

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОПУТНЫХ ГАЗОВ В ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ, СОЗДАНЫХ В РАМКАХ КОНВЕРСИИ

©2011 А. Д. Росляков, Е. П. Кочеров, Ю. И. Цибизов

ОАО «КУЗНЕЦОВ», г. Самара

Проанализированы требования, предъявляемые к газотурбинным двигателям наземного применения, и проблемы, которые возникают при использовании в качестве топлива попутных газов и топлив, получаемых путем газификации углей. Показано, что существенной проблемой при использовании попутных газов является возможность образования конденсата углеводородных газов при повышении давления воздуха за компрессором и в каналах подачи топлива. Приемлемым вариантом решения такой проблемы может быть создание систем использования альтернативных видов топлива путем объединения средств и других ресурсов предприятий-заказчиков таких систем и предприятий-изготовителей наземных ГТД.

Газотурбинные двигатели, природный газ, альтернативное топливо.

В ОАО «КУЗНЕЦОВ» в рамках конверсии авиационных двигателей (АД) созданы для наземного применения газотурбинные двигатели (ГТД) различной мощности от 8МВт до 25МВт. Конвертируемые ГТД нашли широкое применение в наземных энергетических установках в составе газоперекачивающих агрегатов (ГПА) и качестве привода электрогенераторов. Этим двигателям присущи экономичность и эксплуатационная технологичность, малые габаритные размеры, стабильность потребительских свойств.

В работе [1] выделены следующие основные преимущества ГТД авиационного типа перед традиционными стационарными газотурбинными установками:

- относительно малые масса и габаритные размеры, блочная конструкция;
- высокая надежность, экономичность;
- простота обслуживания, высокая эксплуатационная технологичность и ремонтно-пригодность, а также высокая степень автоматизации систем управления, регулирования и контроля;
- относительно низкая стоимость и достаточно сжатые сроки перепроектирования, изготовления и доводки.

В той же работе приведены основные области применения конвертированных ГТД авиационного типа:

- привод газового компрессора в газоперекачивающих агрегатах для транспортировки природного газа;
- привод электрогенератора в агрегатах для транспортировки нефти;

- привод электрогенератора в блочно-модульных электростанциях;
- привод буровых установок;
- привод на железнодорожном транспорте;
- источника газовой струи в агрегатах очистки от снега, льда и т.д. на ВПП, железных дорогах и т.д.;
- генератора сжатого воздуха, отбираемого от компрессора для транспорта на воздушной подушке;
- источника попутного использования тепла выхлопных газов в паротурбинных, водогрейных и других системах.

При эксплуатации конвертируемых ГТД наземного применения в качестве моторного топлива в основном используют природный газ по ГОСТу [2].

Природный газ состоит из метана с примесью других углеводородов и инертных газов. Примерный состав природного горючего газа может характеризоваться следующими значениями (% по объему): метан — 85...99, этан — 1,0...8,0, пропан, бутан — 0,5...3; азот — 0,5...0,7; углекислота — до 1,8. Октановое число (ОЧ) основного компонента газа - метана имеет значение 104 единицы, тогда как у бензина высших сортов достигает 95...98 единиц.

Низшая теплота сгорания природных газов высокая — до 47 МДж/м³. По теплоте сгорания 1 м³ природного газа эквивалентен 1,0...1,12 л бензина.

Низшая теплота сгорания природного газа средневзвешенного состава при стандартных условиях (температура $t = 20^{\circ}\text{C}$ и

давление $p = 0,1013$ МПа) равняется $34,6$ МДж/м³. При стандартных условиях ($t = 0^\circ\text{C}$ и $p = 0,1$ МПа) она составляет $37,044$ МДж/м³. Природный газ месторождений ха-

рактеризуется различным составом. В зависимости от состава природного газа изменяются его теплотехнические характеристики (табл. 1).

Таблица 1. Средний состав природного газа, плотность и теплота сгорания

| Газопровод | Состав газа, %, по объему | | | | | | | $Q_{\text{н}}$ МДж/м ³ | ρ , кг/м ³ |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---|----------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₃ H ₈ | C ₄ H ₁₀ | C ₅ H ₁₂ (более) | N ₂ | CO ₂ | | |
| Брянск-Москва | 92,8 | 3,9 | 1,1 | 0,4 | 0,1 | 1,6 | 0,1 | 37,31 | 0,775 |
| Бухара-Урал | 94,2 | 2,5 | 0,4 | 0,2 | 0,1 | 2,6 | - | 36,17 | 0,752 |
| Газли-Каган- Ташкент | 94,0 | 2,8 | 0,4 | 0,3 | 0,1 | 2,0 | 0,4 | 36,26 | 0,751 |
| Газли-Каган | 95,4 | 2,6 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 1,1 | 0,2 | 36,59 | 0,750 |
| Гоголева - Полтава | 85,5 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | - | 13,7 | 0,1 | 30,98 | 0,789 |
| Дашава-Киев | 98,9 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | - | 0,4 | 0,2 | 35,88 | 0,712 |
| Джаркак- Ташкент | 95,5 | 2,7 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 1,0 | 0,1 | 36,68 | 0,748 |
| Ифим-Нижний Тагил | 95,7 | 1,9 | 0,3 | 0,3 | 0,1 | 1,3 | - | 36,47 | 0,741 |
| Карабулак- Грозный | 68,5 | 14,5 | 3,5 | 3,5 | 1,0 | 3,5 | 1,4 | 45,85 | 1,036 |
| Коробки - Камышин | 81,5 | 8,0 | 2,3 | 2,3 | 0,5 | 3,2 | 0,5 | 41,45 | 0,901 |
| Коробки-Лог- Волгоград | 93,2 | 1,9 | 0,3 | 0,3 | 0,1 | 3,0 | 0,7 | 35,84 | 0,766 |
| Кумертау-Магнитогорск | 71,7 | 5,3 | 0,9 | 0,9 | 0,3 | 8,8 | 0,1 | 36,80 | 0,858 |
| Лижво - Вольск | 93,2 | 2,6 | 1,2 | 0,7 | - | 2,0 | 0,3 | 37,01 | 0,782 |
| Оренбург - Совхозное | 91,4 | 4,1 | 1,9 | 0,6 | - | 0,2 | 0,7 | 38,02 | 0,883 |
| Первомайск - Сторожевка | 62,4 | 3,6 | 2,6 | 0,9 | 0,2 | 30,2 | 0,1 | 28,30 | 0,952 |
| Промысловка- Астрахань | 97,1 | 0,3 | 0,1 | - | - | 2,4 | 0,1 | 35,04 | 0,733 |
| Рудки-Минск-Вильнюс | 95,6 | 0,7 | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 2,8 | 0,1 | 35,51 | 0,740 |
| Саратов- Нижний Новгород | 91,9 | 2,1 | 1,3 | 0,4 | 0,1 | 3,0 | 1,2 | 36,13 | 0,786 |
| Саратов-Москва | 78,2 | 4,4 | 2,2 | 0,7 | 0,2 | 14,2 | 0,1 | 34,16 | 0,879 |
| Средняя Азия- Центр | 93,8 | 3,6 | 0,7 | 0,2 | 0,4 | 0,7 | 0,6 | 37,56 | 0,776 |
| Ставрополь - Грозный | 98,2 | 0,4 | 0,1 | 0,1 | - | 1,0 | 0,2 | 35,63 | 0,728 |
| Ставрополь - Москва | 93,8 | 2,0 | 0,8 | 0,3 | 0,1 | 2,6 | 0,4 | 36,09 | 0,764 |
| Угерско- Львов | 98,5 | 0,2 | 0,1 | - | - | 1,0 | 0,2 | 35,50 | 0,722 |
| Урицк-Сторожевка | 91,9 | 2,4 | 1,1 | 0,8 | 0,1 | 3,2 | 0,5 | 36,47 | 0,789 |
| Щебелинка- Харьков | 92,8 | 3,9 | 1,0 | 0,4 | 0,3 | 1,5 | 0,1 | 37,31 | 0,781 |
| Щебелинка- Москва | 94,1 | 3,1 | 0,6 | 0,2 | 0,8 | 1,2 | - | 37,87 | 0,776 |

В соответствии с ГОСТом природные горючие газы промышленного применения должны соответствовать следующим требованиям и нормам:

- теплота сгорания низшая при $t = 20^\circ\text{C}$ и $P_{\text{н}} = 101,325$ кПа не менее $31,8$ МДж/м³;
- массовая концентрация сероводорода не более $0,02$ г/м³;
- массовая концентрация меркаптановой серы не более $0,036$ г/м³;
- объемная доля кислорода не более 1% ;
- масса механических примесей в 1 м³ не более $0,001$ г.

Кроме того, в ГОСТе оговорено:

«1.2. Точка росы влаги в пункте сдачи должна быть ниже температуры газа.

1.3. Наличие в газе жидкой фазы воды и углеводородов не допускается и является факкультативным до 01.01.89.»

В ходе создания и доводки по надежности и параметрам конвертируемых ГТД имеет место ряд проблем, в том числе необходимо значительно увеличивать межремонтный и гарантийный ресурсы двигателей и решать задачи использования альтернативных видов топлива.

К альтернативным видам топлива в данной статье отнесены все газовые топлива,

которые по свойствам не соответствуют ГОСТу [2] на природный газ. За последние два десятка лет в ОАО «КУЗНЕЦОВ» поступали предложения о возможности создания блочно-модульных газотурбинных электростанций мощностью до 30 МВт, работающих:

- на попутном нефтяном газе (месторождение «Порта-Тест», нефтяная компания «Томскнефть», ОАО «ТомскНИПИнефть ВНК», «Оренбургнефть», ДНС Крапивинского месторождения, Двуреченское месторождение, Восточно-Сибирская нефтегазовая компания);
- на пропанобутановой фракции (нефтяная компания ЮКОС);
- на газе, полученном путем газификации угля (Горнорудное ОАО «Апартак», ОАО «Кокс», г. Кемерово).

При решении задачи использования альтернативных видов топлива при эксплуатации конвертируемых ГТД возникают дополнительные проблемы. К наиболее характерным проблемам относятся повышенное содержание серосодержащих соединений, в ряде случаев пониженная теплотворная способность топлива и наличие в газе жидких фракций.

Вопросы совершенствования технологий удаления серосодержащих соединений из углеводородных топлив решаются в институтах и других подразделениях нефтегазовой отрасли.

Проблемы, связанные с пониженной теплотворной способностью топлива, могут быть решены различными путями в зависимости от степени понижения теплотворной способности. Так, при понижении на 15...20% возможно поддержание параметров двигателя, в том числе мощности и частоты вращения ротора, путем перенастройки агрегатов автоматического регулирования на другие характеристики подачи топлива. При дальнейшем понижении теплотворной способности топлива возникает необходимость изменения проходных сечений каналов и в некоторых случаях более существенная переделка конструкции элементов агрегатов регулирования и топливоподводящих каналов и форсунок камер сгорания.

В табл. 2 приведен состав попутного нефтяного газа некоторых месторождений нефтегазовой отрасли.

Если теплотворная способность топлива уменьшается в разы (например, топливный газ подземной газификации одного из предприятий имеет теплотворную способность 3,4...4,2 МДж/м³ вместо 34,6 МДж/м³ у природного газа), требуется существенная переделка конструкции камеры сгорания, топливорегулирующей аппаратуры и турбины двигателя. Это приводит к проведению цикла опытно-доводочных работ в условиях конкретного месторождения, что связано со значительными организационными и финансовыми проблемами, а также с техническим риском.

Наличие в газе жидких фракций является наиболее существенной и комплексной проблемой. Известно [4], что с повышением давления повышается температура кипения жидкости. В табл. 3 приведены некоторые данные по температуре кипения составляющих топливного газа при разных давлениях.

В рамках улучшения параметров цикла ГТД постепенно по мере совершенствования охлаждения лопаток турбины, повышения жаропрочности материала лопаток и повышения температуры газа перед турбиной появляется возможность повышения степени сжатия воздуха в компрессоре и давления воздуха в камере сгорания. При этом, как следствие, пропорционально возрастает давление газа в коллекторах и форсунках камеры сгорания и элементах топливной системы двигателя.

Так, например, у двигателя НК-14СТ-10 давление воздуха в камере сгорания на номинальном режиме равно 1,077 МПа, а у двигателя НК-36СТ достигает значения 2,31 МПа.

Если в попутном газе имеется бутан или пентан, то его температура для исключения жидкой фракции должна быть выше 125°C или 180°C соответственно. Существующие в настоящее время агрегаты дозировки газового топлива не приспособлены для работы при таких температурах.

Таблица 2. Состав попутного нефтяного газа, плотность и теплота сгорания

| Предприятие | | Состав газа по массе, % | | | | | | Теплота, МДж/м ³ | ρ, кг/м ³ | |
|----------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|--|----------------|--------------------------------|-------------------------|-----------------|
| | | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₃ H ₈ | n-C ₄ H ₁₀ + и-C ₄ H ₁₀ | C ₅ H ₁₂ и более тяжелые | N ₂ | | | CO ₂ |
| Оренбург- нефть | Лебяжинское, пласт Д ₁ | 24,01 | 25,9 | 24,04 | 13 | 9,97 | 1,83 | 1,25 | | 1,259 |
| | Исаковский купол Д ₁ | 33,21 | 14,97 | 13,87 | 16,87 | 17,98 | 0,87 | 2,04 | | 1,193 |
| | Родниковка | 36,44 | 20,52 | 20,52 | 7,69 | - | 14,03 | 0,4 | | 1,274 |
| | Романовка | 49,29 | 15,93 | 15,94 | 8,93 | - | 9,2 | 0,71 | | 1,183 |
| ДНС Крапивинского местор. | | 56,62 | 9,25 | 15,05 | 9,35 | 1,3 | 3,12 | 2,01 | 59,1 | 1,214 |
| ОРГЭНЕРГО- СТРОЙ | 1 месторождение | 71,38 | 8,06 | 8,8 | 5,78 | 3,28 | 2,69 | 0,4 | | |
| | 2 месторождение | 82,3 | 2,27 | 1,87 | 1,42 | 1,79 | 2,02 | 6,21 | | |
| | 3 месторождение | 65,6 | 9,9 | 7,1 | 2,0 | 1,62 | 11,6 | 1,3 | | |
| | 4 месторождение | 64,0 | 14,47 | 9,9 | 3,22 | 1,76 | 6,86 | 0,1 | | |
| | 5 месторождение | 58,28 | 15,95 | 14,18 | 5,57 | 2,37 | 2,95 | 1,14 | | |
| Двуреченское месторождение | | 54,69 | 8,04 | 16,14 | 10,96 | 4,3 | 2,58 | 3,29 | 60,04 | 1,253 |
| Юрубченское месторождение | | 81,8 | 6,06 | 1,67 | 0,34 | 0,51 | 9,02 | 0,08 | 44,5 | 0,921 |
| Томск- нефть | Игольско-Таловое | 72,13 | 8,71 | 11,14 | 3,53 | 1,86 | 1,2 | 1,43 | | 1,05 |
| | Ломовое | 62,12 | 12,46 | 14,8 | 5,76 | 1,97 | 1,05 | 1,84 | | 1,169 |
| | Западно-Полуденное | 89,61 | 2,14 | 1,72 | 2,64 | 1,6 | 1,85 | 0,29 | | 0,852 |
| ТомскНИПИ нефть | п. Пионерный | 75,14 | 8,31 | 9,05 | 4,17 | 1,28 | 2,07 | 1,98 | 43,38 | 0,948 |
| | Колотушное | 69,04 | 6,26 | 11,15 | 7,9 | 3,0 | 0,5 | 1,89 | 50,38 | 1,08 |
| | Двуреченское | 54,69 | 8,04 | 16,14 | 10,96 | 4,3 | 2,58 | 3,29 | 54,62 | 1,282 |
| | Чкаловское | 56,52 | 9,63 | 15,01 | 10,49 | 5,21 | 0,94 | 2,2 | 58,23 | 1,283 |
| | Западно-Останкинское | 76,49 | 5,73 | 7,99 | 5,04 | 1,91 | 1,78 | 1,06 | 48,44 | 0,951 |
| Малореченское | | 74,18 | 5,57 | 8,33 | 6,4 | 2,21 | 1,6 | 1,64 | 46,0 | 0,992 |

Таблица 3. Температура кипения основных составляющих топливного газа при разных давлениях

| Название | Формула | Температура кипения, °С | | |
|------------|--------------------------------|-------------------------|-------------|-------------|
| | | P = 0,1 МПа | P = 2,5 МПа | P = 4,0 МПа |
| Метан | CH ₄ | - 161 | - 101 | - 87 |
| Этан | C ₂ H ₆ | - 89 | 2 | 22 |
| Пропан | C ₃ H ₈ | - 42 | 68 | 94 |
| n - Бутан | C ₄ H ₁₀ | 0 | 125 | 152 |
| n - Пентан | C ₅ H ₁₂ | 40 | 180 | 196 |

Исходя из вышеизложенного, следует, что для обеспечения возможности использования альтернативных видов топлива требуется полномасштабная доводка базовых двигателей и оборудования подготовки газовых топлив. Приемлемым вариантом решения такой проблемы может быть создание систем использования альтернативных видов топлива путем объединения средств и других ресурсов предприятий - заказчиков таких систем и предприятий - изготовителей наземных ГТД.

Библиографический список

1. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения [Текст] / Е.А. Гриценко, В.П. Данильченко, С.В. Лукачев [и др.] - Самара: Самарский научный центр РАН, 2004. - 266 с.
2. ГОСТ 5542-87. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения: технические условия. [Текст] – М.: Изд-во стандартов, 1996.

3. ГОСТ 30319.3-96. Газ природный. Методы расчёта физических свойств. Определение физических свойств по уравнению состояния. [Текст] – М.: Изд-во стандартов, 1996.

4. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей [Текст] / Н.Б. Варгафтик – М.: Наука, 1972. – 721 с.

POSSIBILITY OF USE OF PASSING GASES IN GASTURBINE ENGINES CREATED WITHIN THE LIMITS OF CONVERSION

© 2011 A. D. Rosljakov, E. P. Kocherov, Ju. I. Tsibizov

Open Society "KUZNEZOV", Samara

The requirements shown to газотурбинным to engines of land application and a problem which arise at use as fuel of passing gases and топлив, coals received by gasification are analysed. It is shown that a vital issue at use of passing gases is possibility of formation of a condensate of hydrocarbonic gases at increase of pressure of air behind the compressor and in channels of giving of fuel. Creation of systems of use of alternative kinds of fuel by association of means and other resources of the enterprises of customers of such systems and the enterprises of manufacturers land ГТД can be a comprehensible variant of the decision of such problem.

Gasturbine engines, the natural gas, alternative fuel.

Информация об авторах

Росляков Алексей Дмитриевич, доктор технических наук, главный специалист Инженерного центра ОАО "Кузнецов". Тел.: (846) 246-91-84. E-mail: roslykov_ad@mail.ru. Область научных интересов: вопросы горения и теплопередачи, образование углеродистых отложений в топливных каналах, экология.

Кочеров Евгений Павлович, генеральный конструктор ОАО «Кузнецов». Тел.: 8(846) 955-07-94. E-mail: kotherov@motor-s.ru. Область научных интересов: прочность и работоспособность элементов горячей части ГТД, вопросы охлаждения и теплопередачи, экология.

Цибизов Юрий Ильич, доктор технических наук, начальник отдела Инженерного центра ОАО «Кузнецов». Тел.: 8(846) 998-54-30. Область научных интересов: газовая динамика сверхзвуковых течений в каналах и соплах, вопросы горения и теплопередачи.

Rosljakov Alexey Dmitrievich, Doctor of technical Sciences, the Chief specialist of the Engineering center of Open Society "KUZNEZOV". Phone: (846) 246-91-84. E-mail: roslykov_ad@mail.ru. Area of research: burning and heat transfer questions, formation of carbonaceous adjournment in fuel channels, ecology.

Kocherov Evgenie Pavlovich, the General designer of Open Society "KUZNEZOV". Phone: (846) 955-07-94. E-mail: kotherov@motor-s.ru. Area of research: durability and working capacity of elements of hot part ГТД, cooling and heat transfer questions, ecology.

Tsibizov Yuriy Illich, Doctor of technical Sciences, the Chief of department 3 Engineering centers of Open Society "KUZNEZOV". Phone: (846) 998-54-30. Area of research: gas dynamics of supersonic currents in channels and nozzles, burning and heat transfer questions, ecology.