

---

---

**ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ,  
ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ  
И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

---

---

**АВИАПРОИЗВОДНЫЕ ГТУ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ (ОБЗОР)**

© 2021 г. Г. Г. Ольховский\*

*Всероссийский теплотехнический институт, Автозаводская ул., д. 14, Москва, 115280 Россия*

*\*e-mail: vti@vti.ru*

Поступила в редакцию 22.10.2020 г.

После доработки 02.11.2020 г.

Принята к публикации 18.11.2020 г.

Технологии авиационных газотурбинных двигателей развиваются быстрее, чем наземных газотурбинных установок (ГТУ). Использование достижений авиации при разработке энергетических ГТУ требует значительного времени. Однако возможно прямое применение в энергетических установках узлов авиадвигателей или их генераторов газов целиком с перепроектированием только входных ступеней компрессоров и добавлением силовой турбины, в которой дорасширяются газы, создавшие реактивную струю. Таким образом удается получить мобильный энергетический агрегат мощностью до 60 МВт с КПД более 40%. К настоящему времени в мире уже построены и успешно эксплуатируются тысячи таких ГТУ единичной мощностью от 6 до 45 МВт. В статье рассмотрены конструктивные особенности и основные показатели авиапроизводных ГТУ, разработанных ведущими мировыми производителями – фирмами General Electric (США), Pratt & Whitney (США) и Rolls-Royce (Великобритания), а именно газотурбинных установок LM6000 (и ее модификаций), LM9000 (GE), промышленной ГТУ Trent (Rolls-Royce), газотурбинной установки FT4000 (Pratt & Whitney).

*Ключевые слова:* газотурбинная установка, авиапроизводная ГТУ, парогазовая установка, камера сгорания, пэкидж, компрессор, силовая турбина, скорость вращения, КПД, продолжительность пуска, выбросы вредных веществ

**DOI:** 10.1134/S0040363621110023

Разработки авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), которые должны были обеспечить резкое повышение их единичных мощностей, были начаты накануне Второй мировой войны. Наибольших успехов достигли немецкие конструкторы, использовавшие для этих разработок осевые компрессоры, но они не продвинулись дальше установки таких двигателей на самолеты первых образцов. После войны быстрое развитие ГТД привело к их полному господству в большегрузной и военной авиации.

В это же время появились первые стационарные газотурбинные установки и возникло желание использовать имевшиеся ГТД в экономике.

Условия и режимы работы авиационных ГТД и требования к ним существенно отличаются от тех, что предъявляются при их хозяйственном применении. Изначально ГТД проектируются на многочисленные быстрые пуски и остановы, быстрые наборы и сбросы нагрузки без выдержки между маневрами, и при этом они должны сохранять высокую экономичность и установленные сроки службы. Оценки требующихся для изменений и реализация конструктивных и схемных доработок заняли несколько лет и привели к появлению

в настоящее время флота из сотен авиапроизводных ГТУ, успешно работающих в электроэнергетике, на магистральных газопроводах и в промышленности.

Монополистами в разработке и производстве мощных авиационных ГТД в мире являются фирмы General Electric (США), Pratt & Whitney (США) и Rolls-Royce (Великобритания).

До нынешнего времени различными фирмами для работы в нефтегазовом секторе и энергетике было поставлено более 8.5 тыс. авиапроизводных ГТУ [1]. Заказы последних лет иллюстрируются рис. 1. Общее количество авиапроизводных ГТУ, поставленных ведущими производителями до 2020 г., представлено в табл. 1, а проданных после 2005 г. – в табл. 2.

Лидером по масштабам производства и поставки авиапроизводных ГТД является фирма General Electric – крупнейший производитель также и “тяжелых” стационарных ГТУ. Активные на этом рынке отечественная Объединенная двигателестроительная корпорация (ОДК) и украинская компания “Зоря”–“Машпроект” (г. Николаев), выпускающая ГТД для кораблей.

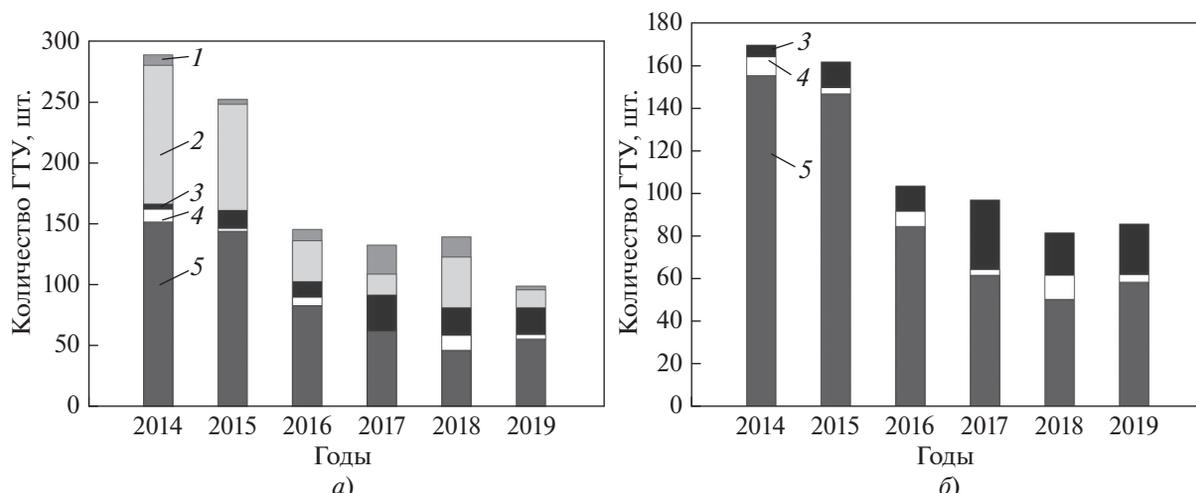


Рис. 1. Заказы на авиапроизводные ГТУ в период с 2014 по 2019 г.

а – весь мир; б – то же без России.

1 – “Зоря”–“Машпроект” (Украина); 2 – “Объединенная двигателестроительная корпорация” (Россия); 3 – Siemens (Германия); 4 – Mitsubishi (Япония); 5 – General Electric (США)

Недавно фирма Rolls-Royce продала свой бизнес авиапроизводных ГТУ фирме Siemens, а Pratt & Whitney – фирме Mitsubishi.

После 2015 г. количество заказов на авиапроизводные ГТУ уменьшилось более чем в 2 раза по сравнению с предыдущим периодом: с 260–290 до 120–150 агрегатов в год. Это обусловлено, в част-

ности, сокращением российских и украинских заказов для газопроводов. Снижение объемов производства зарубежных фирм было несколько меньшим: с 165–170 до 90–100 ГТУ в год.

Данные о конъюнктуре продаж авиапроизводных ГТУ с 2006 по 2019 г. и их общем количестве приведены в табл. 2.

Таблица 1. Общее количество авиапроизводных ГТУ, поставленных ведущими производителями до 2020 г.

Разработчик	Поставщик	Количество, всего	ГТД/год (в среднем)
General Electric	General Electric	4290	250–300
Rolls-Royce	Siemens	2430	Около 150
Pratt & Whitney	Mitsubishi	570	10–15
“Авиадвигатель”	ОДК	1059	47
“Машпроект”	“Зоря”	290	30–50

Таблица 2. Количество авиапроизводных ГТУ, проданных после 2005 г. [1]

Марка ГТУ	Нефтегазовый сектор				Электроэнергетика				Общее количество ГТУ с начала производства, шт.	Разработчик (поставщик) ГТУ
	2006–2012 гг.		2013–2019 гг.		2006–2012 гг.		2013–2019 гг.			
	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%		
FT4000	–	–	1	–	–	–	9	2	10	Pratt & Whitney (Mitsubishi)
FT8	3	–	6	1	231	30	53	12	557	
LM2500	92	12	60	14	34	4	68	15	1736	General Electric (General Electric)
LM2500+	398	57	279	63	81	10	153	34	1136	
LM6000	23	3	6	1	296	38	122	27	1125	
LMS100	0	0	9	2	55	7	23	5	88	
SGT-A30RB	92	12	20	5	1	–	–	–	351	Rolls-Royce (Siemens)
SGT-A35RB	77	11	58	13	10	1	–	–	–	
SGT-A65RB	11	2	5	1	6	8	17	4	117	

В обоих секторах экономики сохраняется высокая эффективность ГТУ LM2500+ фирмы General Electric. Среди наиболее мощных ГТУ начат выпуск FT4000, конкурентоспособных с LM6000, и вариантов фирмы Siemens на базе ГТД Trent (Rolls-Royce).

### ГАЗОТУРБИННАЯ УСТАНОВКА LM6000 И ЕЕ МОДИФИКАЦИИ

Газотурбинная установка LM6000 разработана на базе авиадвигателя CF6 и выпускается фирмой General Electric с 1991 г. [2, 3]. Первоначально мощность ее составляла 40 МВт, КПД – 40%. С 1991 г. выпущено 1200 ГТУ этого типа. Они работают в сумме более 33 млн ч, наибольшая наработка на агрегат достигла 160 тыс. ч. Эта ГТУ применяется для привода электрических генераторов и механизмов. Она работает автономно, в схемах комбинированного производства электроэнергии и тепла и в парогазовых установках.

Газотурбинная установка LM6000 (рис. 2) выполнена двухвальная. Генератор горячих газов для 5-ступенчатой турбины низкого давления (ТНД) состоит из 14-ступенчатого компрессора высокого давления (КВД), камеры сгорания и 2-ступенчатой турбины высокого давления (ТВД) с номинальной частотой вращения 10000 мин<sup>-1</sup>. Турбина НД через вал, находящийся внутри вала ВД, вращает компрессор низкого давления (КНД, 5 ступеней) и выдает полезную мощность со стороны выхода отработавших в ней газов. Выдача мощности возможна и со стороны КНД.

Компрессор низкого давления выполнен с одним регулируемым входным направляющим аппаратом (ВНА), в компрессоре высокого давления (КВД) регулируется шесть направляющих венцов на входе. Изменение положения ВНА обеспечивает согласование расходов воздуха при быстрых пусках, остановках и снижении нагрузок и предотвращает срывные явления при длительной работе на очень малой нагрузке.

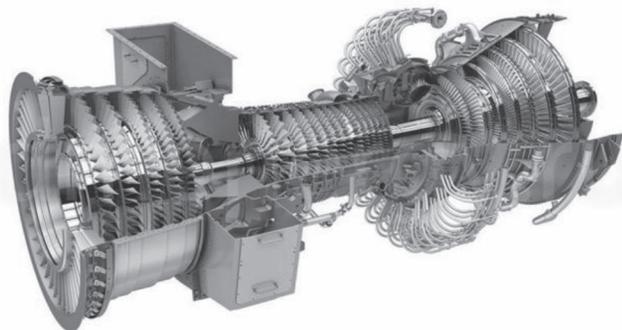


Рис. 2. Общий вид ГТУ LM6000

Аэродинамически совершенные рабочие и сопловые лопатки ТВД выполнены монокристаллическими из жаропрочного сплава и защищены термобарьерным покрытием. Рабочие лопатки всех ступеней ТНД объединены бандажом.

Газотурбинная установка LM6000 поставляется с кольцевыми камерами сгорания (КС) двух типов. Камера первого типа аналогична камере авиационных ГТД и выполнена прямоточной с завихрителем Вентури, обеспечивающим равномерное распределение температуры на выходе из камеры. В ее конструкции предусмотрена возможность замены отдельных форсунок. Пламенная труба для увеличения срока службы выполнена неразъемной и защищена иттрий-циркониевым термобарьерным покрытием.

Камера второго типа – сухая, малоэмиссионная (выпускается с 1995 г.) с предварительной подготовкой топливовоздушной смеси, при работе на природном газе обеспечивает выбросы NO<sub>x</sub> не более 25 млн<sup>-1</sup> при концентрации O<sub>2</sub> равной 15% без впрыска воды или пара, необходимых при работе на малосернистом жидком топливе для снижения концентрации NO<sub>x</sub> менее 42 млн<sup>-1</sup>.

Фирма General Electric последовательно совершенствует конструкции ГТУ с повышением их показателей. Итоги двух модернизаций, проведенных к 2009 и 2016 г., приведены в табл. 3 [4].

После модернизации в 2009 г. модификация PG выпускается с авиадвигательной камерой сгорания, а PH – с малоэмиссионной. С 2013 г. в качестве таковой используется двухкольцевая двухтопливная камера сгорания с выбросами NO<sub>x</sub> менее 15 млн<sup>-1</sup> и CO не более 25 млн<sup>-1</sup> при сжигании природного газа без впрыска воды или водяного пара.

При модернизации ГТУ фирма General Electric применила свои достижения в подборе материалов и технологии, использованные при изготовлении авиадвигателей CF-80E и GE90, а также промышленной ГТУ LMS100.

В 1992 г. начальная температура газа перед ТВД (фирма указывает обычно температуру торможения газового потока перед рабочими лопатками 1-й ступени) была равна 1237°C, а перед ТНД – 832°C. В ГТУ новых модификаций PG и PH для увеличения мощности эта температура перед ТВД была повышена на 55°C, температура на входе в рабочие лопатки турбины низкого давления составляет 900°C, температура газов на выходе – 470°C. Повышение мощности ГТУ также достигнуто благодаря увеличению степени сжатия компрессора, расхода газов и частоты вращения вала НД с 3627 до 3911 мин<sup>-1</sup>.

Газотурбинные установки, работающие в энергосистемах с частотами 50 и 60 Гц, имеют одинаковые значения основных параметров. Ха-

Таблица 3. Параметры ГТУ LM6000 и ПГУ с этими ГТУ

Параметр	Модификация ГТУ (год выпуска)				
	PC (1997)	PF (1997)	PG (2009)	PH (2009)	PF+ (2016)
Электрическая мощность, МВт	45.4	45.0	56.3	52.3	53.0
КПД, %	40.1	42.0	40.1	41.9	41.8
Степень сжатия	29.7	30.1	33.9	33.0	32.1
Расход воздуха, кг/с	130.8	128.3	141.8	138	135.4
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	3627	3627	3911	3911	3911
Температура газов за турбиной, °С	436	455	470	470	504
Мощность ПГУ, МВт	57.9	58.1	73.0	–	70
КПД ПГУ, %	51.5	54.9	52.2	–	55.6
Мощность паровой турбины, МВт	13.5	14.0	18.3	–	18.2

ракетные для них зависимости электрической мощности и КПД от температуры наружного воздуха приведены на рис. 3.

Газотурбинная установка LM6000PG вышла на рынок в первой половине 2010 г., а LM6000PH – в 2011 г.

При модернизации LM6000PH в 2016 г. были изменены материалы дисков последних ступеней компрессора высокого давления (КВД), повышена температура газов в турбине (на выходе до 504°С). Для изготовления лопаток ТВД использованы современные материалы и покрытия, улучшена форма отверстий для пленочного охлаждения. Для уменьшения напряжений изменена конструкция болтов, переконструировано уплотнение 2-й ступени.

В промышленной модели LM6000PH сохранены 90% деталей авиадвигателя. Ротор ГТУ такой же, как в двигателе CF6-80E. Межремонт-

ный период генератора газов этой ГТУ составляет 25 тыс. ч.

Хотя температура газов была повышена, выбросы NO<sub>x</sub> сохранялись на уровне не более 25 млн<sup>-1</sup> при нагрузках от 100 до 50% номинальной.

Всего с 1993 г., когда ГТУ LM6000 были оснащены малоэмиссионными камерами сгорания, в которых возможно сжигание жидкого топлива и различных по свойствам горючих газов, выпущено около 400 таких ГТУ, наработавших в сумме более 10 млн ч.

Обеспечен пуск ГТУ с приемом полной нагрузки за менее чем 10 мин после сигнала на ее повышение, изменение мощности возможно со скоростью 50 МВт/мин.

Совершенствование конструкции пэкиджа позволило снизить на 30% необходимое для его установки время (до 3 мес после подписания контракта на поставку ГТУ и 12 мес – на ПГУ). Одновременно на примерно 5 дБ (А) снизился шум вблизи установки.

В ГТУ LM6000 использована система тонкого распыления воды на входе в КНД и в КВД для испарительного охлаждения сжимаемого воздуха и снижения работы компрессоров (SPRINT). Эта система не потребовала конструктивных изменений ГТУ. В результате мощность ГТУ увеличилась примерно на 10%.

Мощность парогазовых установок с ГТУ LM6000 составляет около 70 МВт, при этом мощность паровой турбины – 15–18 МВт, а КПД ПГУ – более 55%.

#### ГАЗОТУРБИНАЯ УСТАНОВКА LM9000

Газотурбинная установка LM9000 разработана на основе авиадвигателя GE90-115В, используемого на самолетах “Боинг 777” [3]. Мощность на валу составляет 65 МВт, КПД – 43%.

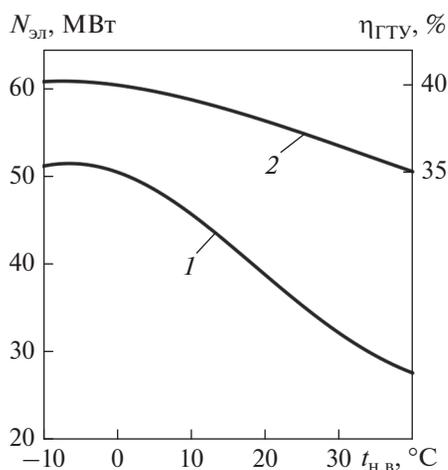
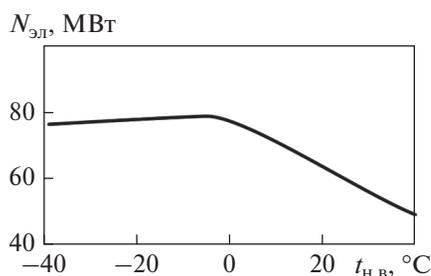


Рис. 3. Зависимость мощности (1) и КПД (2) ГТУ LM6000 от температуры наружного воздуха  $t_{н.в.}$



**Рис. 4.** Зависимость мощности ГТУ LM9000 от температуры наружного воздуха

Установка состоит из двухкаскадного генератора газа, четырехступенчатого компрессора низкого давления, который приводится во вращение одноступенчатой турбиной среднего давления (ТСД), и девятиступенчатого компрессора высокого давления, вращаемого турбиной высокого давления. Малоэмиссионная камера сгорания DLE-1.5 расположена между КВД и ТВД. Четырехступенчатая силовая турбина с номинальной частотой вращения  $3430 \text{ мин}^{-1}$  сохраняет высокий КПД при изменении частоты вращения от 70 до 105% [3]. Для согласования режимов при пусках и на малых нагрузках предусмотрена возможность сброса значительной части воздуха после КНД.

Газотурбинная установка LM9000 может работать на природном газе и жидком топливе с выбросами  $\text{NO}_x$  не более  $15 \text{ млн}^{-1}$  и  $\text{CO}$  не более  $25 \text{ млн}^{-1}$ .

При комбинированной выработке электроэнергии и тепла коэффициент использования тепла топлива может превышать 80%.

Умеренные габариты позволяют разместить ГТУ в пэкидже длиной 12.5 м, шириной 5 м и высотой 4.5 м.

Межремонтные интервалы для LM9000 увеличены по сравнению с LM6000 и составляют между:

малыми инспекциями до 12 тыс. ч;

инспекциями с заменой горячих деталей до 36 тыс. ч;

капитальными ремонтами до 72 тыс. ч.

Конструкция пэкиджа допускает замену генератора газа или всей ГТУ (с силовой турбиной) в течение 24 ч. Зависимость мощности ГТУ LM9000 от температуры наружного воздуха показана на рис. 4.

Фирма General Electric последовательно развивает свои ГТУ. Мощность модели LM2500 за 45 лет ее применения выросла с 18 до 34 МВт (на 90%), ГТУ LM6000 за 25 лет — на 45%. Имеются возможности повышения мощности и LM9000.

## ПРОМЫШЛЕННАЯ ГТУ TRENT

Промышленный Trent — трехвальный газотурбинный двигатель, являющийся модификацией ГТД RB 211 и Trent 800, разработанных фирмой Rolls-Royce в 90-х годах прошлого века для широкофюзеляжных самолетов “Боинг” серий 747, 757, 767 и 777.

Промышленный Trent развивает мощность от 42 до 66 МВт и используется для привода электрических генераторов и механизмов [5, 6] (рис. 5). Параметры энергетических ГТУ на базе авиадвигателя Trent приведены в табл. 4.

В промышленных ГТУ вентилятор авиадвигателя заменен на двухступенчатый компрессор низкого давления, создающий такую же, как в ГТД, степень сжатия. Он приводится во вращение силовой турбиной, соединенной также с валом электрического генератора (или какого-то другого нагрузочного устройства). Частота его вращения — 3000 или  $3600 \text{ мин}^{-1}$  (в зависимости от частоты энергосистемы).

В пятиступенчатой силовой турбине длины лопаток последних двух ступеней увеличены для преобразования тяги ГТД в работу.

Генератор газов состоит из компрессора среднего давления (восемь ступеней, номинальная частота вращения  $6675 \text{ мин}^{-1}$ ) и компрессора высокого давления (шесть ступеней,  $9950 \text{ мин}^{-1}$ ). Имеется возможность регулирования положения четырех направляющих аппаратов КВД.

Рабочие лопатки КНД, первых шести ступеней компрессора среднего давления (КСД) и 1-й ступени КВД, направляющие лопатки 1-й и 2-й ступеней КСД и диски КНД, КСД и первые четыре ступени

**Таблица 4.** Параметры энергетических ГТУ на базе авиадвигателя Trent

ГТУ	Мощность, МВт	КПД, %	Степень сжатия	Расход газов, кг/с	Температура за турбиной, °C
C DLE	53.1	42.4	33.3	155.3	433
C DLE ISI	63.5	43.2	37.9	176.6	417
C WLE	66.0	41.4	39.1	178.2	425
C WLE ISI	66.0	41.5	39.0	178.6	422

Примечание. DLE — система сжигания топлива без впрыска воды; WLE — с впрыском воды; ISI — испарительное охлаждение воздуха, засасываемого компрессором ГТУ из атмосферы.

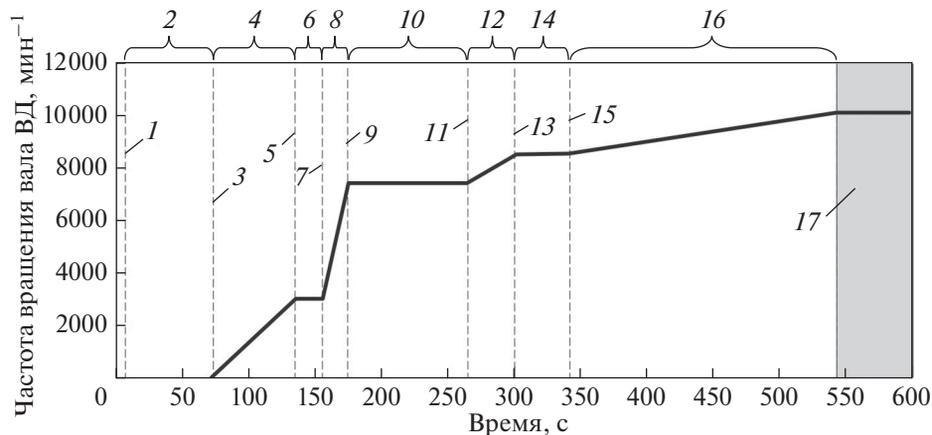


Рис. 5. Диаграмма пуска промышленной ГТУ Trent.

1 – предпусковые условия выполнены, запуск системы вентиляции; 2 – сигнал на запуск, включение системы вентиляции (70 с); 3 – начало вращения ГТУ для продувки; 4 – разворот ГТУ (60 с); 5 – достигнута требуемая частота вращения; 6 – продувка (21 с); 7 – окончание продувки; 8 – разворот до предсинхронной частоты вращения (20 с); 9 – предсинхронные обороты достигнуты; 10 – прогрев (90 с); 11 – прогрев закончен; 12 – разгон с предсинхронных до синхронных оборотов (40 с); 13 – готовность к синхронизации; 14 – синхронизация (30 с); 15 – включение в сеть; 16 – нагружение до 66 МВт (194 с); 17 – достигнута базовая нагрузка

КВД изготовлены из титанового сплава. Рабочие лопатки 7-й и 8-й ступеней КСД и 2-й ступени КВД, направляющие лопатки всех ступеней КНД, 3–8-й ступеней КСД и первые три ступени КВД выполнены из стали, а рабочие лопатки 3–6-й ступеней, направляющие лопатки 4–6-й ступеней и диски 5–6-й ступеней КВД – из никелевых сплавов.

Турбина высокого давления (ТВД, 1-я ступень) приводит во вращение КВД, турбина среднего давления (ТСД, 1-я ступень) – КСД, силовая турбина низкого давления (ТНД, пять ступеней) – КНД и электрический генератор. Все лопатки и диски турбин изготовлены из никелевых сплавов. Рабочие лопатки ТВД и ТСД монокристаллические. Роторы ГТУ опираются на восемь подшипников качения: пять роликовых и три шариковых.

Топливо сжигается в блочно-кольцевой камере сгорания с восемью пламенными трубами. Эта камера выполнена кольцевой с 24 форсунками и двумя запальниками.

Система сжигания топлива для обеспечения требуемых выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  была изменена. При работе на природном газе это достигается конструктивными мероприятиями без впрыска воды (DLE). Впрыск воды в камеру сгорания (WLE) обеспечивает нормативные выбросы и на газе, и на жидком топливе. Мощность ГТУ при этом возрастает независимо от вида топлива, а КПД снижается.

Другим средством повышения мощности является испарительное охлаждение воздуха, засасываемого компрессором ГТУ из атмосферы водой, распыляемой в воздухозаборном тракте установки (ISI).

Длина ГТУ Trent составляет 5.7 м, ширина – 2.8 м, высота – 2.7 м; масса ГТУ с камерой DLE – 13.8 т, с камерой WLE – 11.8 т. Масса пэкиджа равняется 190 т, его длина – 26.5 м (с системой ISI – 29.5 м), ширина – 4.6 м, высота – 4.9 м.

Пэкидж с промышленной ГТУ Trent спроектирован модульным для оптимизации эксплуатации и технического обслуживания, а также сокращения необходимого для монтажа и ремонтов времени. При проведении капитальных ремонтов двигателя в заводских условиях время простоя для смены двигателя составляет менее 2 сут.

Пуск энергетической ГТУ Trent из холодного состояния до полной нагрузки занимает 10 мин. Пуски и циклические режимы работы не увеличивают расходования ресурса. Нарботка ГТУ Trent между капитальными ремонтами составляет 25 тыс. ч, в течение которых возможно 7500 холодных пусков. Автономный пуск ГТУ возможен при избыточном давлении природного газа 2.2 МПа и внешней мощности менее 300 кВт.

Нормальная скорость повышения мощности ГТУ составляет 21 МВт/мин, снижения нагрузки – 10.2 МВт/мин. Возможно разгружение со скоростью 39 МВт/мин, а при необходимости и до 75 МВт/мин. Достигнутый рекорд продолжительности пуска до полной нагрузки составляет 8 мин (см. рис. 5).

Начальная температура газов в ПГУ Trent – около 1250°C, температура отработавших в ГТУ газов – около 450°C. Несмотря на ее умеренный уровень, достаточно экономичные высокоманевренные парогазовые установки, способные быстро запускаться и принимать нагрузку, могут быть созданы с одной или двумя ГТУ Trent (табл. 5).

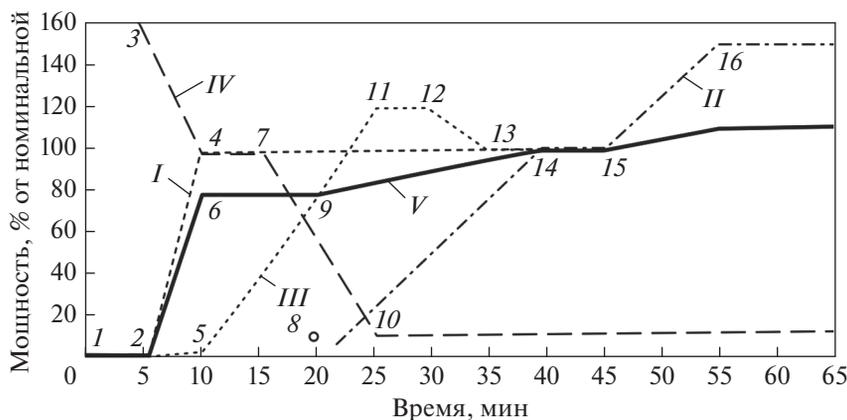


Рис. 6. Диаграмма пуска ПГУ с одной и двумя ГТУ Trent.

*I* – нагрузка ГТУ; *II* – нагрузка паровой турбины; *III* – расход пара ВД; *IV* – выбросы  $\text{NO}_x$  [100% =  $50 \text{ мг/м}^3$  (при нормальных условиях)]; *V* – нагрузка ПГУ. 1 – сигнал на запуск; 2 – одновременное зажигание топлива на двух ГТУ; 3 – максимальная концентрация  $\text{NO}_x$ ; 4 – разворот и нагружение ГТУ; 5 – подача пара ВД; 6 – полная нагрузка ГТУ; 7 – включение системы снижения выбросов  $\text{NO}_x$ ; 8 – включение паровой турбины в сеть; 9 – нагружение; 10 – снижение  $\text{NO}_x$  до минимума; 11 – полный расход пара ВД; 12 – подача пара НД; 13 – полный расход пара НД; 14 – полная нагрузка ПГУ; 15 – включение дополнительных горелок в газовом тракте котла-утилизатора; 16 – пиковая нагрузка ПГУ

В ПГУ использован паровой цикл двух давлений. При сжигании перед котлом-утилизатором дополнительного топлива с повышением температуры газов до  $540^\circ\text{C}$  мощность ПГУ растет на примерно 20%, а удельный расход топлива – на 3.3–3.5%. При повышении температуры до  $700^\circ\text{C}$  мощность ПГУ увеличивается на 30–35%, удельный расход топлива – на 4.5%.

Умеренные значения температуры газов и свежего пара позволяют применять более простые и дешевые материалы, снижать стоимость парового контура, уменьшать термические напряжения при теплосменах, избежать ползучести металлов. В ПГУ использован прямоточный котел, допускающий быстрые пуски и изменения нагрузки. При пуске из холодного состояния ПГУ с двумя ГТУ Trent DLE и одной паровой турбиной полная нагрузка может быть взята за 40 мин после сигнала на запуск. При этом 80% номинальной мощности ПГУ, развиваемой двумя ГТУ, могут быть выданы в течение первых 10 мин (рис. 6).

В настоящее время продано уже более 100 ГТУ Trent для производства электроэнергии и привода механизмов.

#### ГАЗОТУРБИННАЯ УСТАНОВКА FT4000 ФИРМЫ PRATT & WHITNEY

Авиапроизводная газотурбинная установка FT4000, разработанная фирмой Pratt & Whitney на базе ГТД 4000, состоит из генератора газа GG 4000-1 и силовой турбины PT-4000-1.

Генератор газа выполнен двухвальным. На валу низкого давления с номинальной частотой вращения около  $6000 \text{ мин}^{-1}$  находится заново спроектированный четырехступенчатый компрессор низкого давления, который приводится во вращение одноступенчатой турбиной низкого давления.

Компрессор высокого давления (состоит из 11 ступеней) приводится во вращение двухступенчатой турбиной высокого давления. Он подает воздух, сжатый до примерно 3.3 МПа, в коль-

Таблица 5. Показатели ПГУ с одной и двумя ГТУ Trent

Показатель	DLE	DLE ISI	WLE	WLE ISI
Мощность, МВт:				
ПГУ нетто	66.4/131.2	77.7/155.6	81.3/162.8	82.9/166.1
ГТУ	50.8/101.5	62.0/124.0	64.5/129.0	66.0/132.0
ГТУ паровой турбины	15.8/32.1	17.1/34.5	18.3/37.0	18.5/37.2
КПД ПГУ, %	53.5/53.8	53.4/53.5	51.4/51.6	51.3/51.4

Примечание. В числителе – значения показателей ПГУ с одной ГТУ, в знаменателе – с двумя ГТУ.

**Таблица 6.** Основные показатели ГТУ FT4000 с одним двигателем [7]

Показатель	Режим 1	Режим 2
Мощность, МВт	51.8	70.0
КПД, %	41.0	41.3
Степень повышения давления	29.9	36.3
Расход газов, кг/с	149.8	177.5
Температура отработавших газов, °С	440	417

Примечание. Для режима 2 приведены показатели ГТУ с созданием тумана на входе в двигатель и влажным сжатием.

цевую камеру сгорания с расположенными по окружности 24 радиальными распылителями топлива. Продукты сгорания расширяются последовательно в ТВД, ТНД и трехступенчатой силовой турбине и отводятся далее через осевой диффузор.

Углы установки лопаток входного направляющего аппарата и направляющего аппарата 1-й ступени КНД регулируются общим приводом.

Корпус КНД, выполненный с горизонтальным разъемом, соединяется с корпусом КВД через опирающуюся на фундамент промежуточную вставку, в которой расположены опорные и упорные подшипники качения обоих валов. Через эту вставку организован антипомпажный сброс части сжатого в КНД воздуха.

Для оптимизации запуска и работы FT4000 при частичных нагрузках предусмотрен также сброс воздуха после 8-й ступени КВД, а направляющие аппараты на 1–3-й ступенях КВД выполнены поворотными.

После 4-й и 8-й ступеней КВД воздух отбирается на охлаждение и уплотнения узлов турбины.

В камере сгорания ГТУ могут сжигаться чистые жидкие топлива, природный газ и их смеси. Их зажигание при пуске осуществляется двумя воспламенителями. Для снижения выбросов может использоваться впрыск воды в КС.

Для охлаждения горячих деталей 1-й ступени ТВД используется воздух полного давления, 2-й ступени ТВД – воздух, отобранный после 8-й ступени

**Таблица 7.** Характерные показатели ПГУ с одной и двумя ГТУ FT4000

Показатель	Число ГТУ FT4000	
	одна	две
Мощность, МВт:		
ПГУ, нетто	83.9	169.0
ГТУ	68.1	136.6
паровой турбины	17.4	35.9
КПД ПГУ, %	50.8	51.2

КВД, деталей ТНД – воздух из отборов, расположенных за 4-й и 8-й ступенями КВД.

Ротор высокого давления опирается на подшипник, находящийся между КВД и ТВД, которая выполнена консольной.

Вал, соединяющий КНД и ТНД, проходит внутри ротора ВД и опирается со стороны турбины на подшипник во вставке между генератором газа и силовой турбиной.

Силовая турбина выполнена без охлаждения деталей проточной части. Ее консольный ротор опирается на два подшипника, расположенных, как и упорный подшипник, в выходном корпусе силовой турбины, который устанавливается на фундамент. Следует отметить, что имеются различия в конструкциях силовых турбин, предназначенных для работы с частотой 50 или 60 Гц, а также с вращением по часовой стрелке и против нее.

Для смазки генератора газа используется синтетическое масло, силовой турбины и электрогенератора – минеральное.

В табл. 6 представлены показатели ГТУ FT4000 (в пакете SWIFTRAC) на уровне моря при температуре наружного воздуха 15°С и влажности 60%. Потери на входе в ГТУ и выходе из нее отсутствуют. Используется стандартная камера сгорания.

При работе с впрыском в камеру сгорания 3.5 кг/с воды в целях снижения выбросов  $\text{NO}_x$  до 25 млн<sup>-1</sup> мощность ГТУ возрастает до 60 МВт, а КПД снижается до 40.3%.

В табл. 7 приведены показатели, характерные для ПГУ с одной и двумя ГТУ FT4000.

## ВЫВОДЫ

1. Авиапроизводные ГТУ единичной мощностью до 70 МВт широко применяются в электроэнергетике и нефтегазовом секторе экономики. Они обладают высокой тепловой экономичностью (КПД составляет 38–43%), небольшими массой и габаритами, что облегчает их перевозку, установку и обслуживание, а также высокой маневренностью и соответствием основным техническим требованиям в сферах применения этих ГТУ.

2. Компании, добившиеся успеха в разработке и производстве газотурбинных установок в последние 30–45 лет, выпустили сотни или даже тысячи авиапроизводных ГТУ. Показатели этих ГТУ при сохранении размеров критических деталей существенно улучшились. В результате последовательного совершенствования конструкции, технологии производства и материалов мощности конкретных моделей увеличились в 1.5–2 раза.

3. Эксплуатация авиапроизводных ГТУ отработана и регламентируется на основе опыта авиационных двигателей. Существенные ремонты проводятся в заводских условиях с сохранением работоспособности ТЭС путем установки резервного двигателя.

4. Использование авиапроизводных ГТУ в схемах ПГУ менее убедительно. Исходные двигатели спроектированы с высокими степенями сжатия воздуха, приближенными к оптимальным по КПД при автономной работе. Вследствие этого температура отработавших в них газов составляет, как правило, не более 500°C. Это ограничивает параметры и мощность парового контура и КПД ГТУ, который обычно не превышает 55%.

5. При комбинированном производстве электроэнергии и тепла для авиапроизводных ГТУ, напротив, характерна более высокая выработка электроэнергии на тепловом потреблении.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Industrial** Gas Turbine Market/ June 2020/ Webinar/ Turbomachinery International 2020/ 12c/
2. **Гончаров В.В.** ГТУ средней мощности фирм General Electric и Rolls-Royce // Энергохозяйство за рубежом. 2013. № 4. С. 17–21.
3. **Flin D.** LM 9000 promises power and lower cost of ownership // Gas Turbine World. Sept.–Oct. 2017. P. 15–17.
4. **Gas Turbine World**, 2019. Performanse. Specs. V. 34.
5. **Trent 60** Gas Turbine // Gas Turbine World. May–June 2009. V. 27. P. 18–19.
6. **Welch M.** Flexible distributed power generation using industrial trent gas turbine // Proc. Power Gen Europe 2016. Milan, Italy, 21–23 June 2016.
7. **Asguino M.** Introductory FT4000 SP 60 rated at 61.2 MN and 40.4% efficiency // Gas Turbine World. Sept.–Oct. 2014.

### Aeroderivative GTUs for Power Generation (Overview)

G. G. Ol'khovskii\*

All-Russia Thermal Engineering Institute, Moscow, 115280 Russia

\*e-mail: vti@vti.ru

**Abstract**—Aircraft gas turbine engine technology has made more rapid advancement than land-based gas turbine unit (GTU) technology has. The application of aviation achievements in the development of power gas turbines requires much time. However, assemblies from aircraft engines or their complete gas generators can be used directly in power plants with redesigning only the inlet stages of the compressors and adding a power turbine where after-expansion of the jet gases occurs. Therefore, this enables us to develop a mobile power unit with an output as high as 60 MW and an efficiency above 40%. Thousands of such GTUs with an individual power ranging from 6 to 45 MW have already been constructed and are successfully operating throughout the world. The article discusses the design features and main performance indicators of aeroderivative gas turbines developed by the world's leading manufacturers, such as General Electric (United States), Pratt & Whitney (United States), and Rolls-Royce (United Kingdom), namely, the GE LM6000 GTU (and its modifications), GE LM9000 GTU, industrial (Rolls-Royce) Trent GTU, and FT4000 GTU from Pratt & Whitney.

**Keywords:** gas-turbine unit, aeroderivative GTU, combined-cycle unit, combustion chamber, package, compressor, power turbine, rotational speed, efficiency, starting time, harmful emissions