

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

### НАИБОЛЕЕ МОЩНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ГТУ (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.

Кратко изложена история создания газотурбинных установок (ГТУ). Первая энергетическая ГТУ была построена швейцарской фирмой Brown Boveri в 1939 г. Коэффициент полезного действия этой ГТУ составил 17.5%. Современный технический уровень ГТУ проанализирован на примере наиболее мощных из них (550–600 МВт), выпускаемых четырьмя мировыми энергомашиностроительными фирмами: General Electric (США), Siemens (Германия), Mitsubishi (Япония) и Ansaldo (Италия, наследник Brown Boveri). Коэффициент полезного действия таких газотурбинных установок достиг 44%, а парогазовых установок на их основе – 63–64%. Их высокая эффективность является результатом последовательного развития науки и технологий: аэродинамики турбомашин, высокотемпературных материалов и конструкций деталей из них с передовыми системами охлаждения и новыми покрытиями, методов формообразования таких деталей, устройств малоэмиссионного сжигания топлива и систем управления. Рассмотрены перспективы развития газотурбиностроения в мире. Приведена зависимость удельной стоимости ГТУ различных типов от их мощности. Сделан вывод о том, что использование наиболее мощных и экономичных ГТУ в отечественной электроэнергетике позволит более чем на треть снизить расходы топлива на выработку электроэнергии. Создание с использованием опыта отечественного авиационного газотурбостроения производства в стране наиболее совершенных ГТУ необходимо для технического перевооружения электроэнергетики России.

*Ключевые слова:* газотурбинная установка, парогазовая установка, авиационные двигатели, мощность, термодинамический цикл, расход топлива, поколения ГТУ, коэффициент полезного действия, электроэнергетика, удельная стоимость ГТУ

DOI: 10.1134/S0040363621060060

Прообразом современных газотурбинных установок были турбонаддувные агрегаты корабельных котлов. Для уменьшения их габаритов и массы в их топку нагнетался сжатый в компрессоре воздух с давлением около 0.3 МПа, а уходящие из котла газы с температурой около 500°C расширялись до атмосферного давления в турбине, мощности которой хватало для привода компрессора.

Первая энергетическая ГТУ была построена выпускавшей такие агрегаты швейцарской фирмой Brown Boveri в 1939 г. При температуре газов перед турбиной 550°C и степени повышения давления в компрессоре примерно 3.5 ее мощность составляла 4 МВт, а КПД около – 17.5% [1].

Последующее развитие и широкое применение ГТУ получили в качестве авиационных двигателей и стационарных энергетических установок.

На электрических станциях это развитие заключалось в увеличении вслед за авиацией начальной температуры газов и степени повышения давления, а также в оптимизации термодинамического цикла путем промежуточного охлажде-

ния воздуха при сжатии, промежуточного подвода тепла при расширении и регенерации тепла отработавших в турбине газов.

Пожалуй, наиболее сложный термодинамический цикл и схема были реализованы на установке ГТ-12-3, выпущенной ЛМЗ в 1955 г. для работы на низкокалорийном газе, полученном в результате подземной газификации углей [2, 3].

### СОВРЕМЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ ГТУ

В настоящее время стационарные, выполненные по простейшему термодинамическому циклу, ГТУ достигли высокой степени совершенства. Наиболее мощные из них (550–600 МВт) [4, 5] (см. таблицу) производятся четырьмя фирмами – мировыми лидерами энергомашиностроения: General Electric (США), Siemens (Германия), Mitsubishi (Япония) и Ansaldo (Италия, наследник Brown Boveri). Начальные температуры газов перед соплами 1-й ступени турбин этих ГТУ находятся в диапазоне 1600–1700°C при степенях повыше-

Показатели наиболее мощных перспективных ГТУ и ПГУ для энергосистем с частотой 50 Гц

Показатель	Тип ГТУ (фирма-изготовитель)					
	9HA02 (General Electric)	M701JAC (Mitsubishi)	M701JAC (Mitsubishi)	SGT5-8000HL (Siemens)	SGT5-8000HL (Siemens)	GT-36 (Ansaldo)
Год выпуска	2014			2017		
Мощность, МВт	571	448	574	481	593	538
КПД, %	44.0	44.0	43.4	42.6	42.8	42.8
Степень сжатия	23.8	25.0	25.0	24.0	24.0	26.0
Расход воздуха, кг/с	1040	766	1024	851	1051	1021
Температура отработавших газов, °С	640	663	646	680	670	621
Удельная работа, кДж/кг	549	586	561	565	564	527
Удельная масса, кг/кВт	0.757	—	0.976	—	0.838	1.073
Масса, т	432	—	560	—	497	577
Размеры, м:				—		
длина	10.7	—	18.3	—	13.1	13.4
ширина	4.9	—	7.0	—	5.2	5.8
высота	4.9	—	7.0	—	5.5	6.7
Мощность ПГУ, МВт	838	650	840	708	870	760
КПД ПГУ, %	64.1	64.0	64.0	Более 63.0	Более 63.0	62.6
Мощность паровой турбины, МВт	277	208.3	269.1	235	Около 265	227

ния давления  $\pi_k = 24-26$ , близких к оптимальным значениям по удельной работе (кДж/кг расхода воздуха). В документации США используется температура торможения газов в абсолютном движении на входе газовой турбины в рабочие лопатки 1-й ступени, которая из-за подмешивания воздуха, охлаждающего сопла 1-й ступени, на  $100-150^\circ\text{C}$  ниже приведенных ранее. Расходы воздуха в наиболее мощных из рассмотренных установок превышают 1000 кг/с (см. таблицу). Аналогичные ГТУ мощностью 350–430 МВт выпускаются для энергосистем с частотой 60 Гц [4].

Выпускаемые в мире в тот или иной период с близкими техническим уровнем, параметрами и показателями ГТУ в литературе принято называть “поколениями”. Так, установки поколения F, выпускаемые примерно с 1980 г., характеризуются начальной температурой газов  $1200^\circ\text{C}$ , впоследствии возросшей до  $1400^\circ\text{C}$ .

В настоящее время, примерно с 2000 г., происходит смена поколения F на H, а с 2015 г. — на HA, HL, JAC (разные аббревиатуры соответствуют разным фирмам) с начальными температурами  $1600-1700^\circ\text{C}$ . Возможность достижения таких температур закладывается, по-видимому, заранее и реа-

лизуется с накоплением опыта производства и эксплуатации.

Все наиболее мощные ГТУ выполнены одновальными, с общим двухпорным ротором компрессора и турбины в корпусе с горизонтальным разъемом, локализацией и воздушным охлаждением деталей горячего тракта в камере сгорания и турбине, соединением ГТУ с электрогенератором со стороны компрессора и осевым выхлопом из турбины.

Нынешняя смена поколений связана с освоением систем сжигания топлив, позволяющих существенно уменьшить выбросы вредных веществ в более широком диапазоне режимов, трехмерным аэродинамическим проектированием профилей лопаток турбомашин, применением перспективных сплавов и методов формообразования, новых покрытий лопаток и методов охлаждения. Успехи в этих направлениях привели к повышению мощности и КПД ГТУ, снижению выбросов в атмосферу вредных веществ, ускорению пусков и нагружения ГТУ и даже увеличению межремонтных периодов.

Новые ГТУ предназначены для циклической работы. Они быстро запускаются и принимают на-

грузку со скоростью до 90 МВт/мин. Для сокращения сроков поставки не только ГТУ, но и их вспомогательное оборудование сконструировано и обвязано трубопроводами в модулях заводского изготовления.

В ГТУ фирмы General Electric для повышения расхода воздуха и мощности новая рабочая лопатка 1-й ступени компрессора изготовлена из титанового сплава. В состав ГТУ входит малоэмиссионная камера сгорания, в которой сохраняются приемлемые выбросы вредных веществ при разгрузке ГТУ до 30% мощности и можно сжигать смеси природного газа с водородом при содержании последнего до 50% [6].

Фирма General Electric заключила к середине 2020 г. договоры на поставку около 100 ГТУ поколения H. Сорок из них, общей мощностью 18 ГВт, уже находятся в эксплуатации.

Специалисты фирмы Siemens подчеркивают, что их турбины HL являются не новой разработкой, а продуктом естественного развития установок поколения H [7, 8]. Головная ГТУ SGT5-9000 HL для энергосистем с частотой 50 Гц осваивается в составе ПГУ на ТЭС Keadby 2 шотландской энергокомпании SSE.

Как и в ГТУ поколения H, для охлаждения деталей горячего тракта в ГТУ SGT5-9000 модификации HL используется только цикловой воздух. Ротор турбогруппы выполнен дисковым с одной центральной стяжкой, хиртовой центровкой и соединением дисков. Для повышения экономичности в турбине используется система гидравлической оптимизации радиальных зазоров, которые изменяются в результате перемещения ротора гидравлическим усилием в осевом направлении. Все лопатки компрессора и турбины могут быть заменены без выемки ротора. Отличиями ГТУ HL от модификации H являются:

более высокая (на 100°C) начальная температура газов, обеспеченная совершенствованием систем охлаждения лопаток турбины через внутренние каналы, оптимизацией уплотнений в трактах подачи охлаждающего воздуха для уменьшения его расходов, а также использованием более эффективных покрытий (см. далее);

применение компрессора третьего поколения с лопатками, спрофилированными с учетом пространственных эффектов. Несмотря на более высокую степень повышения давления (24 вместо 20), число ступеней уменьшено с 13 до 12. Входной направляющий аппарат и направляющие аппараты 1-й и 2-й ступеней выполнены поворотными. Положение их лопаток регулируется в зависимости от режима. Все направляющие лопатки установлены консольно непосредственно в корпусе компрессора и могут быть сняты без выемки ротора;

расположение в жаровых трубах камеры сгорания вокруг пилотной горелки не 8, а 25 горелок. В них сжигается топливовоздушная смесь, для приготовления которой расходуется весь воздух. Длина патрубков, по которым продукты сгорания подводятся к турбине, уменьшена для сокращения времени пребывания в них горячих газов. Это снизило образование оксидов азота при высоких температурах;

повышенное термическое сопротивление тепловому потоку, создаваемое эффективными керамическими покрытиями на поверхности сопловых и рабочих лопаток турбины. Покрытия выполняются многослойными с учетом износа (истирания) внешнего слоя в первый период эксплуатации, когда с потоком газов в турбину могут попадать эрозионно опасные посторонние частицы;

выполнение рабочих лопаток 4-й ступени с внутренним охлаждением вследствие повышения температуры газов за турбиной до 680°C; они устанавливаются свободно и могут быть сняты, как и рабочие лопатки 1-й ступени, без вскрытия цилиндра.

Газотурбинная установка SGT5-9000HL рассчитана на эксплуатацию в маневренном режиме с пуском в составе ПГУ до полной нагрузки за 30 мин. Интервал между инспекциями (средними ремонтами) составит 33 тыс. эквивалентных часов эксплуатации или 1250 пусков [9].

Фирма Siemens заключает с энергокомпаниями – покупателями головных ГТУ взаимовыгодные договоры на длительное (годы) их освоение в эксплуатации на электростанциях.

Японская фирма Mitsubishi начинала производство промышленных ГТУ с покупки лицензии фирмы Westinghouse (США), которая в то время разрабатывала проект с паровым охлаждением деталей камеры сгорания и турбины при начальной температуре газов 1400°C (поколение H). Фирма Mitsubishi создала такую ГТУ и провела ее испытания под нагрузкой на своей опытной электростанции [10].

В дальнейшем Mitsubishi длительное время выпускала ГТУ с пароохлаждаемыми жаровыми трубами камер сгорания и отводом тепла в контур промежуточного перегрева пара ПГУ (поколение G). Такая схема охлаждения существенно увеличивала продолжительность пуска ГТУ в связи с подключением подачи пара на охлаждение. С учетом этого опыта в настоящее время фирма Mitsubishi маркирует свои ГТУ литерой J, добавляя AC [это означает, что с полностью воздушным охлаждением (см. таблицу)]. Начальная (перед соплами 1-й ступени турбины) температура газов в этих ГТУ составляет 1650°C.

С 2004 г. Mitsubishi участвует в японском национальном проекте создания ГТУ с начальной температурой газов 1700°C, который планирова-

лось завершить в 2020 г. Коэффициент полезного действия ПГУ с такими ГТУ может достигать 67% [11].

Для дальнейшего совершенствования своих ГТУ фирма Mitsubishi развивает исследования, направленные на создание:

- более эффективных систем охлаждения с использованием каналов сложной формы, выполняемых с помощью аддитивных технологий;
- перспективных керамических композитов, сохраняющих работоспособность при температурах до 1300°C;
- легких металлов для изготовления, например, компрессорных лопаток.

Результаты этих исследований сразу используются для совершенствования выпускаемых ГТУ.

На мощных ГТУ фирмы Mitsubishi (модификация JAC) достигнуты высокие показатели надежности (99.5%) и эффективности (КПД ПГУ 64%). Общая мощность заказов на них с 2016 г., когда начался выпуск, к 2019 г. достигла 14 ГВт.

На долю фирмы Ansaldo, ставшей наследницей опыта Brown Boveri, ABB и Alstom, выпала коммерциализация ГТУ GT-36, также принадлежащей поколению Н. Фирма Ansaldo подписала коммерческий контракт стоимостью 60 млн евро на поставку первой такой ГТУ на ТЭС Minquan (Китай) для работы в составе ПГУ в контролируемой государством Шанхайской электрогенерирующей компании [12].

При продаже теплоэнергетического бизнеса Alstom фирме General Electric в 2015 г. власти ЕС и США, регулирующие вопросы конкуренции, договорились о сохранении как ГТУ GT-26 и GT-36, которые посчитали наиболее значительными достижениями, так и более 400 ключевых сотрудников в области газотурбостроения в созданном в Швейцарии отделении фирмы Ansaldo. Само производство этих ГТУ было перенесено на завод в Генуе. Для организации этого производства потребовалось три года и около 65 млн евро дополнительных инвестиций.

Первая ГТУ GT-36-S5 мощностью 538 МВт была отправлена в Китай в феврале 2018 г. Мощность ПГУ с этой ГТУ составляла 760 МВт, КПД 62.6%, температура отработавших в турбине газов 630°C, выбросы  $\text{NO}_x$  не более 30 или 50 мг/м<sup>3</sup> (при нормальных условиях) в зависимости от требований заказчика.

В состав ГТУ GT-36-S5 входят 15-ступенчатый компрессор, 4-ступенчатая охлаждаемая воздухом турбина и блочно-кольцевая камера сгорания с 16 жаровыми трубами, в которых организовано двухступенчатое сжигание топлива, обеспечивающее небольшие выбросы  $\text{NO}_x$  при разгрузке ГТУ до 30%, а при отключении 2-й ступени – до 10%. Несмотря на низкую экономичность, такие

режимы могут кратковременно использоваться с выходом, при необходимости, на полную нагрузку за 10 мин без расхода ресурса на остановку. В этой ГТУ возможно применять разные чистые топлива. Она спроектирована и может эксплуатироваться в двух предельных режимах: с наибольшими нагрузкой и КПД или с увеличенным межремонтным периодом.

При работе ГТУ 8 тыс. ч в год с наибольшей нагрузкой инспекцию горячего тракта надо проводить через три года. Фирма Ansaldo рекомендует ограничивать время работы с максимальными температурами и проводить инспекции горячего тракта с интервалом 32 тыс. ч. Простой и надежный сварной ротор турбогруппы не требует разборки для контроля и ремонта дисков.

## ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Фирма Siemens использует смещение ротора турбогруппы ГТУ по оси для регулирования радиальных зазоров у вершин рабочих лопаток турбины. Такое регулирование осуществляется автоматически в зависимости от режима (нагрузки) и относительного положения статора и ротора.

В ГТУ фирмы Mitsubishi перепуски воздуха мимо горелок и зоны горения на выход из жаровых труб, обеспечивавшие в ней малоэмиссионное сжигание вплоть до холостого хода, сейчас уже не применяются, видимо, из-за сложности управления этим процессом.

В 1990-е годы в США при государственной поддержке были спроектированы и построены мощные энергетические ГТУ с использованием водяных или паровых систем охлаждения деталей этих установок. Однако в настоящее время работы по созданию таких систем охлаждения прекратились. Так, фирма General Electric изготовила и поставила на электростанции шесть пароохлаждаемых ГТУ мощностью около 200 МВт каждая: три в Японию, две в США и одну в Англию. Эти ГТУ работали с температурой торможения газов на входе во вращающиеся лопатки 1-й ступени турбины 1430°C и должны были обеспечивать КПД ПГУ 60%. Сопловые и рабочие лопатки 1-й ступени турбины были выполнены монокристаллическими и охлаждались паром, протекавшим в их внутренних каналах и отводившимся затем в тракт промежуточного перегрева парового контура ПГУ. Это требовало создания сложной системы уплотнений и сопровождалось потерей давления пара. В итоге пароохлаждаемые ГТУ оказались дороже и сложнее в эксплуатации и техническом обслуживании, чем воздухоохлаждаемые, и не пригодны для покрытия пиковых нагрузок и работы с частыми, быстрыми пусками. В настоящее время в эксплуатации осталась только одна такая ГТУ на ТЭС Baglan Bay в Уэльсе (Велико-

британия). Выполняя аналогичный проект фирма Westinghouse использовала пар для охлаждения, в основном, жаровых труб камер сгорания. Перенявшие ее опыт фирмы Mitsubishi и Siemens в своих последних, наиболее эффективных моделях заменили паровое охлаждение на воздушное [9, 11].

Прекратились также разработки ГТУ, функционирующих по усложненному термодинамическому циклу.

Выпускается только одна модель – авиапроизводная ГТУ LMS-100 фирмы General Electric [13] – с промежуточным охлаждением при сжатии воздуха. В ее компрессор высокого давления воздух поступает после сжатия в компрессоре низкого давления, который образован первыми ступенями компрессора стационарной ГТУ 6FA той же фирмы, и снижения температуры в поверхностном воздухоохладителе. При общей степени повышения давления  $\pi_k = 40$  мощность такой ГТУ составляет около 100 МВт с КПД примерно 43%. В то же время КПД ПГУ с этой ГТУ составляет 52.7%. Это ниже, чем КПД ПГУ с авиапроизводными ГТУ без промежуточного охлаждения мощностью 40–50 МВт на той же технической базе, которые могут достигать 56%.

Следует отметить, что некоторое распространение получили системы увлажнения воздуха при сжатии путем испарения из него воды, позволяющие увеличить мощность ГТУ. Однако для таких систем требуется вода высокой чистоты.

Промежуточный перегрев газов при их расширении использовался в мощных ГТУ, разработанных в Швейцарии и выпускавшихся там же фирмами АВВ и Alstom – правопреемниками бывшей Brown Boveri, а сейчас General Electric и Ansaldo [14]. Освоение этих ГТУ сопровождалось большими трудностями и затратами, что вынудило руководство АВВ продать свой энергомашиностроительный бизнес фирме Alstom. Эта фирма успешно завершила их освоение, и несколько их десятков успешно работают в настоящее время в энергосистемах с частотой 50 и 60 Гц. Неоспоримое достоинство ГТУ Alstom – возможность их глубокой разгрузки при сохранении приемлемых выбросов вредных веществ в атмосферу и условий работы парового контура. Существенного повышения КПД ПГУ с ними достичь не удалось из-за пониженной температуры газов перед турбиной высокого давления и увеличения расхода воздуха на охлаждение корпуса ГТУ, камеры сгорания и турбины низкого давления [13].

Заслуживает внимания снижение в ГТУ фирмы Mitsubishi температуры воздуха высокого давления перед его подачей на охлаждение дисков и лопаток ротора турбины с использованием отводимого тепла для подогрева топливного газа до

150–200°С в аппарате с промежуточным теплоносителем, которым является окружающий воздух.

В ГТУ поколения F фирмы Alstom тепло, отводимое от охлаждающего воздуха, используется для выработки пара высокого давления.

Разгрузка мощных ГТУ поколения F сопровождается прикрытием входного направляющего аппарата компрессора с уменьшением расхода воздуха и степени повышения его давления на 30–40%. Для расширения рабочего диапазона нагрузок фирма General Electric использует перепуск сжатого в компрессоре воздуха на его вход, что позволяет разгрузить ГТУ практически до холостого хода. При этом сохраняются высокие температуры отработавших в турбине газов, приемлемые для работы парового контура, и возможность быстрого восстановления нагрузки при необходимости.

Важным является использование новых достижений в ГТУ предыдущих поколений для существенного повышения их показателей путем замены при текущих и капитальных ремонтах тех или иных узлов. Реализация этих мероприятий уже привела к существенному повышению мощности и КПД таких ГТУ [4].

#### СТОИМОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГТУ В 2018 г.

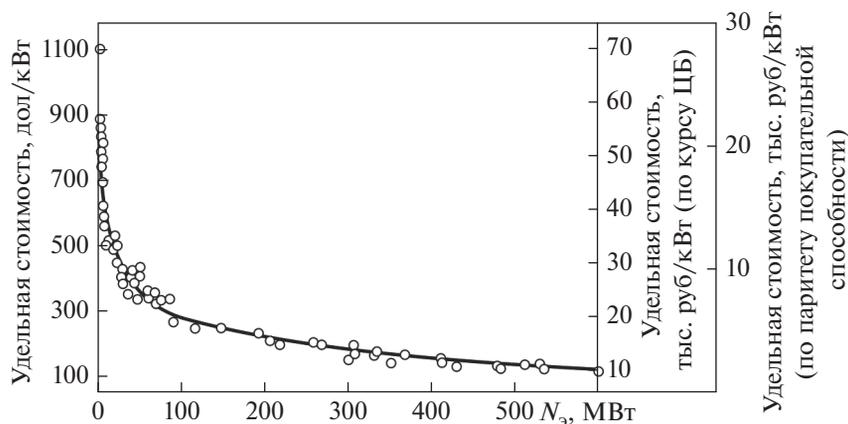
Стоимость газотурбинной электростанции зависит от ее мощности и комплектации, места расположения, технического исполнения и оптимизации характеристик для конкретных условий применения.

Далее рассматривается стандартный проект установки ГТУ в пэкидже<sup>1</sup>, работающей на природном газе (одном виде топлива), заказе одной ГТУ при отгрузке с завода. Транспортные расходы, конструирование, изготовление, специфические для данного проекта расходы и расходы владельца в цену не входят.

В 2017 г. эти цены немного (примерно на 3%) выросли по сравнению с ценами предыдущих лет. Учитывая значительные избытки производственных мощностей у изготовителей и потребности в крупных ГТУ, можно, однако, надеяться, что эта тенденция переменится.

При оценках затрат в объем поставки включены установленная под обшивкой ГТУ, электрический генератор, необходимые для их работы механические и электрические системы, АСУ ТП. В состав ГТУ входят пусковой двигатель, редуктор (если необходимо), маслосистема смазки и гидравлические системы, оборудование для промывки компрессора, подготовки и регулиро-

<sup>1</sup> От англ. package – подготовленный и испытанный на заводе блок, готовый к эксплуатации.



Зависимость удельной стоимости ГТУ различных типов от мощности, дол/кВт и тыс. руб/кВт (по курсу ЦБ РФ 65 руб/дол) и по паритету покупательной способности

вания подачи топлива, устройства для внешнего охлаждения турбины (если необходимо), трубопроводные и кабельные связи.

Электрический генератор с возбудителем охлаждается воздухом. Водородное или замкнутое водовоздушное охлаждение обычно применяется на мощных ГТУ.

Вспомогательное оборудование включает в себя: воздухозаборное устройство с фильтрами, воздухопроводами и глушителями шума, выхлопные газоходы с невысокой дымовой трубой и глушителем шума, систему вибромониторинга и цифровую АСУ ТП.

Пэкиджи энергетических ГТУ выполняются стандартно со звукоизолирующими ограждениями, вентиляцией и системой пожарозащиты.

Механическое и электрическое (батареи, центры управления двигателями, регуляторы напряжения и защиты от перенапряжения) вспомогательное оборудование ГТУ часто устанавливается поставщиком в самостоятельных блоках под обшивкой, уже налаженное и подготовленное к работе.

Как правило, опциями являются трансформаторы собственных нужд, от которых питаются пусковые двигатели, приводы маслонасосов смазки, вентиляторов систем охлаждения и другие электромоторы и главный повысительный трансформатор. Еще одна опция поставщика — топливные системы и камеры сгорания для жидкого топлива или двухтопливные (газ + жидкое топливо) системы.

Стоимостные показатели ГТУ определены при стандартных наружных условиях ISO (температура 15°C, высота на уровне моря) и работе на природном газе при базовой нагрузке ГТУ. Зависимость удельной стоимости ГТУ от их единичной мощности приведена на рисунке. Кроме мощности на удельную стоимость ГТУ влияют конструк-

тивный тип: традиционная (frame) или авиапроизводная — и такие параметры, как начальная температура газов, степень повышения давления и массовый расход воздуха.

Действительная стоимость ГТУ устанавливается в договорах на поставку с гарантиями на мощность (нетто) и удельный расход тепла в условиях ее применения (наружная температура, высота над уровнем моря, влажность) с небольшим запасом по этим показателям для учета погрешностей изготовления и проведения испытаний. Гарантии характеризуют вновь изготовленную чистую ГТУ без деградации показателей при применении.

На стоимость ГТУ влияют также число заказываемых агрегатов, объем поставки, режимы предстоящей эксплуатации, особенности месторасположения ГТУ.

В связи с развитием технологий и усложнением конструкций ГТУ увеличивается стоимость материалов и процессов формообразования. Одновременно повышаются единичная мощность и экономичность (КПД) ГТУ и ПГУ. Важным итогом развития технологий и усложнения конструкций является снижение удельной стоимости ГТУ и ПГУ при одновременном повышении КПД.

## ВЫВОДЫ

1. Энергетические газотурбинные установки достигли единичной мощности 550–600 МВт с КПД до 44%, коэффициенты полезного действия парогазовых установок с такими ГТУ составляют 63–64%. Использование ПГУ с передовыми показателями эффективности в отечественной электроэнергетике позволит более чем на треть снизить расходы топлива на выработку электроэнергии.

2. Оборудование для электростанций с мощными ГТУ необходимо разрабатывать и произво-

дять в России. Его проектирование, изготовление, монтаж, доведение до требуемых кондиций в эксплуатации должны быть тщательно спланированы, организованы и выполнены собственными силами отечественных организаций электроэнергетики, энергетического и авиадвигателестроения по долговременному – на 10 лет и более – плану, разработанному по поручению, утвержденному и контролируемому правительством.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Stodola A.** Leistungversuch an einer Gleichdruck – gasturbine der AG Brown Boveri // Brown Boveri Mitt. 1940. № 4.
2. **Френкель Л.Д.** Газотурбинные установки ЛМЗ для электростанций // Энергомашиностроение. 1960. № 2.
3. **Ольховский Г.Г., Шувалов Г.И.** Результаты испытания газотурбинной установки типа ГТ-12-3, установленной на Шатской станции Подземгаза // Теплоэнергетика. 1959. № 10. С. 17–22.
4. **Gas Turbine World**, 2019. Performanse Specs. 35th ed.
5. **Cutting-edge** high-capacity gas turbines for 50 Hz power generation incorporating state-of-the-art technologies. <https://power.mhi.com/products/gasturbines/lineup/m701j>
6. **Burdet A., Doyle R., Parandopoulos T.** GE’s HA modular power island for improved construction and operational leadership. Powergen Europe, Milan, Italy, 21–23 June 2016.
7. **Ratcliff P., Garbett P., Fiscer W.** The new Siemens gas turbine SGT5-8000H for more customer benefit // VGB PowerTech. 2007. № 9. P. 128–132.
8. **Ister J.** HL-class promises 63% combined cycle efficiency // Gas Turbine World. Nov.–Dec. 2017. P. 10–14.
9. **Schwarz K.** HL-Klasse Gasturbinen – das nächste Level in puncto Effizienz und Flexibilität // VGB PowerTech. 2018. V. 8. P. 36–39.
10. **Cooling-steam** application in industrial gas turbines and full experience / V. Kallianpur, Y. Fukuizumi, S. Shiozaki, Y. Twasaki, R. Hirokawa // Power Gen Europe. Amsterdam. 8–10 June 2010.
11. **Key technologies for 1700°C class ultra high temperature gas turbine** / K. Yshizaka, K. Saitoh, E. Ito, M. Yuri, J. Masada // Mitsubishi Heavy Industries Techn. Rev. Sept. 2017. V. 54. № 3. P. 23–32. <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e543/e543023.pdf>
12. **Appleyard D.** First GT36 set for commercial operation // Gas Turbine World. Nov.–Dec. 2018.
13. **Ольховский Г.Г.** Тепловые испытания мощных энергетических ГТУ. М.: Изд. дом “Фолиум”, 2015.
14. **Isles J.** GT26 HE upgrade will boost efficiency at Snorham // Gas Turbine World. Sept.–Oct. 2019. P. 10–12.

### The Most Powerful Energy GTU (Review)

G. G. Olkhovsky\*

All-Russia Thermal Engineering Institute, Moscow, 115280 Russia

\*e-mail: vti@vti.ru

**Abstract**—The history of the creation of gas-turbine units (GTU) is briefly stated. The first power gas turbine was built by the Swiss company Brown Boveri in 1939. The efficiency of this gas turbine was 17.5%. The modern technical level of gas turbines is analyzed by the example of the most powerful of them (550–600 MW), produced by the four world power engineering firms: General Electric (United States), Siemens (Germany), Mitsubishi (Japan), and Ansaldo (Italy, Brown Boveri successor). The efficiency of such gas-turbine units has reached 44%, and combined-cycle gas turbines based on them have reached 63–64%. Their high efficiency is the result of the consistent development of science and technology: aerodynamics of turbomachines, high-temperature materials and designs of parts made of them with advanced cooling systems and new coatings, methods of forming such parts, and devices for low-emission combustion of fuels and control systems. The prospects for the development of gas-turbine engineering in the world are considered. The dependence of the unit cost of various types of gas turbines on their capacity is given. It is concluded that the use of the most powerful and economical gas turbines in the domestic electric power industry will allow for the reduction in fuel consumption for electricity generation by more than a third. The creation of the most advanced gas-turbine units in the country using the experience of domestic aviation gas turbine construction is necessary for the technical reequipping of the Russian electric power industry.

**Keywords:** gas-turbine unit, combined-cycle plant, aircraft engines, power, thermodynamic cycle, fuel consumption, gas turbine generations, efficiency, electric power industry, unit cost of gas turbine