

УДК 622.691.4

УТОЧНЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

UPDATE GENERALIZED CHARACTERISTICS OF GAS-TURBINE POWERPLANT

Кротов С.И.

Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина,
г. Москва, Российская Федерация

S.I. Krotov

Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russian Federation
e-mail: kafedra.filial@yahoo.com

Аннотация. В условиях истощения газовых месторождений задача снижения затрат на транспортировку природного газа становится все более актуальной.

Результаты проведенных комплексных исследований показывают, что максимально эффективная область энергосбережения касательно транспорта природного газа – снижение затрат на собственные нужды основного производства, включающие затраты на топливный газ (80-90%).

Известно, что основными потребителями природного (топливного) газа являются газоперекачивающие агрегаты с газотурбинным приводом, входящие в состав систем компримирования КС. Таким образом, решение задачи снижения расхода газа при его транспортировке в первую очередь должна быть направлена на повышение эффективности работы ГПА.

Эффективная работа газотурбинных ГПА во многом определяется эффективностью работы ГТУ, которая в свою очередь зависит от уровня технического совершенства установки, режима ее работы и технического состояния.

Уровень технического совершенства ГТУ закладывается на этапе разработки и проектирования, реализуется при производстве и поддерживается в процессе эксплуатации.

Решение же задач оптимизации режимов работы ГПА и определение технического состояния ГТУ требуют знания обобщенных приведенных характеристик газотурбинных установок и аналитических зависимостей между ними.

Abstract. In terms of depletion of gas fields the problem of reducing the costs of transportation of natural gas is becoming more urgent.

The results of the comprehensive research show that the most effective energy saving on transportation of natural gas - reducing the costs of auxiliaries of the main production, including the costs of fuel gas (80-90%).

In fact that the main consumers of natural (fuel) gas are pumping units with gas turbine drive, which is included with compression system of the gas compressor station. Thus, the solution of problem reducing of the consumption of gas when transit it in the first should be aimed at improving the efficiency performance of gas turbine pumping unit.

Effective work of gas turbine compressor pumping units in many ways determined by the efficiency performance of the gas turbine, which in turn depends on the level of technical perfection power plant, mode of operation and technical position.

The level of technical excellence of gas turbine is laid on the stage of development and design, realized in the production and in service support.

The solution of the problems of optimization of working modes gas turbine pumping unit and the definition of the technical condition of gas turbines require knowledge of the generalized reduced characteristics of gas turbines and analytical relationships between them.

Ключевые слова: газотурбинная установка, газоперекачивающий агрегат, обобщенные характеристики, относительные характеристики, приведенные характеристики, эффективная работа, расход топливного газа.

Keywords: gas turbine power plant, pumping unit, generalized characteristics, relative characteristics, reduced characteristics, effective work, consumption of fuel gas.

Существующие обобщенные характеристики газотурбинных установок

Существующие приведенные характеристики (рисунок 1), предложенные в 1982 году ВНИИГАЗ, получены на основе обобщения теплотехнических испытаний газоперекачивающих агрегатов эксплуатируемых на КС МГ в то время (стационарные установки со степенями сжатия осевых компрессоров не выше 13,0).

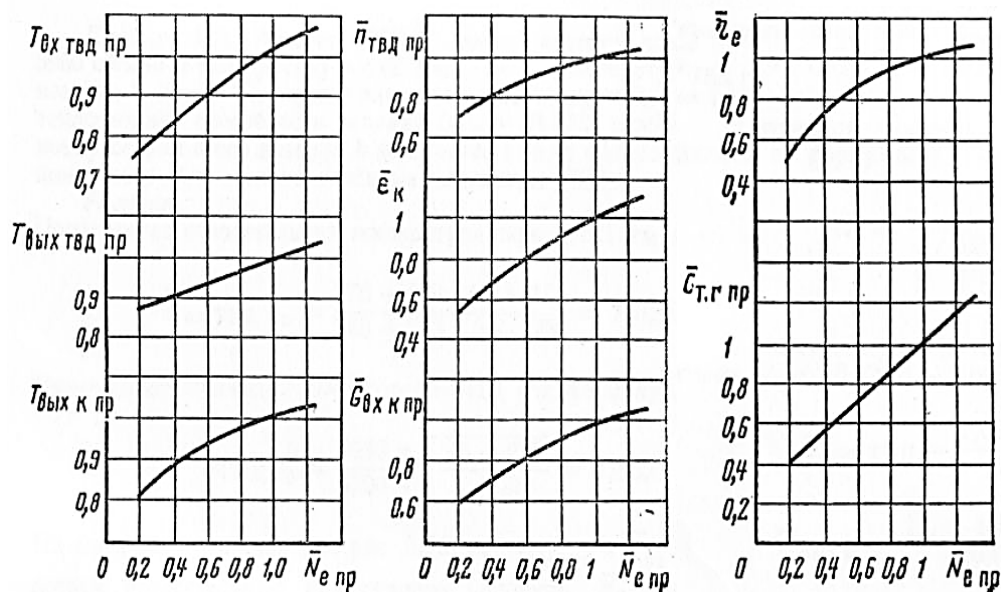


Рисунок 1. Обобщенные относительные характеристики ГТУ

Номенклатура и основные энерготехнологические параметры испытуемых агрегатов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Типы и паспортные характеристики ГТД

| Тип ГПА | Номинальная мощность в стационарных условиях, тыс. кВт | Эффективный КПД ГТУ в стационарных условиях, % | Номинальный расход топлива, м ³ /ч | Степень сжатия осевого компрессора |
|-----------|--|--|---|------------------------------------|
| ГТ-700-4 | 4,0 | 16,0 | 2600 | 5,0 |
| ГТ-700-5 | 4,25 | 25,0 | 1770 | 3,9 |
| ГТК-5 | 4,4 | 26,0 | 1760 | 3,9 |
| ГТ-750-6 | 6,0 | 27,0 | 2320 | 4,6 |
| ГТ-6-750 | 6,0 | 24,0 | 2600 | 6,0 |
| ГТН-6 | 6,3 | 24,0 | 2730 | 6,0 |
| ГПА-Ц-6,3 | 6,3 | 22,5 | 2920 | 7,8 |
| ГТН-9-750 | 10,0 | 19,0 | 5500 | 4,6 |
| ГТК-10-2 | 10,0 | 28,0 | 3720 | 4,4 |
| ГТК-10-3 | 10,0 | 28,0 | 3720 | 4,4 |
| ГТК-10-4 | 10,0 | 29,0 | 3600 | 4,4 |
| ГПА-10 | 10,0 | 26,5 | 3930 | 10,3 |
| ГТК-16 | 16,0 | 25,0 | 6670 | 7,5 |

По данным характеристикам были получены следующие аналитические зависимости:

- относительная приведенная эффективная мощность от температуры продуктов сгорания за турбиной газогенератора:

$$\bar{N}_{\text{епр}} = 1 - 4,2 \cdot (1 - \bar{T}_{1 \text{ пр}}) \cdot \bar{T}_{1 \text{ пр}} ; \quad (1)$$

где \bar{T}_1 - относительная температура продуктов сгорания за турбиной газогенератора, К;

- относительный эффективный КПД от относительной приведенной эффективной мощности ГТУ:

$$\bar{\eta}_e = \frac{\bar{N}_{\text{епр}}}{1 - 0,75 \cdot (1 - \bar{N}_{\text{епр}})} ; \quad (2)$$

- относительный приведенный расход топливного газа от относительной приведенной эффективной мощности ГТУ:

$$\bar{G}_{\text{тг пр}} = 1 - 0,75 \cdot (1 - \bar{N}_{\text{епр}}) ; \quad (3)$$

- относительная степень сжатия осевого компрессора (ОК) от относительной приведенной эффективной мощности ГТУ:

$$\bar{\pi}_k = \bar{N}_{\text{епр}}^{0,42} ; \quad (4)$$

- относительные приведенные обороты турбины высокого давления от относительной приведенной эффективной мощности ГТУ:

$$\bar{n}_{\text{тг пр}} = \bar{N}_{\text{епр}}^{0,21} . \quad (5)$$

В период с 2000 по 2010 год на компрессорных станциях было установлено более 550 агрегатов, все из которых агрегаты нового поколения. К ним относятся ГПА авиационного и судового типов, с одновальной и двухвальной схемой газогенератора, а также со степенями сжатия осевых компрессоров значительно превышающих 13,0. В связи с этим применимость существующих аналитических соотношений при проведении расчетов современных агрегатов необходимо проверить.

Проверка и уточнение обобщенных характеристик и их аналитических соотношений

В качестве исходных данных для проверки и уточнения аналитических зависимостей между приведенными относительными энерготехнологическими характеристиками газотурбинных установок, предложенных ВНИИГАЗ, использовались результаты расширенных диагностических обследований ГПА с замером расхода технологического газа через центробежный нагнетатель ультразвуковым расходомером (таблица 2). Необходимо отметить, что погрешность определения расчетных показателей данным способом была

экспериментально определена и составляет порядка 3% (результаты измерения расхода технологического газа через центробежный нагнетатель сопоставлялись с измерениями системы коммерческого учета расхода газа типа АКУГ).

Таблица 2. Испытуемые газотурбинные двигатели

| ГТД | Схема газогенератора | Тип ГТУ |
|-----------|----------------------|-------------|
| ДГ-90 | Двухвальный | Судовой |
| ДЖ-59 | Двухвальный | Судовой |
| ДР-59 | Двухвальный | Судовой |
| ПС-90ГП-1 | Одновальный | Авиационный |
| ПС-90ГП-2 | Одновальный | Авиационный |
| НК-14СТ | Одновальный | Авиационный |
| НК-16СТ | Двухвальный | Авиационный |

Основные паспортные характеристики испытуемых газотурбинных двигателей представлены в таблице 3.

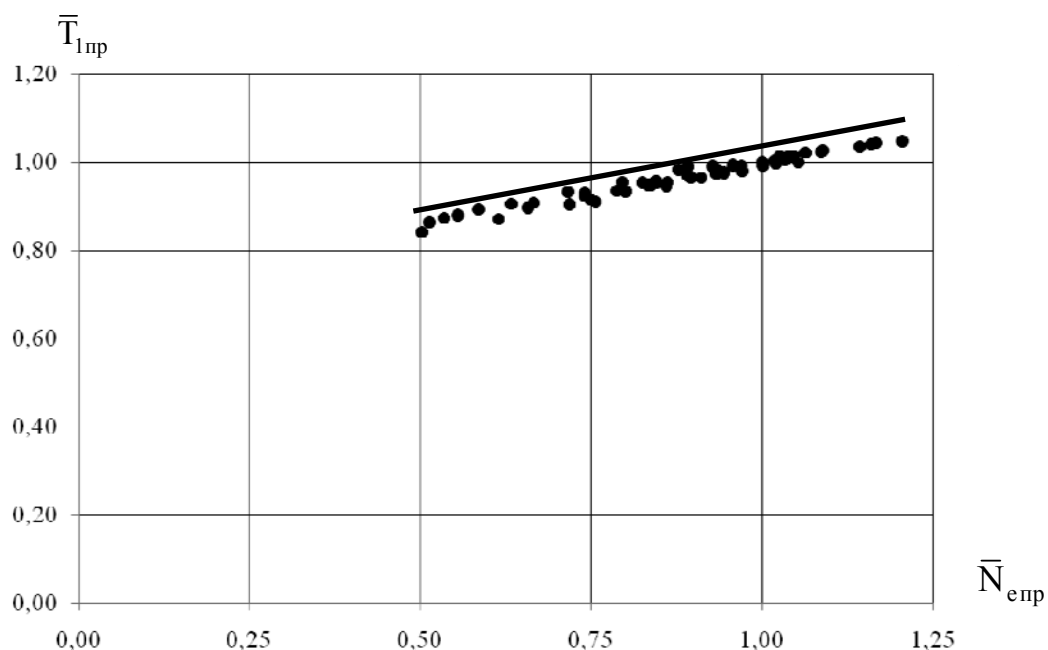
Таблица 3. Типы и паспортные характеристики испытуемых ГТД

| Тип ГТД | Номинальная мощность в стационарных условиях, тыс. кВт | Эффективный КПД ГТУ в стационарных условиях, % | Степень сжатия осевого компрессора |
|-----------|--|--|------------------------------------|
| ДГ-90 | 16,0 | 34,0 | 19,0 |
| ДЖ-59 | 16,0 | 30,0 | 12,7 |
| ДР-59 | 16,0 | 35,0 | 17,3 |
| ПС-90ГП-1 | 12,0 | 34,0 | 15,8 |
| ПС-90ГП-2 | 16,0 | 36,3 | 20,0 |
| НК-14СТ | 8,0 | 30,0 | 10,2 |
| НК-16СТ | 16,0 | 27,5 | 9,7 |

По результатам обобщения были получены графические зависимости обобщенных характеристик ГТУ и их аналитические соотношения¹:

1. Относительная приведенная эффективная мощность от относительной приведенной температуры продуктов сгорания за турбиной газогенератора:

¹Следует отметить тот факт, что топливно-энергетические характеристики газотурбинных установок во многом определяются их техническим состоянием, в связи с чем, полученные результаты приводились к условиям идеального технического состояния ГТУ (парадным условиям), что позволило провести обобщение полученных зависимостей для установок различных типов.

Графическая зависимость:**Аналитическое соотношение:**

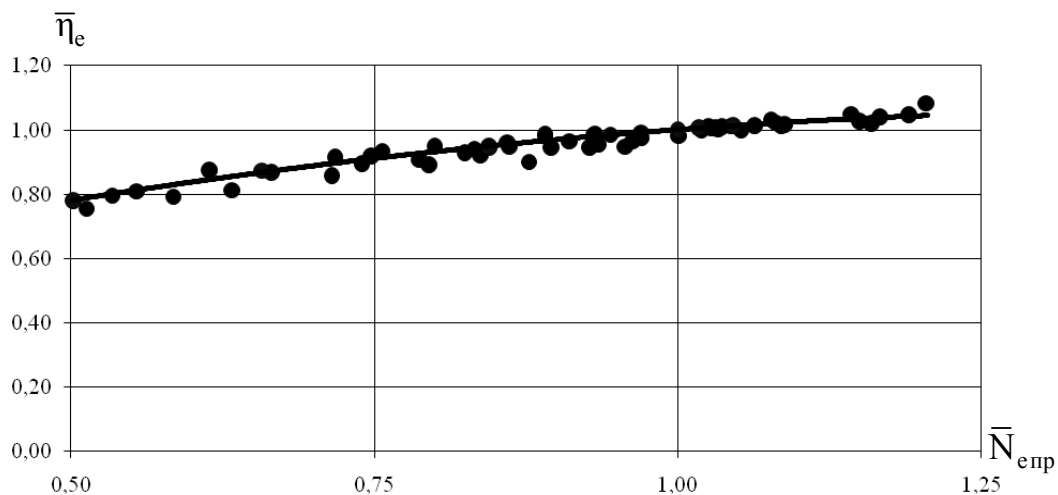
$$\bar{N}_{\text{епр}} = 3,571 \cdot \bar{T}_{1\text{пр}} - 2,571. \quad (6)$$

Анализ применения полученной зависимости показал, что:

- максимальные относительные расхождения с результатами испытаний при расчете приведенной эффективной мощности по соотношению (1) и соотношению (6) равны 17,0% и 3,8% соответственно;
- максимальные средние относительные расхождения характерны для ГТД с одновальной схемой газогенератора и по соотношению (1) достигают значения 9,9%, а по полученной зависимости (6) 3,0%;
- аналитическое соотношение, связывающее рассматриваемые выходные параметры ГТУ, полученное на основе данных теплотехнических испытаний газоперекачивающих агрегатов нового поколения снижает среднюю относительную ошибку с 3,8% до 1,6%.

2. Относительный эффективный коэффициент полезного действия газотурбинной установки от относительной приведенной эффективной мощности:

Графическая зависимость:



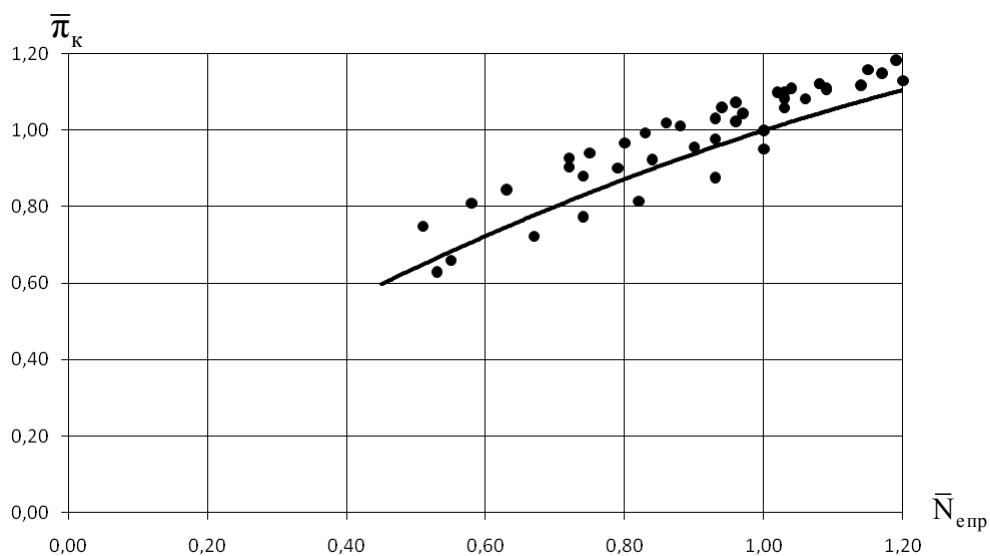
Аналитическое соотношение:

$$\bar{\eta}_e = -0,322 \cdot \bar{N}_{\text{епр}}^2 + 0,923 \cdot \bar{N}_{\text{епр}} + 0,400. \quad (7)$$

Аналитическое соотношение (7), связывающее рассматриваемые выходные параметры ГТУ, снижает среднее относительное расхождение с экспериментальными данными с 1,18 до 1,06%.

3. Относительная степень сжатия осевого компрессора от относительной приведенной эффективной мощности газотурбинной установки:

Графическая зависимость:



Аналитическое соотношение:

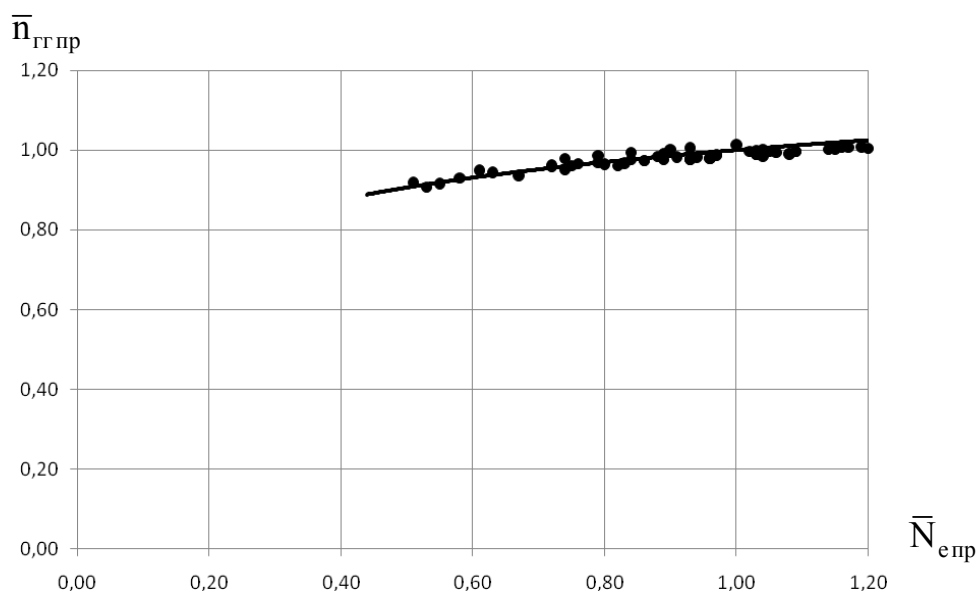
$$\bar{\pi}_k = -0,2649 \cdot \bar{N}_{\text{епр}}^2 + 1,1132 \cdot \bar{N}_{\text{епр}} + 0,1507. \quad (8)$$

Анализ показывает, что:

- при применении зависимости (4) для расчета современных агрегатов, среднеотносительное расхождение степени сжатия ОК по значению эффективной мощности ГТУ составляет 7,67%;

- при использовании соотношения (8), полученного по результатам теплотехнических испытаний газоперекачивающих агрегатов нового поколения, значение расхождения снижается до 7,31%.

4. Относительные приведенные обороты турбины высокого давления от относительной приведенной эффективной мощности ГТУ:

Графическая зависимость:**Аналитическое соотношение:**

$$\bar{n}_{\text{гг пр}} = \bar{N}_{\text{епр}}^{0,14}. \quad (9)$$

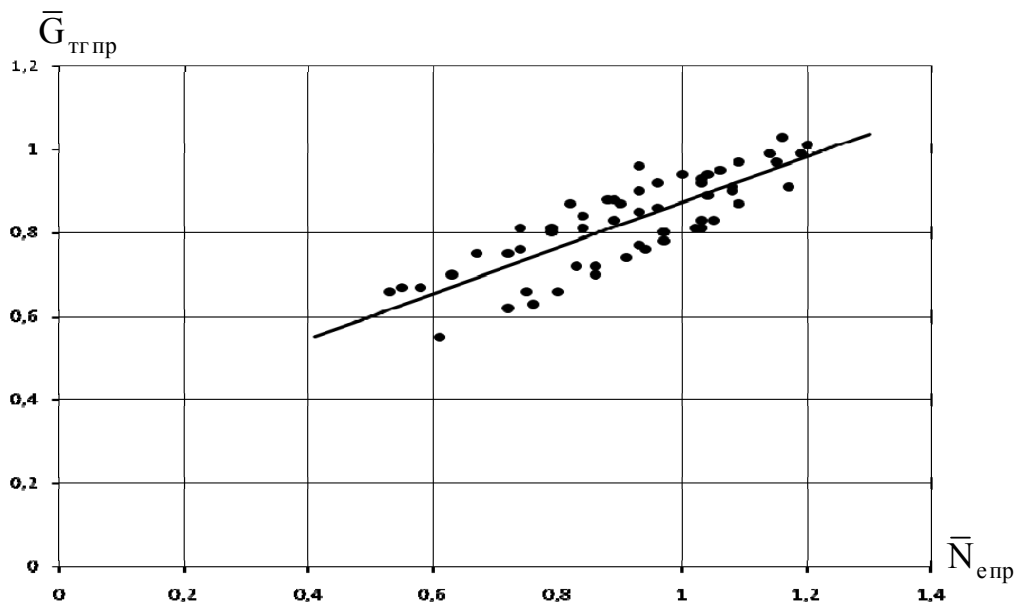
На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что:

- при использовании аналитического соотношения (9), среднее относительное расхождение оборотов турбины газогенератора составляет 1,20%. Применяя зависимость (5), предложенную ВНИИГАЗ, расхождение составляет 1,82%;

- расхождение оборотов турбины газогенератора при применении полученной зависимости (9) также снижается и для каждого типа двигателя в среднем на 0,62%.

5. Относительный расход топливного газа от относительной приведенной эффективной мощности газотурбинной установки:

Графическая зависимость:



Аналитическое соотношение:

$$\bar{G}_{\text{тг пр}} = 0,564 \cdot \bar{N}_{\text{епр}} + 0,326. \quad (10)$$

Уточненное аналитическое соотношение (10) снижает среднее относительное расхождение определения расхода топливного газа с 12,49% до 6,69%.

Выводы

1. Изменение рабочих параметров современных газотурбинных газоперекачивающих агрегатов подтверждает необходимость проверки применимости существующих обобщенных приведенных характеристик ГТУ при проведении теплотехнических расчетов агрегатов нового поколения.

2. Применение обобщенных характеристик, полученных по результатам теплотехнических испытаний современных ГПА, снижает погрешность определения выходных расчетных параметров газотурбинных установок.

3. Повышение точности определения теплотехнических показателей ГТУ приводит и к повышению достоверности результатов параметрической диагностики, которые в свою очередь необходимы для решения широкого круга энерготехнологических задач, связанных с решением вопроса энергоэффективности магистрального транспорта природного газа.

Литература

1. Антипов Б.Н. Основные задачи совершенствования эксплуатации оборудования ОАО «Газпром» по техническому состоянию // Диагностика – 2006:Шестнадцатая междунар. деловая встреча: В 2 т. М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2006. - Т. 1. с. 33-40
2. Зарицкий С.П. Диагностика газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. М.: Недра, 1987. 198 с.
3. Комплексная программа реконструкции и технического перевооружения объектов транспорта газа на период 2002 – 2006 годы. М.: ОАО «Газпром», 2001. 32 с.
4. Лопатин А.С. Термодинамическое обеспечение энерготехнологических задач трубопроводного транспорта природных газов. М.: Нефтяник, 1996. 82 с.
5. Седых А.Д. Потери газа на объектах магистрального газопровода. М.:ИРЦ Газпром, 1993. 57с.
6. Щуровский В.А., Зайцев Ю.А. Газотурбинные газоперекачивающие агрегаты. М.: Недра, 1994. 57 с.
7. Щуровский В.А., Сеницын Ю.Н., Клубничкин А.К. Газовая промышленность. М.: ВНИИЭгазпром, 1982. Вып. 2. С. 1-59. (Транспорт и хранение газа)

References

1. Antipov B.N. Osnovnye zadachi sovershenstvovaniya ekspluatatsii oborudovaniya ОАО «Gazprom» po tehničeskomu sostoyaniyu // Diagnostika- 2006 : Shestnadcataya mezhdunar. delovaya vstrecha: V 2 t. M.: ООО «IRC Gazprom», 2006. - Т. 1. 33-40 s.[in Russian].
2. Zarickii S.P. Diagnostika gazoperekachivayushih agregatov s gazoturbinnym privodom. M.: Nedra, 1987. 198 s.[in Russian].
3. Kompleksnaya programma rekonstrukcii i tehničeskogo perevooruzheniya ob'ektov transporta gaza na period 2002 - 2006 gody. M.: ОАО «Gazprom», 2001. S. [in Russian].
4. Lopatin A.S. Termodinamicheskoe obespechenie energotehnologicheskikh zadach truboprovodnogo transporta prirodnyh gazov. M.: Neftyanik, 1996. 82 s. [in Russian].
5. Sedyh A.D. Poteri gaza na ob'ektah magistral'nogo gazoprovoda. M.: IRC Gazprom, 1993. S. [in Russian].
6. Shurovskii V.A., Zaicev Yu.A. Gazoturbinnye gazoperekachivayushie agregaty. M.: Nedra, 1994. S. [in Russian].
7. Shurovskii V.A., Sinicyn Yu.N., Klubnichkin A.K. Gazovaya promyshlennost' M., VNIIEgazprom, 1982. Vyp.2 1-59. (Transport i hranenie gaza) [in Russian].

Сведения об авторе

Кротов С.И., аспирант, РГУ им. И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация
S.I. Krotov, postgraduate of Gubkin RSU of Oil and Gas, Moscow, Russian Federation
e-mail: kafedra.filial@yahoo.com