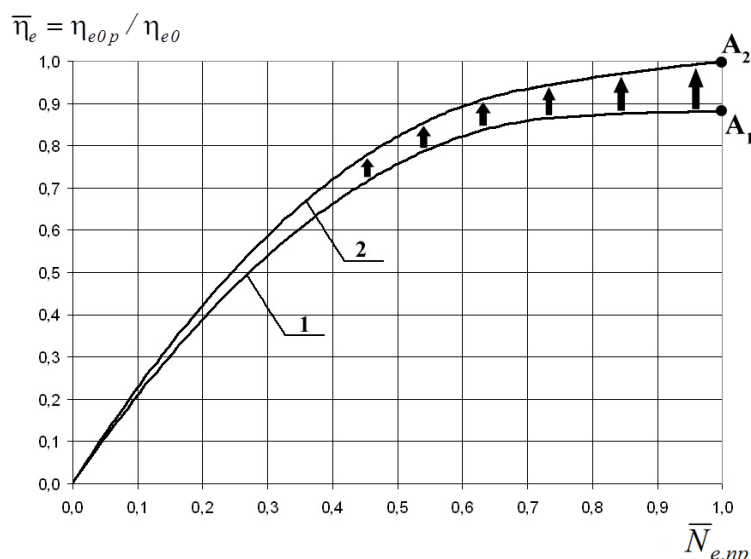


Рис. 2. Корректировка зависимостей относительного КПД ГТУ от приведенной относительной мощности установки $\bar{N}_{e,np}$ на примере ГПА-16 «Урал»:

- 1 – зависимость с учетом технического состояния ГТУ;
2 – зависимость при идеальном техническом состоянии ГТУ ($K_{\eta_e} = 1$).

Анализ результатов проведенного исследования подтвердил возможность обобщения скорректированных подобным образом результатов обработки эксплуатационных характеристик и данных теплотехнических испытаний по агрегатам различных типов. Сопоставление результатов обработки эксплуатационных данных и результатов теплотехнических испытаний двух- и трехвальных отечественных газотурбинных установок ГПА-Ц-8, ГТК-10-4, ГПА-16 «Урал» и ГПА-Ц-16, а также зарубежной стационарной установки ГТК-25И показало их допустимую степень корреляции с зависимостью относительного КПД ГТУ от приведенной относительной мощности при идеальном техническом состоянии установок, предложенной и рекомендуемой ВНИИГАЗом (рис. 3):

$$\bar{\eta}_e = \eta_{e0p} / \eta_{e0} = f(\bar{N}_{e,np}). \quad (3)$$

Результаты проведенного исследования показали, что соотношение (3) можно рекомендовать для определения относительного КПД ГТУ в зависимости от приведенной относительной мощности установки при идеальном техническом состоянии ГТУ для современных отечественных двух- и трехвальных газотурбинных установок стационарного и авиационного типа различной единичной мощности, а также для стационарных безрегенеративных ГПА зарубежного производства.

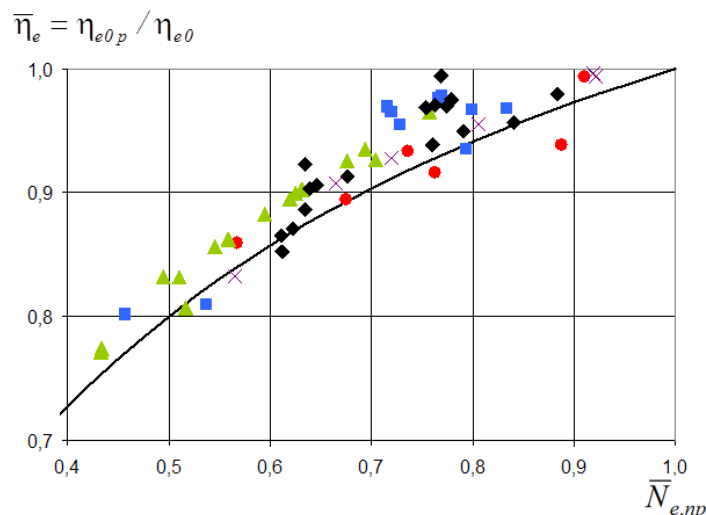


Рис. 3. Сопоставление результатов обработки эксплуатационных данных и данных теплотехнических испытаний ГТУ с зависимостью, предложенной ВНИИГАЗом:
 ● – ГПА-Ц-8; ■ – ГТК-10-4; ▲ – ГПА-16 «Урал»; ◆ – ГПА-Ц-16; × – ГТК-25И

Литература

1. Волков М.М., Михеев А.Л., Конев К.А. Справочник работника газовой промышленности. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1989. 286 с.
2. Калинин А.Ф. Расчет, регулирование и оптимизация режимов работы газоперекачивающих агрегатов. М.: МПА-Пресс, 2011. 264 с.
3. Р Газпром 2-3.5-438-2010. Расчет теплотехнических, газодинамических и экологических параметров газоперекачивающих агрегатов на переменных режимах. М.: ОАО «Газпром», 2010. 70 с.
4. Щуровский В.А., Корнеев В.И. Обобщенные характеристики газотурбинных установок с разрезным валом, используемых для привода нагнетателей природного газа // Реф. сб. «Транспорт и хранение газа». М.: ВНИИЭгазпром, 1974, № 2. С. 8 - 12.
5. Аксютин О.Е. Эффективное использование природного газа для собственных нужд в ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. 2010. № 2. С. 68 - 70.

FINDING OF GAS-TURBINE ENGINE EFFICIENCY AT VARIABLE OPERATIONAL CONDITIONS

A.A. Konovalov

*Russian State University of Oil and Gas, Moscow
e-mail*

Abstract. *One of the most effective methods to decrease energy cost in gas transportation is optimization of operational conditions of gas-compressor units and compressor sheds. To solve such problem we have to know efficiency. According to researches, use of nominal efficiency sometimes can lead to inconsistent results. That indicates that we have to use real gas-turbine engine efficiency solving optimization problem in case of variable operational conditions. In the article there is estimation of possibility of using of relationship relative efficiency vs. relative modified power to predict gas-turbine engine efficiency.*

Keywords: *efficiency, compressor shed, gas-compressor unit, gas-turbine engine, optimization, efficiency prediction.*

References

1. Volkov M.M., Mikheev A.L., Konev K.A. Spravochnik rabotnika gazovoi promyshlennosti (Manual for gas industry worker). 2 ed. Moscow, Nedra, 1989. 286 p.
2. Kalinin A.F. Raschet, regulirovanie i optimizatsiya rezhimov raboty gazoperekachivayushchikh agregatov (Design, regulation and optimization of the operating modes of gas pumping units). Moscow, MPA-Press, 2011. 264 p.
3. R Gazprom 2-3.5-438-2010. Raschet teplotekhnicheskikh, gazodinamicheskikh i ekologicheskikh parametrov gazoperekachivayushchikh agregatov na perezmennykh rezhimakh (Calculation of thermal, hydro and environmental parameters of gas pumping units at varying modes). Moscow, Gazprom, 2010. 70 p.
4. Shchurovskii V.A., Korneev V.I. Obobshchennye kharakteristiki gazoturbinykh ustanovok s razreznym valom, ispol'zuemykh dlya privoda nagnetatelei prirodnogo gaza (Generalized characteristics of gas turbines with a split shaft used to drive natural gas compressors), Moscow, VNIIEgazprom. *Abstracts collection "Gas transport and storage"*, 1974, Issue 2, pp. 8 - 12.
5. Aksyutin O.E. Effektivnoe ispol'zovanie prirodnogo gaza dlya sobstvennykh nuzhd v OAO «Gazprom» (Gazprom: efficient ways to use natural gas for captive needs), *Gazovaya Promyshlennost'*, 2010. Issue 2, pp. 68 - 70.