

УДК 532.516: 536.2401

Халатов А.А.¹, Долинский А.А.¹, Костенко Д.А.², Парафейник В.П.³¹Институт технической теплофизики НАН Украины²ВНИПИТрансГаз³СКТБ НПО им. М.В. ФрунзеСОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА
ДЛЯ ГТС УКРАИНЫ

Представлено аналіз основних проблем, пов'язаних з модернізацією газотурбінного приводу на газотранспортній системі України.

Представлен анализ основных проблем, связанных с модернизацией газотурбинного привода на газотранспортной системе Украины.

The analysis is given describing the main problems associated with mechanical drive gas turbines modernization in the Ukrainian pipelines.

Введение

Основными проблемами экономики Украины являются высокая энергоемкость внутреннего валового продукта (ВВП), значительный дефицит нефти и природного газа, продолжающийся рост мировых цен на энергоносители. По данным Международного энергетического агентства (Key World Statistics, IEA, 2006) энергоемкость ВВП Украины, составляет 0,55 кг нефтяного эквивалента (н.э.) на один доллар США, что в 2,5 раза превышает средний уровень энергоемкости ВВП наиболее развитых стран мира. Так например, в Дании он составляет 0,13, в США – 0,22, в России – 0,49. В соответствии с Энергетической стратегией Украины к 2030 г. в Украине планируется снижение энергоемкости ВВП до 0,24 кг н.э. на один доллар США, главным образом, за счет реализации потенциалов энергоэффективности и энергосбережения.

Наиболее энергоемкими отраслями Украины являются жилищно-коммунальный сектор, металлургическая и химическая промышленность, производство строительных материалов. В последние годы серьезные проблемы возникли и в газотранспортной системе Украины (ГТС), где эксплуатация морально устаревших и физически изношенных приводных газовых турбин с низким коэффициентом полезного действия (КПД) на уровне

18...27 % приводит к большим затратам природного газа на собственные нужды. В 2006 г. они составили 4,9 млрд. м³ газа, при этом «пережог» по сравнению с лучшими зарубежными приводными газотурбинными двигателями (ГТД), КПД которых в классе мощности 6...25 МВт составляет 34...38 %, достигает 2,0 млрд. м³ газа [1, 2]. На газопроводах России вследствие низкой экономичности механического привода на транспортировку тратится по меньшей мере 8 % добываемого газа.

Основная причина эксплуатации устаревших газотурбинных двигателей на ГТС Украины обусловлена хронически недостаточным финансированием программ реконструкции компрессорных станций ДК «Укртрансгаз», которые с 1992 г. финансировались только на 10...15 % от необходимых потребностей. Дальнейшая эксплуатация физически изношенных и морально устаревших ГТД ведет к постепенной деградации газотранспортной системы Украины и ее неспособности обеспечивать надежный транзит газа в Европу и его подачу для внутренних потребностей страны.

По оценкам специалистов полная модернизация ГТС Украины потребует от 6,0 до 16,0 млрд. долл. США. Больше всего средств требуется на реконструкцию и строительство компрессорных станций и замену газотурбинных

приводов (около 1,5 млрд. долл. США), а также на модернизацию линейной части газопроводов и подземных хранилищ газа. После завершения модернизации, кроме повышения надежности и улучшения экономичности ГТС, ее пропускная способность возрастет почти на 20,0 млрд. м³ природного газа.

23 марта 2009 г. в г. Брюсселе состоялась инвестиционная конференция по вопросам модернизации ГТС Украины. Правительство Украины, Еврокомиссия, Европейский банк реконструкции и развития (ЕБРР), Европейский инвестиционный банк (ЕИБ) и Всемирный банк (ВБ) подписали Совместную декларацию по модернизации ГТС Украины, которая, как предполагается, начнется в 2010 г. Предполагается, что для этих целей Национальная компания «Нафтогаз Украины» получит льготный кредит в размере 2,5 млрд. долл. США.

Газотранспортная система Украины

Газотранспортная система Украины является второй в Европе и одной из крупнейших в мире, а ее общая протяженность составляет 37,6 тыс. км. Общая длина распределительных сетей Украины составляет более 246 тыс. км. Основной особенностью ГТС Украины является большая протяженность магистральных газопроводов, длина которых составляет 22,2 тыс. км, причем 14 тыс. км – трубопроводы большого диаметра $d = 1020...1420$ мм. Годовая пропускная способность ГТС составляет на входе 290 млрд. м³, а на выходе – 175 млрд. м³. В 2007 г. транзит газа в Европу составил 115 млрд. м³, а в 2008 г. – 120 млрд. м³.

ГТС Украины включает 72 компрессорные станции (КС) с 765 газоперекачивающими агрегатами (ГПА) общей мощностью 5,6 млн. кВт. В состав ГТС также входят 1600 газораспределительных станций (ГРС), 13 подземных хранилищ газа общим объемом 32 млрд. м³ (комплексы: Западноукраинский, Киевский, Донецкий и Южноукраинский), что составляет 21,3 % от общеевропейской активной ёмкости, 6 приграничных газоизмерительных станций и 89 автомобильных газонаполнительных станций. Для

сравнения ГТС России включает 276 компрессорных станций суммарной мощностью 46,1 млн. кВт.

Первый газопровод на территории Украины был построен в 1924 г. от поселка Дашава до г. Стрый, а в 1948 г. построен газопровод «Дашава-Киев». Этот год считается годом основания газотранспортной системы Украины. На то время газопровод «Дашава-Киев» был самым мощным в Европе, его пропускная способность составляла около 2,0 млрд. м³ газа в год. В 1951 г. газопровод «Дашава-Киев» был продлён до Москвы.

Наиболее бурное развитие ГТС Украины получила в 60-70 годы прошлого века. В 1967 г. после введения в эксплуатацию магистрального газопровода «Долина-Ужгород-Западная граница» (газопровод «Братство») началась подача украинского и российского газа в страны Центральной и Западной Европы; таким образом, Украина стала одной из крупнейших транзитных стран. В 70-80 гг. прошлого века началось строительство трансконтинентальных газопроводов «Союз», «Уренгой-Ужгород», «Прогресс» и ряда других.

Сегодня на компрессорных станциях Украины в качестве механического привода компрессоров применяются газовые турбины, а также электроприводы и двигатели внутреннего сгорания. Газотурбинный привод в количестве 455 единиц общей мощностью 4,6 млн. кВт является доминирующим, а его мощность составляет более 82 % общей мощности силовых агрегатов, установленных на ГТС Украины. Он включает промышленные газовые турбины (267 ед.), конвертированные авиационные (98 ед.) и судовые газотурбинные двигатели (90 ед.). Газотурбинный привод мощностью 12...30 МВт превалирует и на большинстве магистральных газопроводов мира (Германия, Италия, Польша, Словакия, Канада, Иран и др.). В частности, на российской ГТС доля газотурбинного привода составляет 86,9 %.

Статистические данные, представленные в работе [5], показывают, что в 2007-2008 г.г. в

мире были заказаны 252 газовые турбины механического привода мощностью от 1,0 до 60 МВт (245 ед. – на природном газе), причем подавляющее большинство из них (210 ед.) – мощностью от 7,5 до 30,0 МВт. Основные заказчики газовых турбин в этом диапазоне – страны Ближнего Востока (Катар, Иран – 103 ед.), а также Россия и страны Восточной Европы (67 ед.). Такая структура рынка приводных газовых турбин обусловлена широким развитием магистральных газопроводов большого диаметра в этих странах. В то же время Северная Америка заказала только 4 ед. (10...15 МВт), Южная Америка – 3 ед. (10...15 МВт), страны Западной Европы – 2 ед. (20...30 МВт). Для сравнения отметим, что в 2006-2007 г.г. мировой заказ составил 139 газовых турбин мощностью 7,5...30,0 МВт (77 ед. – для России и стран Восточной Европы, 13 ед. – для стран Ближнего Востока).

В настоящее время на украинской ГТС установлены 158 электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) общей мощностью 820 МВт, что составляет 14,6 % мощности компрессорных станций. Однако фактически эксплуатируются не более 10 ЭГПА, которые, в свою очередь, используются только на 15...18 %. Во Франции, где производится большое количество электрической энергии атомными станциями, в подавляющем большинстве используются ЭГПА мощностью 3...7 МВт. Это обусловлено тем, что ГТС Франции практически не содержит магистральных трубопроводов, а представляет собой систему относительно коротких газопроводов небольшого диаметра, соединенных между собой в единую газотранспортную сеть. В США ЭГПА используются, главным образом, в экологически чистых зонах для снижения шума от работающих агрегатов.

ЭГПА с регулируемой частотой оборотов нагнетателя представляют определенную перспективу для использования в качестве механического привода на магистральных газопроводах Украины, главным образом в регионах с избыточным производством электричества. Однако следует помнить, что КПД системы «ТЭЦ–ЛЭП–КС–ЭГПА» составляет только 26...27 %,

поэтому с точки зрения использования химической энергии топлива применение электроприводных агрегатов может оказаться неэффективным.

Расчеты, выполненные Министерством топлива и энергетики Украины и ВНИПИ-ТрансГаз [3], показали, что при существующем соотношении цены на природный газ и электричество масштабный перевод на ЭГПА оправдан только при цене топливного газа более \$ 450 за 1000 м³ газа. Кроме того, для широкого применения электроприводных ГПА Украине необходимо освоить производство электродвигателей мощностью 12, 16, 25 МВт с регулируемой частотой оборотов, которые сегодня производятся только зарубежными фирмами (SIEMENS, ABB, TRANSRESCH и др.). И наконец, для ЭГПА требуется электроснабжение первой категории (от двух независимых источников), что значительно усложняет условия эксплуатации силовых агрегатов.

Более подробный анализ с учетом капитальных затрат и возможного роста цен на природный газ и электричество показывает, что компрессорные станции Украины условно можно разделить на три группы (см. комментарий к статье [3]). Первая группа характеризуется высокими значениями удельных затрат на создание внешнего электрообеспечения. К ним относятся компрессорные станции (КС) «Первомайск» и «Гусятин» (газопровод «Союз»), КС «Заднепровская» (газопровод «Елец-Кременчуг-Кривой Рог») и др. Вторая группа, к которой относятся КС «Кременчуг» и «Тальное» (газопровод «Союз»), КС «Долина», «Ромны», «Кировоградская» и «Южно-Бужская» (газопровод «Елец-Кременчуг-Кривой Рог»), а также некоторые другие, характеризуется средними значениями удельных затрат. И наконец, третья группа, к которой относятся КС на газопроводе «Киев-Запад Украины» («Бердичев», «Красилов», «Тернополь», «Рогатин» и др.) характеризуется наилучшими значениями удельных показателей.

Для первых двух групп при всех ценах на природный газ и электричество удельные за-

траты по переводу КС на электропривод выше стоимости газотурбинного привода. При этом, вторая группа может стать конкурентной только при уменьшении цены на электричество на 5...7 %. У третьей группы для компрессорных станций «Красилов», «Тернополь» и «Рогатин» удельные затраты на создание электро- и газотурбинного привода примерно сравнимы между собой, а для КС «Бердичев» использование электропривода при всех ценах более привлекательно.

Срок окупаемости проектов по переводу ГТС Украины на электропривод достаточно большой и составляет около 10 лет. При этом экономия природного газа для третьей группы составит 250 млн. м³ природного газа в год, а для второй (при условии снижения цены на электричество на 5...7 %) – около 700 млн. м³ в год. Суммарная цифра – около 1,0 млрд. м³ в год в масштабе Украины не представляется значительной.

Мощность поршневых газоперекачивающих агрегатов (ПГА), установленных на ГТС Украины, составляет менее 3 % от мощности всех силовых агрегатов. Они широко использовались на ранней стадии создания украинской ГТС. В настоящее время они продолжают применяться на газопроводах-ответвлениях малого диаметра, однако их единичная мощность не превышает 3,0 МВт (например, 10ГК; 10ГКН). В США ПГА в большом количестве (несколько тысяч штук) используются, главным образом, на газопроводах малого диаметра, при этом их мощность составляет от 1 до 5 МВт.

В целом, при анализе возможности использования газопоршневых двигателей (ГПД) на ГТС Украины следует иметь в виду следующие важные факторы:

1. Весовые характеристики ГПД в 25...40 раз хуже, чем у газотурбинных установок (рис. 1). Для газотурбинных установок они составляют (0,25...1,0) кг/кВт установленной мощности, а для ГПД – (8...25) кг/кВт. Габаритные характеристики ГТД также на порядок лучше, чем ГПД. Для ГТД они составляют $(0,1...0,2) \cdot 10^{-2}$ м³/кг, а для ГПД – $(0,2...0,6) \cdot 10^{-1}$ м³/кг.

Например, газотурбинная установка UGT-110000 (ГП НПКГ «Зоря-Машпроект», Николаев) электрической мощностью 114,0 МВт имеет удельную массовую характеристику 0,52 кг/кВт, а ГТД АИ-336 (ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье) при электрической мощности 8,0 МВт – всего 0,18 кг/кВт. Для сравнения: достаточно совершенный ГПД «Jenbacher-J-620-GS» (Австрия) при мощности 3,1 МВт имеет вес 30400 кг и габариты 8,9x2,5x2,8 м³. Его удельная масса составляет 9,8 кг/кВт, а удельные габариты – 0,02 м³/кг. Как следует из этих показателей, лучшие ПГА мощностью 25 МВт будут иметь массу не менее 200 т.

2. Другим недостатком ПГА, значительно усложняющим условия их эксплуатации, является большой расход смазочного масла, который составляет 0,25...0,33 г/кВт·ч. Одновременно возникает проблема утилизации на месте отработанного масла или его транспортировки к месту утилизации.

Анализ тенденций мирового рынка показывает [5], что в 2007-2008 г.г. общий заказ двигателей внутреннего сгорания для использования в качестве механического привода составил 6851 ед., причем 6688 из них – мощностью 0,5...2,0 МВт (72 % – на жидком топливе) и только 154 ед. – мощностью 2,0...3,5 МВт. Интересно отметить, что Северная Америка, где широко используются газопроводы малого диаметра, заказала 4825 двигателей мощностью 0,5...2,0 МВт (70,4 %), а страны Западной Европы – 930 ед. Страны Восточной Европы и Россия заказали только 40 двигателей мощностью 0,5...2,0 МВт, а страны Ближнего Востока – 43. Для сравнения отметим, что в 2006-2007 г.г. всего в мире были заказаны 6389 двигателей, причем 6131 из них – в диапазоне 0,5...2,0 МВт (70 % – на жидком топливе). Подавляющее большинство из них были установлены в Северной Америке (4848 ед.) и странах Западной Европы (581 ед.).

Проблемы ГТС Украины и пути их решения

В последние годы в работе газотранспорт-

ной системы Украины возникли серьезные проблемы, главная из которых связана с тем, что более 70 % ГПА с газотурбинным приводом уже практически выработали свой ресурс (100 тыс. часов), а некоторые (КС «Новопсков» газопровода «Союз») проработали уже более 150 тыс. часов. В период с 2009 по 2016 г.г. плановой замене подлежат 204 ГТД, т.е. в среднем по 20...25 единиц в год. Другой проблемой является низкая экономичность (КПД) морально устаревших ГТД, которая составляет всего 18...27 %. Сегодня основные показатели большинства эксплуатируемых ГТД существенно ниже зарубежных газотурбинных двигателей механического привода аналогичной мощности, которые имеют полный ресурс до 150 тыс. ч. и КПД на уровне 34...38 %.

Выход из создавшейся ситуации состоит в разработке нового поколения украинских газотурбинных двигателей, концептуально предназначенных для эксплуатации на ГТС Украины. Наиболее важными качествами таких ГТД в порядке их ранжирования являются безопасность и надежность при длительной эксплуатации, высокая экономичность (КПД), относительная простота конструкции и эксплуатации, низкая

стоимость жизненного цикла. Промышленные ГТД для газотранспортной системы должны создаваться с учетом специфики их эксплуатации на газопроводах. При этом высокие характеристики ГТД могут быть достигнуты только за счет использования современных газотурбинных технологий, применяемых в авиационных и судовых ГТД военного назначения.

Газотурбостроение относится к одной из наиболее наукоемких отраслей энергетического машиностроения. Украина входит в десятку ведущих стран мира, обладающих полным циклом разработки и производства промышленных, авиационных и судовых газотурбинных двигателей и имеет все возможности для самостоятельной разработки ГТД нового поколения для газотранспортной системы Украины. Основу инфраструктуры украинского газотурбостроения составляют три предприятия – ГП НПКГ «Зоря-Машпроект» (Николаев), комплекс ГП «Ивченко-Прогресс» и ОАО «МоторСіч» (оба – Запорожье), а также ОАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе», которое является ведущим предприятием в мире по выпуску газоперекачивающих агрегатов.

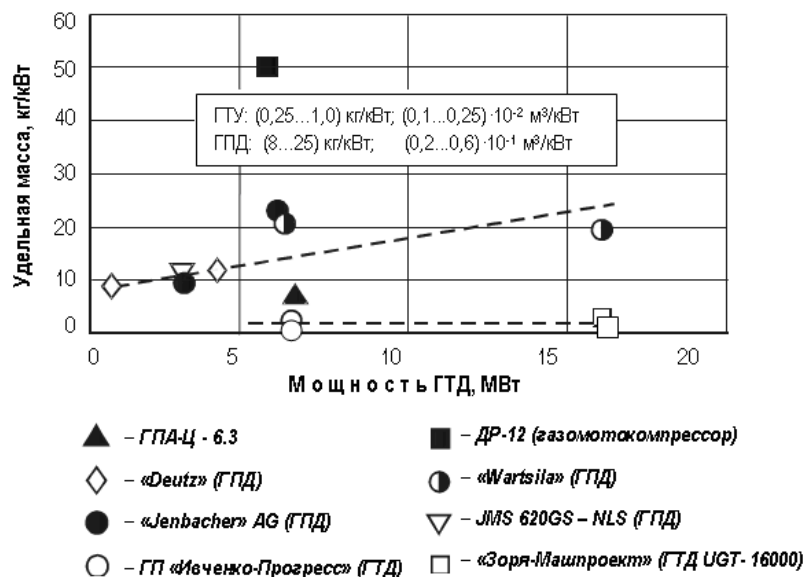


Рис. 1. Массогабаритные характеристики газотурбинных двигателей, газопоршневых двигателей и агрегатов.

Экономичность газотурбинного привода

Хотя экономичность не играет главную роль при создании ГТД для газотранспортной системы, но показатели работы ГТС очень важны для сокращения собственного потребления газа и снижения выбросов окиси (СО) и двуокиси углерода (СО₂) в атмосферу. Достижение высокой экономичности ГТД связано, в первую очередь, с величиной температуры газа после камеры сгорания (перед газовой турбиной).

Современный уровень газотурбинных тех-

нологий при ресурсе ГТД до 100 тыс. ч. практически не позволяет повысить КПД двигателя, работающего по простому циклу, выше 34 % при мощности 10 МВт и 38 % – при мощности 25 МВт (рис. 2). Это обусловлено проблемами создания стойких к коррозии материалов, а также отсутствием надежных технологий изготовления и защиты элементов «горячего» тракта газовой турбины, контактирующих с высокотемпературными и химически агрессивными продуктами сгорания природного газа.

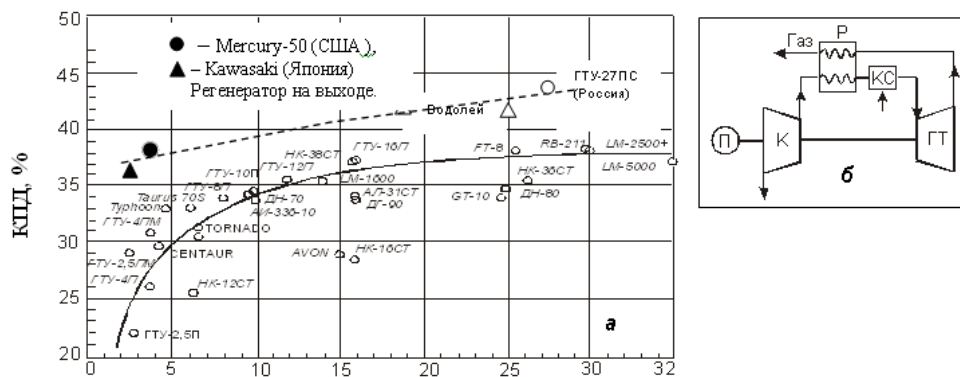


Рис. 2. а: Зависимость КПД газотурбинных двигателей механического привода от их мощности (пунктирная линия: сложные термодинамические циклы); б: схема ГТД механического привода (К – компрессор; КС – камера сгорания; Р – регенератор; ГТ – газовая турбина).

В связи с тем, что газотурбинные двигатели простого цикла имеют серьезные ограничения по дальнейшему росту температуры газа перед турбиной, в последние годы конструкторы ГТД большое внимание уделяют промышленным газотурбинным двигателям, работающим по сложному термодинамическому циклу. К ним относятся утилизация тепловой энергии горячего газа на выходе из турбины, промежуточное охлаждение воздуха в компрессоре и промежуточный подогрев продуктов сгорания в турбине, использование воздушного цикла и некоторые другие. Использование регенератора на выходе («Mercury-50»-США, «Kawasaki»-Япония), цикла «Водолей» (Украина), воздушного цикла («ГТУ 27ПС»-Россия) позволили повысить КПД

(рис. 2) и удельную мощность газотурбинных двигателей без существенного увеличения температуры продуктов сгорания после камеры сгорания и, тем самым, использовать при создании новых ГТД современных конструктивных материалов и проверенных временем газотурбинных технологий. Но освоение сложных циклов сопряжено с усложнением конструкции газотурбинного двигателя, увеличением стоимости его производства и сложностью технического обслуживания.

Наиболее простой из сложных циклов – регенеративный цикл, который основан на использовании на выходе газовой турбины, где температура потока составляет 450...550 °С, регенератора теплоты (теплообменника) для

утилизации тепловой энергии и частичного возврата энергии за счет подогрева сжатого воздуха, поступающего в камеру сгорания из компрессора. Однако современные регенераторы имеют низкую тепловую эффективность, характеризуются частой разгерметизацией и разрушением конструкции вследствие тепловых напряжений, постепенным ухудшением эксплуатационных характеристик вследствие загрязнения поверхности, большими размерами по сравнению с ГТУ, высокой стоимостью, низкой эксплуатационной надежностью и ресурсом.

Основные требования к регенераторам для ГТД механического привода состоят в следующем: тепловая эффективность на уровне 0,82...0,88, суммарные относительные потери давления – 4...8 %, ресурс – 60000...100000 ч., число циклов пуск/останов – не менее 2000...5000. Утечки сжатого воздуха в новом регенераторе не должны превышать 0,1...0,2 % от его расхода через регенератор. Удельная стоимость регенератора при серийном производстве не должна превышать 40...100 долларов США за один кВт тепловой мощности, а весовая характеристика – 3...4 кг на один кВт тепловой мощности. Высокая эффективность может быть достигнута за счет интенсификации теплообмена как внутри труб регенератора так и в межтрубном пространстве. Для этого могут быть использованы проверенные технологические решения, такие как змеевиковые и дисковые теплообменные элементы.

Расчеты показывают, что использование регенеративного цикла с высоким коэффициентом регенерации (0,82...0,88) позволит в диапазоне мощности 6...25 МВт при современном уровне газотурбинных технологий повысить КПД газотурбинного двигателя механического привода с 18...27 % (украинская ГТС сегодня) до 38...41 %. Это даст возможность снизить расход природного газа на собственные нужды почти на 2,0 млрд. м³ в год, что эквивалентно 360 млн. долл. США (в ценах 2008 г.). Немаловажен и тот факт, что при достижении указанных параметров ежегодные выбросы двуокиси углерода в атмосферу снизятся почти на 3,5 млн. т., что соз-

даст дополнительный резерв для экономики страны за счет ежегодной продажи квоты CO₂ стоимостью 100...120 млн. долл. США.

В России освоение регенеративного цикла с использованием новых технологий началось более десяти лет назад при модернизации газотурбинных установок ГТК-10-4, ГТК-10И, ГТ-750-6 (ОАО «Газпром»). За счет установки модульных трубчатых регенераторов со степенью регенерации 0,81...0,82 при суммарных относительных потерях давления около 5 % удалось добиться сокращения расхода топливного газа на 20...25 %.

Американская фирма Solar Turbines Inc. недавно разработала пластинчатый регенератор для газовой турбины «Mercury-50» (рис. 2). При мощности 4,6 МВт использование регенератора на выходе из турбины позволило достичь электрического КПД 38,5 %, что является рекордным показателем в данном классе мощностей.

Основные требования к ГТД для ГТС Украины

Проблемы модернизации газотранспортной системы и создания ГТД нового поколения для ГТС Украины явились главным предметом деятельности Комиссии по промышленным газовым турбинам при Отделении физико-технических проблем энергетики НАН Украины, созданной в 2007 г. В нее вошли ученые Национальной академии наук Украины, специализирующиеся в области газотурбостроения, а также ведущие специалисты Украины в области проектирования и эксплуатации газотурбинных двигателей на КС Украины. В 2007...2008 г.г. Комиссия сформулировала основные требования и разработала Концепцию создания промышленных ГТД для газотранспортной системы Украины [4]. В соответствии с этой Концепцией наиболее оптимальным методом повышения экономичности и модернизации ГТД, применяемых на ГТС Украины, представляется использование регенеративного цикла.

Для ГТС Украины наиболее востребованы газотурбинные двигатели для ГПА мощностью

от 6 до 25 МВт. Исследования, выполненные Комиссией, показали [1, 2], что использование современных газотурбинных технологий, применяемых в авиа- и судостроении, большой опыт конструкторских бюро Украины, а также последние достижения украинских ученых в области материаловедения, сварки и пайки металлов, теплофизики, теории горения, механики прочности, компьютерного проектирования позволяют создать в течение 1,5...2 лет высокотехнологичный газотурбинный двигатель регенеративного типа с КПД 38...41 % в диапазоне мощностей 6...25 МВт. Основной задачей при этом является создание надежного регенератора с коэффициентом регенерации теплоты 0,82...0,85. Одновременно Комиссия разработала перечень первоочередных научно-технических проектов в области промышленного газотурбокомпрессоростроения Украины.

Что касается других требований к газотурбинному двигателю, то они должны соответствовать лучшим мировым образцам. В частности, полный ресурс работы двигателя должен быть не менее 150 тыс. ч., наработка на отказ – не менее 5 тыс. ч., средний ресурс работы до первого капитального ремонта – 30 тыс. ч. Уровень выбросов окислов азота NO_x в атмосферу не должен превышать 80 мг/м³, а окиси углерода CO – 100 мг/м³.

В соответствии с предлагаемой Концепцией серийному производству ГТД нового поколения для ГТС Украины должно предшествовать создание и испытание двух базовых газотурбинных двигателей мощностью 12 МВт (ГТ-12) и 16 МВт (ГТ-16). В дальнейшем эти двигатели послужат основой создания серии промышленных ГТД мощностью 6...25 МВт для различных отраслей промышленности.

Программа создания и испытания базовых ГТД нового поколения для ГТС Украины учитывает временной график вывода из эксплуатации физически изношенных и морально устаревших ГТД. Расчеты показывают, что разработка базового двигателя ГТ-12 потребует около 36 млн. долл. США, а разработка ГТ-16 – 48 млн. долл. США. Научные исследования в поддержку про-

екта создания ГТ-12 и ГТ-16 составят еще около 20 % от суммарной стоимости разработки двигателей, т.е. 17 млн. долл. США. Освоение производства новых ГТД и подготовка производства к серийному выпуску потребуют примерно 300 млн. долл. США в течение двух лет после создания и испытания двигателей.

Таким образом, суммарные затраты на создание двух базовых двигателей нового поколения мощностью 12 и 16 МВт для газотранспортной системы Украины и освоение их производства потребуют около 400 млн. долл. США, которые покрываются в течение двух-трех лет после начала серийного производства – за счет более высокого КПД газотурбинного двигателя и связанного с этим ежегодного сокращения собственного потребления природного газа (2,0 млрд. м³) на сумму, эквивалентную 360 млн. долл. США.

Создание современных высокотехнологичных газотурбинных двигателей является одной из сложнейших научно-технических проблем, которая не может быть реализована без серьезных финансовых инвестиций на государственном уровне. Для решения этой проблемы необходимо создание Национальной научно-технической программы в области промышленного газотурбокомпрессоростроения с широким привлечением производственного потенциала предприятий Украины и научного потенциала институтов Национальной академии наук Украины. Предполагается, что в такой Программе должны решаться следующие главные задачи:

1. Создание новых материалов, улучшенных технологий литья лопаток и обработки металлов, порошковой металлургии для дисков.
2. Разработка высокоэффективных поверхностей теплообмена и регенераторов со степенью регенерации 0,82...0,88, керамических материалов и теплозащитных нанопокровов.
3. Создание методов интенсификации теплообмена с низкими потерями давления, более эффективных систем охлаждения лопаток.
4. Разработка экологически чистых тех-

нологий сжигания топлива, более совершенных методов расчета радиационного теплообмена в камерах сгорания.

5. Развитие методов трех- и четырехмерного компьютерного (CFD) проектирования проточной части газовой турбины и компрессора за счет чего возможно увеличение КПД двигателя до 0,5 %.

6. Разработка методов системного проектирования ГТД и нагнетателя.

Детандер – генераторные установки

Как указывалось выше, газораспределительная система Украины имеет 1600 газораспределительных станций (ГРС) и около 29500 газорегулирующих пунктов (ГРП). При подаче природного газа от магистрального газопровода в распределительную сеть его давление снижается в ГРС от 5,5...7,5 МПа до 0,3...1,2 МПа, при этом энергия избыточного давления газа теряется безвозвратно. Использование для снижения давления газа детандеров с коэффициентом полезного действия до 80 % позволит преобразовать избыточную энергию природного газа в электрическую энергию.

Ежегодно предприятиям, городам и селам Украины поставляется 70...75 млрд. м³ природного газа. Если предположить, что весь потребляемый газ будет подаваться через детандеры, то на всех газораспределительных пунктах Украины можно получить более 160 МВт электрогенерирующих мощностей, которые могут ежегодно вырабатывать около $1,2 \cdot 10^9$ кВт·ч. электроэнергии. При снижении давления природного газа на ГРП до 0,3...0,05 МПа и использовании турбодетандеров в масштабе Украины можно получить еще около 300 МВт электрогенерирующих мощностей. Топливный газ, используемый для питания газовых турбин на ГТС Украины, редуцируется до давления 1,5...2,5 МПа в зависимости от типа газовой турбины. Используя турбодетандеры на компрессорных станциях Украины, можно получить до 10 МВт электрогенерирующих мощностей.

Таким образом, широкомасштабное применение турбодетандеров в Украине позволит создать дополнительно около 470 МВт элек-

трогенерирующих мощностей и, тем самым, ежегодно экономить до 1,2 млн. т. условного топлива, что эквивалентно почти 1,0 млрд. м³ природного газа.

Анализ зарубежного и отечественного опыта показывает перспективность и экономическую эффективность использования турбодетандерных установок для выработки электрической энергии и холода на ГРС, ГРП и компрессорных станциях. Многолетний опыт эксплуатации турбодетандеров на промыслах в установках низкотемпературной сепарации газа показал, что при их использовании требуются небольшие капитальные вложения и эксплуатационные затраты. Кроме того, они характеризуются небольшой металлоемкостью, высокой степенью автоматизации, высоким коэффициентом использования, экологической безопасностью, надежностью и простотой обслуживания.

Украина имеет опыт создания и внедрения турбодетандерных установок. В 1988 г. в ОАО «Турбогаз» (Харьков) разработана и изготовлена установка УТДУ-2500 мощностью 2,5 МВт, которая была использована в проекте ОАО «ВНИПИТрансГаз» (г. Киев) при реконструкции ГРС-7 (г. Днепропетровск). Эта установка была введена в строй в 1991 г. В настоящее время в соответствии с проектом ОАО «ВНИПИТрансГаз» на ГРС-1 (г. Запорожье) ведутся пуско-наладочные работы по вводу в эксплуатацию турбодетандерной блочно-контейнерной электростанции ЭТД-1000, разработанной и изготовленной ОАО «Мотор Січ» (г. Запорожье). В ГП НПКГ «Зоря-Машпроект» в 2002 г. разработана детандер-генераторная установка мощностью 2,5 МВт, которая недавно введена в эксплуатацию на Новгородской ТЭЦ (Россия).

В России использование турбодетандеров на природном газе пока не получило широкого развития. Первые в России детандер-генераторные установки были разработаны в ОАО «Криокор» (г. Москва). В 1994 г. два агрегата ДГА-5000 мощностью по 5,0 МВт каждый, были установлены на ГРП ТЭЦ-21

«Мосэнерго». В 2007 г. на ТЭЦ-23 ОАО «Мосэнерго» были введены в эксплуатацию еще две детандер-генераторные установки ДГА-5000. В последние годы в России наметился существенный интерес к турбодетандерам; в работе [6] представлены турбодетандеры нового поколения мощностью до 1 МВт и капсульный вариант турбодетандера мощностью до 300 кВт.

В целом, внедрение детандеров на ГТС Украины и России идет пока чрезвычайно медленными темпами, что обусловлено нерешенными проблемами подачи (продажи) вырабатываемой электрической энергии в электрическую сеть.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патон Б.Е., Халатов А.А. Какие промышленные газотурбинные двигатели нужны украинской ГТС? // Зеркало Недели.–№ 26 (705).–12 июля 2008 г.
2. Патон Б.Е., Халатов А.А., Костенко Д.А., Письменный О.С. Промислові газотурбінні двигуни для газотранспортної системи України: су-

часний стан і проблеми розвитку // Енергетика та електрифікація.–№ 7.–2008.

3. Патон Б.Е., Халатов А.А. Помогут ли газовые турбины преодолеть проблемы энергосистемы Украины? // Зеркало Недели.–№ 47 (726).–12 декабря 2008 г.

4. Патон Б.Е., Халатов А.А., Костенко Д.А., Письменный О.С. Концепція (проект) Державної науково-технічної програми створення промислових газотурбінних двигунів нового покоління для газової промисловості та енергетики // Вісник Національної академії наук України. – № 4. – 2008.

5. Gailloreto G. Mechanical Drive Order Survey // Diesel & Gas Turbine Worldwide.–December 2008.

6. Гуров В.И. Циап – плацдарм инноваций // Газотурбинные технологии.–Сентябрь/2009, №7(78).

Получено 27.10.2009 г.

УДК 532.516; 536.24.01

Халатов А.А.,¹ Романов В.В.,² Дашевский Ю.Я.,² Письменный Д.Н.²

¹Институт технической теплофизики НАН Украины

²ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект»

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГТД

Часть 1. Современное состояние

У статті наведено перспективи підвищення температури газу перед турбіною в енергетичних ГТД. Розглянуто також конструкції охолоджуваних лопаток сучасних високотемпературних двигунів.

В статье представлены перспективы повышения температуры газа перед турбиной в энергетических ГТД. Рассмотрены конструкции охлаждаемых лопаток современных високотемпературных двигателей.

This report presents prospects of the inlet temperature growth in gas turbines for power plants. The air cooled blades & vanes design features for the modern and perspective high performance engines are considered.

D_h – гидравлический диаметр канала;
 e – высота ребра;
 f – коэффициент трения;
 m – коэффициент вдува;

Nu – число Нуссельта;
 P – шаг ребер в направлении течения;
 Re – число Рейнольдса;
 T – температура;