

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Е.М. Комаров

egormkomarov@mail.ru

Ж.М. Кокуева

kokueva@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Приведены процессы инициации проекта по повышению эффективности газотурбинных установок для привода центробежных нагнетателей на компрессорных станциях. Показаны основные тенденции повышения эффективности газотурбинных приводов газоперекачивающих агрегатов, представлен конструктивно-функциональный облик современного газотурбинного привода газоперекачивающего агрегата и предложен способ повышения его КПД

Ключевые слова

Инициация проекта энерго-эффективности, газотурбинная установка, компрессорная станция, центробежный нагнетатель, газоперекачивающий агрегат, коэффициент полезного действия

Поступила 07.06.2018

© Автор(ы), 2019

Введение. Газовая отрасль сегодня является важным элементом системы жизнеобеспечения государства и во многом формирует его важнейшие экономические показатели.

В России имеется порядка трети всех запасов природного газа на Земле. Страны, не имеющие в своем арсенале природного газа, вынуждены приобретать его, в том числе и у России. Поэтому актуальность задач транспортировки газа год от года только возрастает, тем более что у конечного потребителя стоимость транспортировки составляет более половины стоимости природного газа [1]. Колебания потребления газа, связанные с сезонными изменениями температуры, ведут к несоблюдению постоянства режимов работы газоперекачивающих агрегатов.

Важным механизмом реализации стратегии в области транспортировки газа является программа повышения ее эффективности, состоящая из комплекса проектов и мероприятий [2]. Такие проекты, как правило, довольно сложные, комплексные и многоэтапные. И первый этап инициации проекта повышения эффективности газотурбинного привода газоперекачивающего агрегата (ГПА) включает в себя процессы проведения энергетического обследования. В группу инициации проекта включены такие процессы, как изучение существующего положения вещей в технологическом, конструкторском и производственных планах; исследование

отрасли газоперекачивающего оборудования в России и мире; анализ прогнозов развития рынка ГПА; выявление проблем, препятствующих повышению эффективности работы ГПА.

Анализ состояния отрасли газоперекачивающего оборудования. Современный фонд ГПА примерно на 86 % состоит из агрегатов, имеющих газотурбинный привод (ГТП). Коэффициент полезного действия газотурбинных установок (ГТУ) сегодня составляет в среднем 28...30 % [3, 4]. Причем на собственные нужды расходуется порядка 10 % природного газа, перекачиваемого ГПА с ГТП (по отдельным агрегатам ~ 20 %). Также это приводит к снижению надежности газотранспортной системы (ГТС) и, как следствие, увеличивается риск возникновения экологических проблем [4].

На сегодняшний день ГТС России содержит также парк электроприводных ГПА (ЭГПА), доля которых во всем парке ГПА составляет ~ 14 %. В электроприводе ГПА, как правило, используются синхронные двигатели большой мощности. Более 70 % парка ЭГПА имеет срок службы ~ 20 лет, а отдельные 30...40 лет. Практически все элементы ЭГПА (синхронные двигатели, возбуждители, щиты) выработали свой ресурс. Большинство ЭГПА не имеет возможности регулировать скорость (нерегулируемые). Характерной чертой для некоторых газопроводов является работа в режиме падающих газоподачи и газопотребления. Это приводит к изменению режимов и энергетических свойств ЭГПА, что в итоге выражается в повышенном энергопотреблении [4].

Таким образом, важной задачей дальнейшего развития приводов для ГПА является повышение их экономичности, т. е. увеличение КПД.

Анализ рынка ГТП ГПА. Исследования показывают, что не вся теплота, образующаяся в камере сгорания ГТУ в результате сгорания топлива, полезно используется для выработки мощности на валу нагнетателя, существенная ее часть уходит с отработавшими продуктами сгорания (при 550 °С) [5].

Основные направления решения данной проблемы следующие [3, 6].

1. Замена устаревших ГТУ с низким КПД на ГТУ нового поколения с высокими параметрами рабочего тела и высокими КПД, а также на установки, выполненные по усложненному циклу: с промежуточным охлаждением при сжатии, промежуточным подогревом при расширении и регенерацией — в различных сочетаниях; в ряде случаев — когенерационных ГТУ (ГТУ «Надежда» конструкции НМЗ с промежуточным охлаждением при сжатии и регенерацией теплоты мощностью 16,3 МВт и КПД 42...43 %, а также ГТУ мощностью 16 МВт с регенерацией конструкции ГП НПКГ «Зоря»–«Машпроект» (Украина).

2. Дальнейшее повышение надежности. Технические требования, устанавливаемые стандартом, определяют значения коэффициента готовности $k_r > 0,98$ и коэффициента технического использования $k_{т.и} > 0,92$ (для ГТУ на базе авиационных и судовых двигателей — не менее 0,95);

3. Для сохранения эффективности ГПА на протяжении всего срока службы необходимо разработать и применять, кроме известных (промывка газоздушного тракта специальными моющими растворами), новые способы очистки проточной части. (ГПА работают часто в условиях повышенной запыленности, что приводит к снижению мощности вследствие загрязнения газоздушного тракта двигателя.)

Для ГПА выпускают ГТУ трех типов: специально спроектированные для ГПА; выполненные на базе авиационных и судовых двигателей.

С 1950 по 1990 г. в СССР для газоперекачивающих станций в основном выпускались ГТУ первого типа. К стационарным ГТУ, специально сконструированным для использования на газопроводах, следует отнести установки ГТ-700-5, ГТК-5, ГТ-750-6, ГТ-6-750, ГТН-6, ГТК-10-2-4, ГТН-25 мощностью 4...25 МВт.

Выпуск таких ГТУ начал Невский завод им. В.И. Ленина (НЗЛ), ныне Невский машиностроительный завод (НМЗ), в 1957 г. с установки ГТ-700-4 мощностью 4000 кВт. Установка была выполнена одновальной, регенеративной, с начальной температурой продуктов сгорания 973 К. При столь низкой температуре, несмотря на применение регенерации, КПД ГТУ составил всего 22 %. Была выбрана барабанная конструкция роторов компрессора и турбины, характерная для того времени, поэтому даже небольшая степень повышения давления достигалась в 22 ступенях компрессора.

Газотурбинная установка «Надежда» (рис. 1) с промежуточным охлаждением при сжатии и регенерацией теплоты была разработана в целях повышения КПД и надежности ГТУ, эксплуатируемых ПАО «Газпром» на компрессорных станциях, и предназначена для замены установок ГТК-10. Мощность ГТУ 16,3 МВт, КПД 42...43 %. Такой КПД соответствует требованиям всемерного уменьшения расхода природного газа на нужды газоперекачивающих станций.

В начале 1970-х гг. началось освоение ГПА, создаваемых на базе авиационных двигателей. К ним относятся отечественные установки типа ГПА-Ц-6,3, ГПА-Ц-16, ГПА-Ц-25 и др. В 1982 г. началась опытная эксплуатация агрегата ГПА-Ц-16 мощностью 16 МВт, в котором в качестве привода нагнетателя используется значительно более совершенный ГТД типа НК-16СТ, созданный на базе двухконтурного авиационного двигателя НК-8-2У для самолетов ТУ-154 и Ил-62. В том же году двигатель НК-16СТ

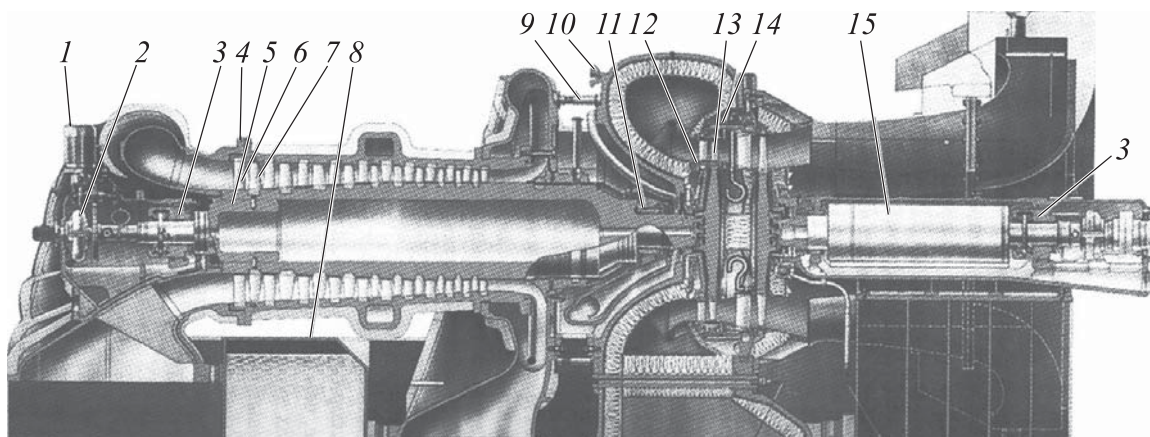


Рис. 1. Продольный разрез ГТУ типа ГТК-10-4 [6]:

1 — валоповоротное устройство; 2 — главный масляный насос; 3 — радиально-осевой подшипник; 4 — корпус компрессора; 5 — ротор турбокомпрессора; 6 — направляющая лопатка первой ступени компрессора; 7 — рабочая лопатка первой ступени компрессора; 8 — рама-маслобак; 9 — трубопровод для подвода воздуха на охлаждение корпуса турбины; 10 — корпус турбины; 11 — радиальный подшипник; 12 — сопловой аппарат компрессорной турбины; 13 — рабочее колесо компрессорной турбины; 14 — внутренний корпус турбин с сопловыми аппаратами; 15 — ротор силовой турбины

поступил в серийное производство. Двигатель, как и большинство стационарных ГТУ, созданных на базе авиадвигателей, выполнен трехвальным: газогенератор состоит из блока низкого давления (КНД и ТНД, частота вращения ротора 5100 мин^{-1}) и блока высокого давления (КВД плюс ТВД, 6750 мин^{-1}). Реактивное сопло исходного двигателя заменено на свободную силовую турбину, напрямую, без редуктора приводящую нагнетатель газа с частотой вращения ротора 5300 мин^{-1} . Начальная температура газа в ГТУ 1123 К ; степень повышения давления в двухкаскадном компрессоре 11; расход воздуха при входе в компрессор 100 кг/с . Из-за невысокой температуры газа эффективный КПД установки получился небольшой, всего $28,8 \%$. Было поставлено ~ 540 агрегатов этого типа. Компонировка ГТУ в составе ГПА показана на рис. 2 [6].

Газоперекачивающие агрегаты ГТУ-Ц-16 реконструировались под установку приводного двигателя НК-38СТ (созданного на базе двигателя НК-93 для сверхзвукового самолета МиГ-31) вместо НК-16СТ, а также для установки в новые ГПА-16 «Волга». Агрегат ГТУ-Ц-16Р был принят в серийное производство в 2001 г.

В 1990-е гг. семейство отечественных ГПА с двигателями марки «НК», конвертированными из авиационных двигателей, пополнилось двигателями второго и третьего поколений (табл. 1).

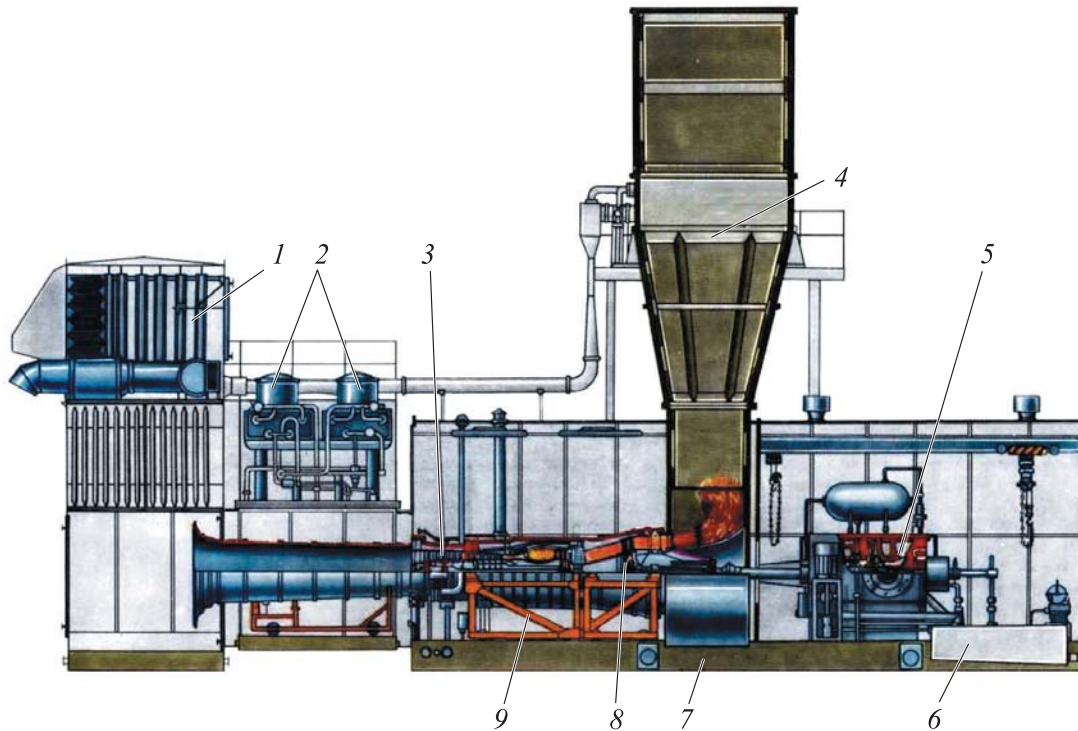


Рис. 2. Компоновка ГТУ-Ц-16 в составе ГПА [6]:

1 — входное воздухоочищающее устройство (ВОУ); 2 — масляные радиаторы; 3 — авиационный привод НК-16 СТ; 4 — выхлопное устройство с шумоглушителем; 5 — нагнетатель природного газа; 6 — маслблок агрегата; 7 — фундаментная металлическая рама агрегата; 8 — силовая турбина агрегата; 9 — подмоторная рама авиапривода

Таблица 1

Конвертированные схемы ГТД семейства НК второго и третьего поколений для ГПА [6]

Марка двигателя	Марка прототипа	Год выпуска	Мощность, МВт	$T_{Г}$, К	$G_{в}$, кг/с	π_k	$n_{ст}$, мин ⁻¹	КПД, %
НК-38СТ	НК-93	1998	16,0	1500	58,0	26,4	5300	38
НК-36СТ	НК-321	1996	25,0	1453	99,1	22,0	5000	36

На отечественных магистральных газопроводах устанавливались также ГТУ зарубежного производства фирм «Солар» и «АЭГ-Канис» («AEG Kanis»), ГТУ «Центавр» фирмы «Солар» мощностью (в двух модификациях) 2620/3900 кВт с КПД 25 % и общим количеством 20/10 единиц составили одну из первых поставок зарубежных ГТУ в Россию. К ним можно добавить более 100 агрегатов ГТК-25И фирмы «АЭГ-Канис», установленных на компрессорных станциях газопровода «Уренгой-Помары-Ужгород» и «Уренгой-Центр I». Широкое применение (более 150 ед.) нашли также ГТУ типа ГТК-10И компании «Дженерал электрик» мощностью 10 МВт при КПД 26 %.

Фирма «Роллс-Ройс» (Великобритания) первой появилась на российском рынке. В разных районах мира установлено более 500 стационарных ГТУ, созданных на базе одного из самых эффективных турбореактивных двигателей этой фирмы — RB211-24G. В России установлено более 10 агрегатов. Газотурбинные установки с начальной температурой продуктов сгорания 1390...1420 К (вместо 1485 К в базовом двигателе) проектировались на различные мощности (26...32 МВт) и имели КПД 39...40 %. Мощность ГТУ, получивших название Coberra 2000 и Coberra 6000, составила 14,5 и 27 МВт.

Из наиболее ранних приводных ГТУ фирмы «Роллс-Ройс» в России хорошо известна ГТУ Coberra-182; 42 таких агрегата отработали свой ресурс в основном успешно.

Фирма «Роллс-Ройс» в 2003 г. начала выпуск наиболее мощной ГТУ рассматриваемого типа Trent 60 на базе газогенератора двухконтурного трехвального ТРД (устанавливаемого на гражданских лайнерах Airbus A380). Номинальная мощность двигателя 51,8 МВт, КПД 42,9 % на валу силовой турбины. В России в районе г. Выборга на компрессорной станции «Портовая» устанавливают шесть таких двигателей в составе ГПА для газопровода «Северный поток» [6].

Направления и тенденции развития приводных ГТУ. Для перспективных ГТУ коэффициент эффективного использования теплоты сгорания топлива должен достигать величины порядка 80 % и более, в том числе на уровне 34...36 % для выработки мощности на валу нагнетателя, а остальное за счет рационального использования теплоты отходящих газов. Решению задачи по наиболее полному использованию теплоты отходящих газов ГТУ посвящено много работ, но и в настоящее время эта задача остается для отрасли весьма актуальной и требует своего дальнейшего комплексного решения [7].

Конструктивно-функциональный облик современного газотурбинного ГПА включает в себя следующие основные особенности:

- применение ГТП, имеющих «резерв конструктивного развития»;
- применение высокоэффективных газовых центробежных компрессоров (ЦБК) (с магнитными подшипниками и сухими газовыми уплотнениями);
- возможность комплектования ГПА разными ГТУ и ЦБК в рамках одного класса мощности;
- ангарная (преимущественно) и контейнерно-блочная компоновка ГПА;

- агрегатная установка воздушного охлаждения газа (АВО-газа);
- электрозапуск ГТУ.

Номинальный КПД проектируемых приводных ГТУ должен соответствовать современному техническому уровню или быть выше. Значения КПД современных серийных газотурбинных двигателей (ГТД) различных классов мощности для привода центробежного нагнетателя (ЦБН) на компрессорной станции приведены в табл. 2.

Таблица 2

Современный уровень КПД для приводных ГТУ [6]

Класс мощности, МВт	КПД, % (в стационарных условиях)		
	Конвертированные из авиационных ГТУ простого цикла	Стационарные	
		ГТУ простого цикла	ГТУ с регенерацией
2–4	27–28	26–27,5	–
4–8	29–33,5	28–32,5	32–34
10–12,5	31–34,5	29–33	32–35
16–25	34–38	32–35	34,5–36,5

Стоимость жизненного цикла газотурбинных ГПА нового поколения уменьшается на 15...20 % по сравнению с применением ГПА старого поколения. Текущие цены ГПА будут постепенно приближаться к мировым. До 2010 г. стоимость отечественных ГПА прогнозировалась на уровне 70...80 % мировых цен, т. е. в диапазоне 370...460 долл./кВт [7].

В самом общем виде ГПА нового поколения должны обеспечивать высокий уровень основных эксплуатационных показателей, включая высокую экономичность (КПД на уровне 34...36 % в зависимости от мощности агрегата), высокую надежность и готовность (наработка на отказ не менее 3,5 тыс. ч, межремонтный цикл на уровне 8–25–50 тыс. ч (ТО1–ТО2–ТО3) с общим ресурсом более 100 тыс. ч, коэффициентом готовности на уровне 0,98 при коэффициенте технического использования на уровне 0,93–0,95. При этом выбросы NO_x должны составлять не более 50...100 мг/нм³. Кроме того, важными технико-экономическими показателями приводных ГТУ являются низкие первоначальные капитальные вложения и стоимость обслуживания; возможность регулирования параметров рабочего процесса изменением частоты вращения в широких пределах [4].

Перспективные ГТУ ГПА на основе авиационных технологий и ГТД большого размера представляют ГТУ, в состав которых входит двух-,

трехкаскадный компрессор; двух-, трехкаскадная турбина, блок СТ — силовая турбина и малоэмиссионная камера сгорания. Конструктивные особенности такого ГТД следующие [8]:

- блок КНД — снижающаяся проточная часть, устойчивость;
- малоступенчатый КВД — высоконагруженные ступени, короткий переходный канал, управление радиальным зазором;
- высокоэффективные щеточные уплотнения, газодинамические уплотнения воздушных и масляных полостей;
- одноступенчатая, высокотемпературная турбина высокого давления с высоконагруженной ступенью;
- монокристаллические лопатки с термобарьерным покрытием, ремонтпригодным торцом и развитой системой охлаждения;
- малоступенчатая турбина низкого давления с быстроходными высоконагруженными ступенями, коротким переходным каналом;
- камера сгорания модульной схемы;
- сегментная жаровая труба с двустенной системой охлаждения;
- силовая схема повышенной жесткости с минимальным числом опор;
- маслосистема (система смазывания) высокоэффективная;
- регенераторы принципиально новой конструкции, основанные на создании мини-вихрей «торнадо» на поверхности теплообмена;
- высоконадежная система автоматизированного управления с распределенной структурой, интеллектуальными датчиками, оптоволоконными коммуникациями и др.;
- новые материалы и приемы конструирования включают в себя легкие высокопрочные материалы, гранульные сплавы, электрохимическую обработку, сварку трением и др.

Развитие ГТУ идет по пути совершенствования составляющих их элементов (компрессоров, турбин, камер сгорания, теплообменников и др.), повышения температуры и давления газа перед турбиной, а также применения комбинированных силовых установок с паровыми турбинами. При утилизации теплоты отходящих газов и высоком совершенстве основных элементов эффективный КПД установок в стационарной энергетике и на транспорте достигает 42...45 % [8]. Высокие параметры работы (T_T , P_K и быстроходность) и экологические усовершенствования (выбросы, шум) объективно способствуют удорожанию оборудования, следовательно, необходим «баланс» показателей: стоимость–ресурс (надежности)–экономичность–экология.

Проект перспективной приводной ГТУ мощностью 32 МВт. На сегодняшний день одной из перспективных установок, соответствующих совре-

менным требованиям, является ГТУ фирмы General Electric (США) — MS5002E, входящая в состав ГПА-32 «Ладога» мощностью 32 МВт.

Газоперекачивающий агрегат ГПА-32 «Ладога» (рис. 3) является машиной стационарного исполнения класса 32 МВт на основе лицензионной турбины MS5002E, предназначенной для условий эксплуатации любой сложности, с высоким КПД (36 %) и низким уровнем выбросов ($\text{NO}_x = 18 \text{ ppm}$), большим ресурсом работы, хорошей ремонтпригодностью. Данная высокоэффективная установка разработана для российского рынка на основе базового семейства ГТУ MS5002, которое успешно эксплуатируется на многих компрессорных станциях в России. Общая наработка ГТУ MS5002 по всему миру сегодня составляет более 16 млн ч.

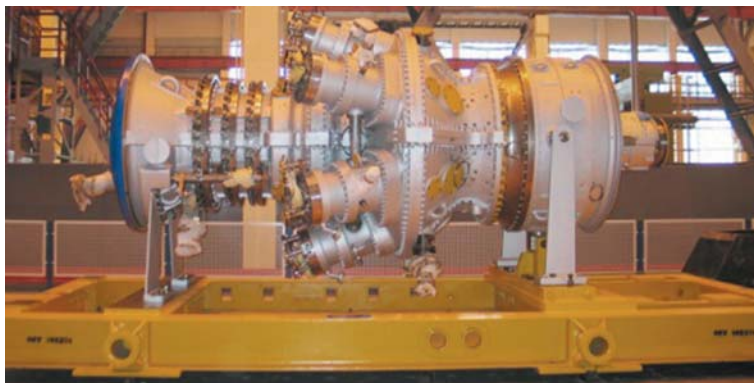


Рис. 3. ГПА-32 «Ладога» в КЦ-1 КС «Вавожская» [9]

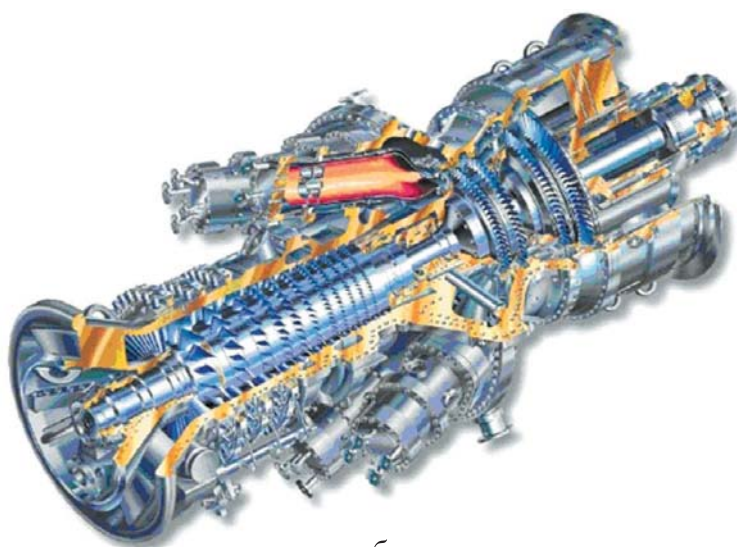
На ЗАО «Невский завод» производятся ГТУ MS5002E по лицензии и в сотрудничестве с General Electric Oil & Gas (Nuovo Pignone S.p.A.). Первая партия ГТУ MS5002E предназначена для работы на магистральных газопроводах ОАО «Газпром» в качестве привода нагнетателя природного газа 400-21-1С в составе ГПА-32 «Ладога» производства ЗАО «Невский завод» при частоте вращения силового вала 5714 об/мин. Однако ГТУ MS5002E может работать и в режиме привода электрогенератора.

В варианте использования ГТУ MS5002E (рис. 4) в качестве механического привода мощность установки составляет 32 МВт и КПД 36 %, в генераторном варианте — мощность 31,1 МВт и КПД 35 %.

Газотурбинная установка оснащена низкоэмиссионной камерой сгорания и исключительно надежна в эксплуатации. Элементы установки сконструированы методами, позволяющими обеспечить ее надежную



а



б

Рис. 4. Газогенератор турбины MS5002E [9]:

а — внешний вид газогенератора; *б* — разрез газогенератора

работу в сложных климатических условиях и весь необходимый объем сервисных работ на месте эксплуатации — в легкоборном ангаре-укрытии [9].

**Основные технические характеристики ГТУ MS5002E
(данные ЗАО НЗЛ)**

Параметр (ISO условия)	Значение
Мощность на валу силовой турбины, кВт	32 000
КПД простого цикла, %	36
Степень сжатия в осевом компрессоре	17
Тепловая мощность, кДж/(кВт · ч)	10 000
Эмиссия NO _x , ppm	18
Расход выхлопных газов за силовой турбиной, кг/с	101
Температура выхлопных газов, °С	510

Номинальная частота вращения, об/мин	5714
Температура газа, °С	1209
Номинальный расход топлива, кг/с	1,74

Повысить экономическую эффективность ГПА данного типа до $\eta_e = 43...44\%$, при сохранении надежности и ресурса можно путем использования сложного цикла (СЦ) — регенерация теплоты и промежуточное охлаждение циклового воздуха. Реализация концепции экономии энергоресурсов с использованием ГТП СЦ требует создания теплообменного оборудования (регенераторов и воздухоохладителей) с тепловой эффективностью не менее 80...85 %.

Для увеличения КПД ГТУ (в классе 1...32 МВт) необходимо использовать несколько возможных вариантов [10]:

- простой цикл ГТУ с дальнейшим повышением параметров цикла (T_T и P_K), совершенствованием систем охлаждения, применением новых материалов (в том числе на керамической основе), достигаемый КПД = 35...42 %;
- регенеративный цикл ГТУ для агрегатов мощностью менее 10 МВт, КПД = 36...40 % (2007 г.);
- сложный цикл (с промежуточным охлаждением и регенерацией), КПД = 41...45 %.

Принципиальная схема одной из перспективных установок мощностью 32 МВт с использованием сложного цикла представлена на рис. 5.

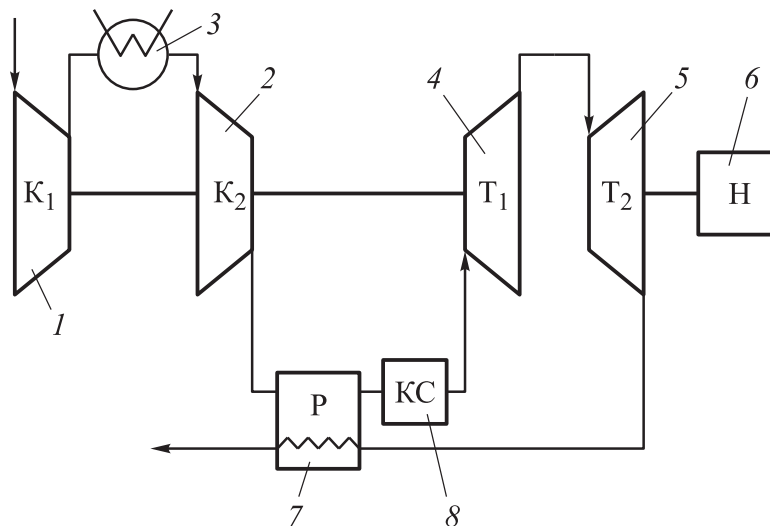


Рис. 5. Принципиальная схема приводной ГТУ мощностью 32 МВт с регенерацией теплоты уходящих газов и промежуточным охлаждением:

1 и 2 — первый и второй компрессоры; 3 — промежуточный охладитель воздуха; 4 — ТВД; 5 — силовая турбина; 6 — нагнетатель газа; 7 — рекуператор; 8 — камера сгорания

Принцип действия установки следующий: воздух из комплексного ВОУ (на рис. 5 не показано) засасывается первым компрессором и сжимается в нем, затем, попадая в промежуточный воздухоохладитель, охлаждается и поступает во второй компрессор. Далее, после сжатия во втором компрессоре попадает в рекуператор, где подогревается теплотой уходящих газов. Затем поступает в камеру сгорания, куда подается топливо — природный газ. Образовавшаяся топливовоздушная смесь, расширяясь в лопаточных венцах, приводит во вращение турбину высокого давления (ТВД), которая совершает работу по приводу компрессоров, расположенных на одном валу с ТВД. Далее, расширяясь, газ приводит во вращение силовую турбину, которая, в свою очередь, является приводом центробежного нагнетателя природного газа. Уходящие газы подогревают воздух перед камерой сгорания в рекуператоре и через выходное устройство выбрасываются в окружающую среду.

Данная установка имеет следующие термодинамические параметры: температура газа $T_T = 1423$ К; суммарная степень повышения давления в компрессорах $\pi_k = 10$; степень регенерации в рекуператоре $\sigma = 0,85$; температура на выходе из газоохладителя $T_x = 305$ К; расход воздуха на входе в первый компрессор $G_v = 97,6$ кг/с.

Малая суммарная степень повышения давления в компрессорах обусловлена тем, что применение в ГТУ регенерации значительно понижает оптимальную по КПД степень повышения давления по сравнению с простым циклом. В данном случае оптимальным по КПД значением степени повышения давления является $\pi_k = 10$.

Конструкция этой установки аналогично ГПА-32 «Ладога» предполагает блочно-контейнерную компоновку газотурбинного агрегата и всех вспомогательных систем, а также рекуператора и газоохладителя в одном или нескольких контейнерах, позволяющих осуществлять быстрый монтаж и выход установки на режим.

По сравнению с ГПА-32 «Ладога» новая установка, имеющая сложный цикл, позволит иметь КПД 43...44 % при массогабаритных показателях установки, близких к показателям ГПА-32. При этом секундный расход топлива на номинальном режиме такой установки будет на 10...15 % меньше, чем у ГПА-32 в подобных условиях.

Усложнение цикла приводит к появлению дополнительных затрат на производство и обслуживание теплообменных аппаратов установки, но такое усовершенствование позволит поднять экономичность установки, уменьшить массогабаритные параметры лопаточных машин за счет уменьшения ступеней и, следовательно, уменьшить ее удельную стоимость.

Заключение. Технической базой перевооружения должно стать новое поколение создаваемых газотурбинных ГПА [11], в конструкции которых заложена возможность для улучшения показателей (экономичность, экологические характеристики, надежность, стоимость производства и установки). Дальнейшее развитие проекта по повышению эффективности ГПА включает в себя ряд конкретных конструктивных мероприятий [12], обеспечивающих повышение КПД каждого из существующих типов ГТУ до 46 %.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Крюков О.В., ред. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций. Н. Новгород, Вектор ТиС, 2010.
- [2] Кокуева Ж.М. Проект от идеи до воплощения: вопросы управления. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
- [3] Энергетическая стратегия России на период до 2020 года: Распоряжение Правительства РФ от 28 августа 2003 № 1234-р.
- [4] Васильев Б.Ю. Исследование эффективности современных электроприводных газоперекачивающих агрегатов. *Нефтегазовое дело*, 2012, № 4, с. 104–110.
- [5] Тумашев Р.З., Моляков В.Д., Лаврентьев Ю.Л. Повышение эффективности компрессорных станций магистральных газопроводов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2014, № 1, с. 68–79.
- [6] Вараксин А.Ю., ред. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.
- [7] Дяченко А.И. Эффективность использования различных типов энергопривода на компрессорных станциях. Дис. ... канд. техн. наук. М., РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004.
- [8] Репин Д.Г., Рыбак В.Г., Михалев А.Ю. и др. Газотурбинные приводы газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций магистральных газопроводов. Процессы и характеристики. Н. Новгород, Дятловы горы, 2016.
- [9] Все о газоперекачивающих агрегатах и газотурбинных двигателях. ГПА-32 «Ладога». *Интернет-ресурс*. URL: <http://все-про-гпа.рф> (дата обращения: 03.04.2018).
- [10] Волков С.А. О работах отдела камер сгорания ЦИАМ применительно к камерам сгорания с пониженными выбросами для наземных газотурбинных установок. *Первый межведомственный науч.-техн. семинар по проблемам низкоэмиссионных камер сгорания газотурбинных установок*. М., ЦИАМ, 2007.
- [11] Щуровский В.А., Сеницын Ю.Н., Черемин А.В. и др. Газотранспортное оборудование: состояние и перспективы. *Газотранспортные системы и технологии сегодня и завтра*. М., ВНИИГАЗ, 2008, с. 42–52.
- [12] Генеральная схема развития газовой отрасли на период до 2030 года. *minenergo.gov.ru: веб-сайт*. URL: <https://minenergo.gov.ru> (дата обращения: 25.04.2018).

Комаров Егор Максимович — студент кафедры «Газотурбинные и нетрадиционные установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Кокуева Жанна Михайловна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная логистика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Комаров Е.М., Кокуева Ж.М. Повышение эффективности газоперекачивающих агрегатов: проблемы и решения. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 5, с. 104–118. DOI: 10.18698/0236-3941-2019-5-104-118

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF GAS PUMPING UNITS:
PROBLEMS AND SOLUTIONS**

E.M. Komarov

egormkomarov@mail.ru

Zh.M. Kokueva

kokueva@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper describes the process of initiating a project to improve the efficiency of gas turbine plants for driving centrifugal superchargers at compressor stations. The study shows the main trends of increasing the efficiency of gas turbine drives of gas pumping units, gives the constructive-functional appearance of the modern gas turbine drive of the gas pumping unit, and proposes a method for increasing its efficiency

Keywords

Initiation of energy efficiency project, gas turbine plant, compressor station, centrifugal supercharger, gas pumping unit, efficiency

Received 07.06.2018

© Author(s), 2019

REFERENCES

- [1] Kryukov O.V., ed. *Energoberezhenie i avtomatizatsiya elektrooborudovaniya kompressornykh stantsiy* [Power saving and automation of compression plant electric equipment]. Nizhny Novgorod, Vektor TiS Publ., 2010.
- [2] Kokueva Zh.M. *Proekt ot idei do voploshcheniya: voprosy upravleniya* [Project from idea to realization: management issues]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008.
- [3] *Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2020 goda: Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 28 avgusta 2003 no. 1234-r* [Russian energy strategy in period till 2020: RF Government Resolution of 28 August 2003, no. 1234-r] (in Russ.).
- [4] Vasil'yev B.Yu. The study of efficiency of modern electric drive gas pumping units. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2012, no. 4, pp. 104–110 (in Russ.).
- [5] Tumashev R.Z., Molyakov V.D., Lavrent'yev Yu.L. Increasing the efficiency of compressor stations at main gas pipelines. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashino-*

nostr. [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2014, no. 1, pp. 68–79 (in Russ.).

[6] Varaksin A.Yu., ed. *Teoriya i proektirovanie gazoturbinykh i kombinirovannykh ustanovok* [Theory and design of gas turbine and combined plants]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017.

[7] Dyachenko A.I. *Effektivnost' ispol'zovaniya razlichnykh tipov energoprivoda na kompressornykh stantsiyakh*. Dis. kand. tekhn. nauk [Efficiency of using various types of power drive at compressor stations. Cand. tech. sc. diss.]. Moscow, Gubkin University Publ., 2004.

[8] Repin D.G., Rybak V.G., Mikhalev A.Yu., et al. *Gazoturbinnye privody gazoperekachivayushchikh agregatov kompressornykh stantsiy magistral'nykh gazoprovodov. Protsessy i kharakteristiki* [Gas turbine drives of compressor stations gas pumping units of main gas pipelines. Processes and characteristics]. Nizhny Novgorod, Dyatlovyy gory Publ., 2016.

[9] *Vse o gazoperekachivayushchikh agregatakh i gazoturbinykh dvigatelyakh*. GPA-32 "Ladoga". *Internet-resurs* (in Russ.). Available at: <http://все-про-гпа.рф> (accessed: 03.04.2018).

[10] Volkov S.A. [On works of the Combustion chambers CIAM department in relation to combustion chambers with reduced emissions for ground gas turbine plants]. *Pervyy mezhdromstvennyy nauch.-tekhn. seminar po problemam nizkoemissionnykh kamer sgoraniya gazoturbinykh ustanovok* [1st Interdepartmental sc.-tech. seminar on the problems of low-emission combustion chambers of gas turbine plants]. Moscow, TsIAM Publ., 2007.

[11] Shchurovskiy V.A., Sinitsyn Yu.N., Cheremin A.V., et al. *Gazotransportnoe oborudovanie: sostoyanie i perspektivy* [Gas transportation equipment: state and prospects]. *Gazotransportnye sistemy i tekhnologii segodnya i zavtra* [Gas transportation systems and technologies today and tomorrow]. Moscow, VNIIGAZ Publ., 2008, pp. 42–52.

[12] *General'naya skhema razvitiya gazovoy otrasli na period do 2030 goda* [General development scheme of gas industry for the period up to 2030]. *minenergo.gov.ru: website*. Available at: <https://minenergo.gov.ru> (accessed: 25.04.2018).

Komarov E.M. — Student, Department of Gas Turbine and Renewable Energy Power Plants, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Kokueva Zh.M. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Industrial Logistics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Komarov E.M., Kokueva Zh.M. Improving the efficiency of gas pumping units: problems and solutions. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2019, no. 5, pp. 104–118 (in Russ.).

DOI: 10.18698/0236-3941-2019-5-104-118