

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРАНСПОРТА ГАЗА

ENERGY EFFICIENCY, ENERGY SAVING AND ECOLOGICAL EFFICIENCY OF THE MAIN TRANSPORT OF GAS

Рассмотрен вариант оптимизации режимов работы газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций магистрального транспорта газа. Разработанный подход может применяться для решения задач энергосбережения и энергоэффективного управления в процессе трубопроводного транспорта газа по магистральным газопроводам.

A variant of optimization of performance modes of gas transmittal units at gas transmission compressor stations is considered. The developed approach is applicable for resolving problems of energy saving and energy-efficient management in the process of gas pipeline transportation.

Иванов Э.С.
ФГБОУ ВПО Уфимский
государственный нефтяной
технический университет

E.S. Ivanov
FSBEI Ufa state petroleum technical
university

Ключевые слова: эксплуатация, оптимизация, газотурбинная установка, центробежный компрессор, газоперекачивающий агрегат, коэффициент полезного действия, энергосбережение, энергоэффективность, экологическая эффективность, компрессорная станция.

Key words: operation, optimization, gas turbine plant, centrifugal compressor, gas transmittal unit, efficiency coefficient, energy saving, energy efficiency ecological efficiency, compressor station.

Введение

Энергоэффективное управление магистральным транспортом газа является одним из приоритетных направлений устойчивого развития и оптимизации затрат в газовой промышленности.

В настоящее время на предприятиях ОАО «Газпром» обращают серьезное внимание на проблемы оптимального управления газотранспортной системой, а также вопросы достоверной оценки и прогноза режима транспорта газа в процессе оперативного регулирования с учетом фактического технического состояния оборудования. Указанные аспекты несомненно влияют на энергосбережение, энергетическую и экологическую эффективность производства.

ОАО «Газпром» последовательно реализует политику энергосбережения, снижения негативного воздействия на окружающую среду и повышения энергетической эффективности производственных процессов.

В настоящее время существует нормативная база политики энергосбережения [17]:

- Федеральный закон «Об энергосбережении» № 28-ФЗ от 03.04.1996 г.;
- Указ Президента Российской Федерации «О некоторых мерах по повышению энергетической

и экологической эффективности российской экономики» № 889 от 04.06.2008 г.;

– «Энергетическая стратегия России на период до 2030 г.» (Распоряжение Правительства России №1715-р от 13.11.2009 г.);

– Постановление Правления ОАО «Газпром» «О перспективах разработки и внедрения газо- и энергосберегающих технологий и их влиянии на оптимизацию топливно-энергетического баланса РФ» № 3 от 22.01.2009 г.;

– Приказ ОАО «Газпром» «Об организации работ по энергосбережению в ОАО «Газпром» № 77 от 09.10.2000 г.

В современное время в газовой промышленности разработан целый комплекс мероприятий, направленных на рациональное использование природного газа на собственные технологические нужды магистрального транспорта газа:

- оптимизация режимов работы компрессорных станций (далее – КС);
- замена газоперекачивающих агрегатов в процессе реконструкции КС;
- внедрение систем электрического запуска ГПА КС;
- очистка проточной части осевых компрессоров ГТУ;
- улучшение технического состояния ГТУ и ЦБК за счет проведения ремонтов;
- выработка газа ГПА КС из участков газопроводов перед проведением ремонтных работ;
- выработка газа потребителям (ГРС) из отключенных участков газопроводов перед проведением ремонтных работ;
- выработка газа из контура ремонтируемой КС за счет контура топливного газа параллельной КС (через монтируемую перемычку);
- перепуск газа в смежные или параллельные участки газопроводов;

- использование технологий врезки под давлением при проведении огневых работ;
- внедрение систем безрасходной продувки узлов очистки газа (пылеуловителей, сепараторов, адсорберов, фильтров);
- снижение потерь давления в обвязке КС (в том числе за счет спрямления участков трубопроводной обвязки);
- очистка (промывка) котлов котельных, подогревателей газа;
- режимная наладка (настройка) котлов котельных, подогревателей газа;
- монтаж котлов-утилизаторов (по обводной схеме) на ГПА КС;
- выявление и устранение технологических потерь (утечек) газа;
- выявление и устранение перетоков газа в трубопроводной арматуре (в том числе линий рециркуляции КС);
- проведение очистки полости газопроводов внутритрубными поршнями;
- применение эжекторов для процессов выработки участков газопроводов и контуров КС перед проведением ремонтных работ;
- применение мобильных компрессорных установок для выработки газа из ремонтируемого

участка в смежный или параллельный участок газопровода;

- очистка наружной и внутренней поверхности трубных пучков АВО газа;
- совершенствование технологии проведения огневых работ (в том числе продувка газопроводов после ремонтов с применением газоанализаторов);
- совершенствование методологии расчета и учета расхода газа на собственные технологические нужды.

Перечисленные мероприятия направлены на рациональное использование газа на собственные технологические нужды, уменьшение эмиссии метана и выбросов оксидов азота и углерода в атмосферу.

На рисунках 1 и 2 показана структура потребления газа на собственные технологические нужды и потери (далее – СТН) газотранспортного предприятия на примере ООО «Газпром трансгаз Уфа». Как видно, более 80% расхода газа на СТН приходится на топливный газ ГПА на компримирование.

Таким образом, большая часть энергосбережения производится за счет оптимизации режимов работы компрессорной станции:

- соблюдение оптимального (рационального) эффективного КПД ГТУ;
- соблюдение оптимального (рационального) политропного КПД ЦБК;
- уменьшение (оптимизация) количества работающих ГПА;
- применение схем одноступенчатого компримирования для ГПА с неполнонапорными ЦБК;
- поддержание в работе оптимального количества пылеуловителей на установке очистки газа;
- поддержание в работе оптимального количества вентиляторов АВО газа в процессе регулирования температуры газа на выходе КС.

Экономия расхода топливного газа ГПА определяется качеством оптимизации режимов работы ГПА КС и является самой весомой среди всех приведенных выше мероприятий энергосбережения.

Задача оптимизации режимов работы ГПА КС в процессе магистрального транспорта газа сводится к определению требуемых технологических параметров режимов работы ГТУ и ЦБК в составе ГПА при заданных условиях транспорта газа с одновременным соблюдением оптимальных значений политропного коэффициента полезного действия (далее – КПД) ЦБК и эффективного КПД ГТУ.

В фактических условиях эксплуатации газотранспортных систем не всегда возможно добиться оптимальных показателей режимов работы ГПА в силу режимно-технологических причин или ограниченного технического состояния оборудования, в этом случае, задача оптимизации сводится к определению условий рациональных режимов работы ГПА.



Рисунок 1. Структура потребления газа на собственные технологические нужды газотранспортного предприятия на примере ООО «Газпром трансгаз Уфа» за 2010 год [16]

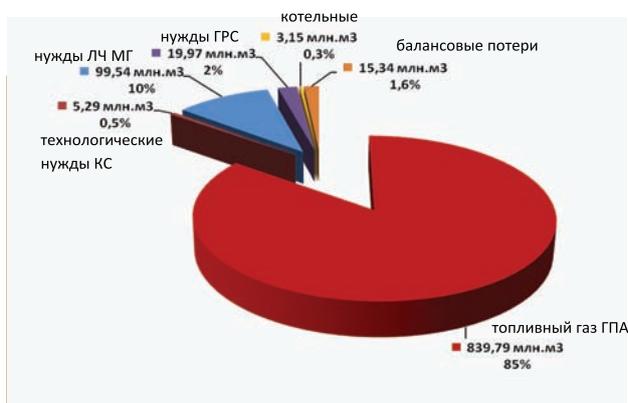


Рисунок 2. Структура потребления газа на собственные технологические нужды газотранспортного предприятия на примере ООО «Газпром трансгаз Уфа» за 2011 год [16]

Оптимизация режимов работы ГПА

В современных условиях эксплуатации существуют универсальные приведенные дроссельные (статистические) характеристики режимов работы ГТУ, описывающие зависимость мощности ГТУ $N_{ГТУ\text{пр}}$ от оборотов компрессора (КВД) или турбины (ТВД) высокого давления – ротора высокого давления (далее – РВД) $n_{РВД\text{пр}}$, оборотов силовой турбины (далее – СТ) $n_{СТ\text{пр}}$ с учетом эффективного КПД ГТУ $\eta_{ГТУ\text{пр}}$ [9].

Сложная характеристика ГТУ аппроксимирована и представлена в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} n_{РВД\text{пр}} = \Psi_1 \cdot n_{СТ\text{пр}}^{\chi_1} \cdot N_{ГТУ\text{пр}}^{\gamma_1} \\ n_{РВД\text{пр}} = \Psi_2(\eta_{ГТУ}) \cdot \left(\frac{n_{СТ\text{пр}}}{100}\right)^{\chi_2(\eta_{ГТУ})} \cdot \left(\frac{N_{ГТУ\text{пр}}}{N_{НОМ}}\right)^{\gamma_2(\eta_{ГТУ})} \\ \Psi_2(\eta_{ГТУ}) = a_0 + a_1 \cdot \eta_{ГТУ} + a_2 \cdot \eta_{ГТУ}^2 + a_3 \cdot \eta_{ГТУ}^3 + a_4 \cdot \eta_{ГТУ}^4 \\ \chi_2(\eta_{ГТУ}) = b_0 + b_1 \cdot \eta_{ГТУ} + b_2 \cdot \eta_{ГТУ}^2 + b_3 \cdot \eta_{ГТУ}^3 + b_4 \cdot \eta_{ГТУ}^4 \\ \gamma_2(\eta_{ГТУ}) = c_0 + c_1 \cdot \eta_{ГТУ} + c_2 \cdot \eta_{ГТУ}^2 + c_3 \cdot \eta_{ГТУ}^3 + c_4 \cdot \eta_{ГТУ}^4 \\ \eta_{ГТУ} = \eta_{ГТУ\text{пр}} \end{cases} \quad (1)$$

где Ψ_1 , χ_1 , γ_1 – коэффициенты Кобба-Дугласа [1], зависящие от технического состояния и индивидуальные для каждой ГТУ;

$\Psi_2(\eta_{ГТУ})$, $\chi_2(\eta_{ГТУ})$, $\gamma_2(\eta_{ГТУ})$ – коэффициенты, зависящие от значения эффективного КПД ГТУ.

Мощностная характеристика ЦБК при условии оптимального политропного КПД в диапазоне расходов $[Q]_{\text{пр\text{мин}}} \leq [Q]_{\text{пр\text{опт}}} \leq [Q]_{\text{пр\text{макс}}}$ представлена в виде системы уравнений [3, 4]:

$$\begin{cases} \left[\frac{N_i}{\rho_{BC}}\right]_{\text{пр}} = C_0 + C_1 \cdot [Q]_{\text{пр}} + C_2 \cdot [Q]_{\text{пр}}^2 + C_3 \cdot [Q]_{\text{пр}}^3 \\ N_{\text{пр}} = \rho_{BC} \cdot \left[\frac{N_i}{\rho_{BC}}\right]_{\text{пр}} \cdot \left(\frac{n_{СТ}}{n_H}\right)^3 \cdot \left(\frac{P_0}{Pa} \sqrt{\frac{T_0}{Ta}}\right) \\ \eta_{ЦБК} = K_0 + K_1 \cdot [Q]_{\text{пр}} + K_2 \cdot [Q]_{\text{пр}}^2 + K_3 \cdot [Q]_{\text{пр}}^3 \\ \frac{d(\eta_{ЦБК})}{d([Q]_{\text{пр}})} = K_1 + 2 \cdot K_2 \cdot [Q]_{\text{пр}} + 3 \cdot K_3 \cdot [Q]_{\text{пр}}^2 = 0 \\ \varepsilon^2 = \left\{ \left[\frac{n_{СТ}}{n_H}\right]_{\text{пр}}^2 \cdot \left(a_0 + a_1 \cdot [Q]_{\text{пр}} + a_2 \cdot [Q]_{\text{пр}}^2 + a_3 \cdot [Q]_{\text{пр}}^3 \right)^{\frac{k-1}{2k\eta}} - 1 \right\}^{\frac{2k\eta}{k-1}} + 1 \end{cases} \quad (2)$$

Характеристики ГТУ и ЦБК приводятся в формулах (по результатам стендовых испытаний в заводских условиях). Указанные характеристики могут быть построены (аппроксимированы) по результатам инструментальных замеров в условиях промышленной эксплуатации ГПА на компрессорной станции (с использованием методов энтальпий, Шульца, теплового баланса или баланса мощностей с применением измерителей крутящего момента), что является предпочтительным вариантом, так как предусматривает идентификацию характеристик ГТУ и ЦБК в составе ГПА с учетом их фактического технического состояния.

Для унификации и оперативного решения задачи оптимизации режимов ГПА построена универсальная совмещенная характеристика ГТУ и ЦБК (рисунок 3).

Удобство указанной характеристики состоит в том, что на приведенную дроссельную характеристику ГТУ (описываемую системой (1)) нанесена мощностная приведенная характеристика ЦБК при условии оптимального политропного КПД ЦБК ($\eta_{ЦБК} = \eta_{ЦБК\text{MAX}} = \eta_{ЦБК\text{ОПТ}}$) и приведенного расхода газа через проточную часть ЦБК (описываемую системой (2)) на всем диапазоне плотностей (ρ_{BC}) транспортируемого газа во входном патрубке ЦБК.

Расход топливного газа ГПА (кг/с) определяется по известному соотношению [5]:

$$G_{ГП} = \frac{N_e}{\eta_{ГТУ} \cdot (Q_M + i_T)} \quad (3)$$

где Q_M – массовая низшая теплота сгорания топливного газа, кДж/кг;

i_T – удельная энтальпия топливного газа, кДж/кг.

Согласно [12] параметр выброса i -го компонента M_i (г/с) определяется соотношением:

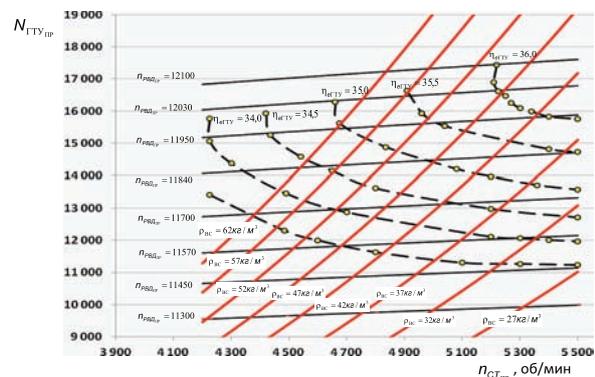


Рисунок 3. Совмещенная дроссельная характеристика ГТУ АЛ-31СТ в составе ГПА-16Р «Уфа» (при стандартных атмосферных условиях: $P_0=0,1013$ МПа и $t_0=15^\circ\text{C}$) и мощностная характеристика ЦБК Н-370-76-1,4/5300 (приведенная к $P_0=0,1013$ МПа и $t_0=15^\circ\text{C}$, при условиях $\eta_{ЦБК\text{MAX}} = \eta_{ЦБК\text{ОПТ}}$, $[Q]_{\text{пр}} = [Q]_{\text{пр\text{опт}}}$).

$$M_i = 0,832 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{N_e}{\eta_{\text{ГТУ}}} \cdot C_i^{15} \quad (4)$$

где C_i^{15} – приведенная концентрация i -го компонента (NO_x или CO), определяется согласно [12].

Удельный выброс i -го компонента на единицу топливного газа $m_i^{\text{ГТ}}$ (г/м^3) согласно [12] определяется из соотношения:

$$m_i^{\text{ГТ}} = \frac{3600 \cdot M_i}{Q_{\text{ГТ}}} \quad (5)$$

Более подробно расчет теплотехнических и экологических параметров ГТУ описан в источнике [12].

Зависимости (3), (4) и (5) показывают, что увеличение эффективного КПД ГТУ приводит к уменьшению расхода топливного газа ГПА и выбросов оксидов азота и углерода в атмосферу.

Универсальная характеристика (рисунок 3) показывает, что даже при условии номинальной загрузки ГПА по мощности, эффективный КПД ГТУ может отклоняться от оптимальных значений. Оптимальными режимами ГПА являются все режимы, лежащие на линии $\eta_{\text{ГТУ}} = \eta_{\text{ГТУmax}} = 36\%$ (для данного случая на примере ГПА-16Р «Уфа» с ГТУ АЛ-31СТ).

Значения приведенных параметров ГПА определяются по основным уравнениям теории подобия ГТУ согласно [2].

Современные средства позволяют решать задачу оптимизации аналитическим способом с использованием уравнений систем (1) и (2), описывающих режимы работы ГТУ и ЦБК.

Характеристика (рисунок 3) и коэффициенты аппроксимации систем уравнений (1) и (2) индивидуальны для каждого ГПА в зависимости технического состояния ГТУ и ЦБК.

На рисунке 4 приведен график результатов расчета фактического эффективного КПД ГТУ одного из ГПА-16Р «Уфа» по измеренному значению мощности бесконтактным измерителем крутящего момента (БИКМ-М-106М) и расходу топливного газа ГПА по штатному вычислителю в составе САУ и Р ГПА.

На рисунке 5 фактические рабочие точки, соответствующие графику на рисунке 4, нанесены на формулярную дроссельную характеристику ГТУ АЛ-31СТ ГПА-16Р «Уфа».

Как видно из указанных рисунков, для данного примера, большинство режимных точек соответствуют значениям эффективного КПД ГТУ в диапазоне 31,0-34%. При этом, максимальное значение эффективного КПД, по техническим условиям для данного типа ГПА соответствует 36 %, что свидетельствует о наличии запаса оптимизации.

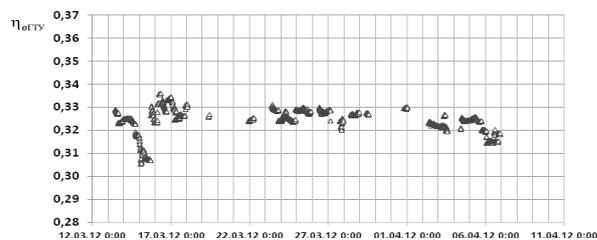


Рисунок 4. Расчетный эффективный КПД ГТУ ГПА-16Р «Уфа» на основании результатов измерения мощности по БИКМ и расхода топливного газа

Указанный пример показывает, что на предприятиях газотранспортной отрасли, существует потенциал энергосбережения топливного газа ГПА в диапазоне 5-15%, что в физическом выражении, на примере ООО «Газпром трансгаз Уфа», может составить примерно от 30 до 100 млн.м³/год.

Ежедневный мониторинг и оптимизация режимов работы ГПА КС газотранспортной системы с использованием систем уравнений (1) и (2) позволит приблизить показатели энергоэффективности к номинальным значениям и сократить выбросы в атмосферу.

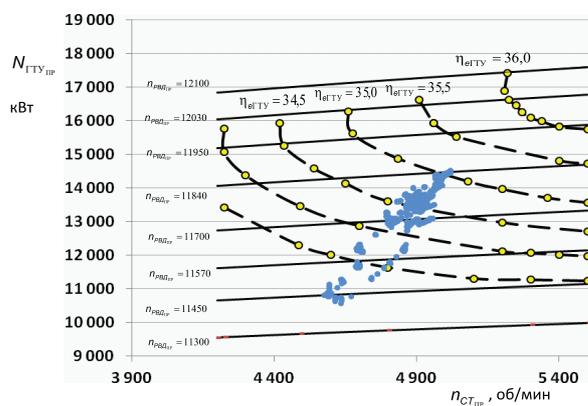


Рисунок 5. Фактические режимы ГТУ по результатам измерений БИКМ на формулярной дроссельной характеристике

Однако, при оптимизации режимов работы, следует учитывать, что не во всех случаях можно добиться оптимальных показателей транспорта газа, так как существуют некоторые ограничения, которые определяются необходимостью проведения комплексов планово-предупредительных работ, капитальных, текущих ремонтов и реконструкции объектов, а также граничными условиями с соседними предприятиями по транспорту газа. В этом случае, задача оптимизации сводится в выборе рациональных режимов, с учетом максимально возможного приближения к оптимальным показателям.

Выводы

В результате исследований рассмотрен вариант построения энергоэффективных режимов работы ГТУ и ЦБК в составе ГПА.



Разработанный подход к процессам оптимизации режимов в процессе эксплуатации газоперекачивающих агрегатов может применяться для остальных типов газотурбинных установок в составе ГПА с учетом индивидуальных коэффициентов аппроксимации и соответствует «Перечню научно-технических проблем ОАО «Газпром».

Результаты работы могут применяться для:

– расчета, оптимизации, управления и контроля режимов работы ГПА в процессе производственно-

диспетчерского управления магистральным транспортом газа;

– составления алгоритмов систем автоматического управления и регулирования ГПА;

– в системах и тренажерах поддержки принятия решений в производственно-диспетчерском управлении магистральным транспортом газа;

– уменьшения выбросов оксидов азота и углерода в атмосферу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Э.С., Гольянов А.И. Совершенствование процессов эксплуатации газоперекачивающих агрегатов. Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2012, № 1. URL http://www.ogbus.ru/authors/IvanovES/IvanovES_1.pdf
2. Шнеэ Я.И. Газовые турбины. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы «МАШГИЗ», 1960. 557 с.
3. Гольянов А.И., Султанов Н.Ф. Расчёт режимов работы компрессорной станции // Методические указания для курсового и дипломного проектирования. Уфа: УНИ, 1987. 26 с.
4. Характеристика центробежного нагнетателя для расчёта режимов работы компрессорных станций магистральных газопроводов / Гольянов А.И. и др. // Реферативный сборник. М.: ВНИИГазпром, 1982. 13 с.
5. ПР 51-31323949-43-99 / Щуровский В.А. и др. // Методические указания по проведению теплотехнических и газодинамических расчетов при испытаниях газотурбинных газоперекачивающих агрегатов. М.: ВНИИГаз, 1999. 29 с.
6. Справочник работника газовой промышленности / Волков М.М. и др. М.: Недра, 1989. 286 с.
7. Измеритель крутящего момента бесконтактный БИКМ М-106М для агрегата ГПА-16Р «Уфа»: руководство по эксплуатации. КМБВ.421218.000 РЭ. ООО ФПК «Космос-нефть-газ». 2011. 21 с.
8. Двигатель ДР59Л. Формуляр. Р59108100 ФО. Криворожский турбинный завод «Восход». Кривой Рог, 169 с.
9. Двигатель АЛ-31СТН. Руководство по эксплуатации. 60.РЭ 1 ред.2. Уфа: ОАО «УМПО». – Кн.1 С. 22-30.
10. СТО Газпром 2-3.5-051-2006. Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов. М.: ВНИИГаз, 2006. 187 с.
11. СТО Газпром 2-1.20-122-2007. Методика проведения энергоаудита компрессорной станции, компрессорных цехов с газотурбинными и электроприводными ГПА. М.: ВНИИГаз, 2007. 115 с.
12. Газпром 2-3.5-438-2010. Расчет теплотехнических, газодинамических и экологических параметров газоперекачивающих агрегатов на переменных режимах. М.: ВНИИГаз, 2010. 70 с.
13. Альбом характеристик центробежных нагнетателей природного газа / Тихонов А.Д. и др. М.: ВНИИГаз, 1985, 86 с.
14. СТО Газпром 2-2.3-250-2008. Методика по определению выходных показателей ГТУ агрегата ГПА-Ц-8, ГПУ-10, ГПУ-16. М.: Оргэнергогаз, 2008. 24 с.
15. Современные компьютерные тренажеры в трубопроводном транспорте / Селезнев В.Е. и др. М.: МАКС Пресс, 2007, 200 с.
16. Баланс газа ООО «Газпром трансгаз Уфа».
17. Официальный сайт ОАО «Газпром». URL: <http://www.gazprom.ru/nature/energy-conservation/> (дата обращения 05.10.2012).
18. «Программа энергосбережения ООО «Газпром трансгаз Уфа» на 2010 – 2013 гг.

*Иванов Э.С., аспирант кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа», ФГБОУ ВПО УГНТУ
E.S. Ivanov, postgraduate student of chair «Transport and storage of oil and gas», FSBEI USPTU
e-mail: ernest.ivanov@mail.ru*