

ХАЛАТОВ

Артем Артемович — академик НАН Украины, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом высокотемпературной термогазодинамики Института технической теплофизики НАН Украины

КАРП

Игорь Николаевич — академик НАН Украины, доктор технических наук, профессор, почетный директор Института газа НАН Украины

КУЦАН

Юлий Григорьевич — доктор технических наук, заместитель Председателя Общественного совета — глава Комиссии по вопросам научно-технического развития топливно-энергетического комплекса при Министерстве энергетики и угольной промышленности Украины

УДК 532.516: 536.24.01

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ГАЗОТУРБОСТРОЕНИЕ: ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ УКРАИНЫ

Рассмотрены перспективы использования газовых турбин для покрытия базовых, пиковых и полупиковых нагрузок в энергетике Украины, проанализировано состояние газотурбинной промышленности Украины, сделано заключение о необходимости создания Государственной программы в интересах проектирования газовых турбин нового поколения. Статья подготовлена по материалам круглого стола «Энергетическое газотурбостроение в Украине: современное состояние и перспективы развития», состоявшегося 19 марта 2015 г. в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.

Ключевые слова: энергетика Украины, газовая турбина, пиковые и полупиковые нагрузки.

Тепловая энергетика Украины

Сегодня основу Объединенной энергосистемы (ОЭС) Украины составляют тепловые, атомные, гидро- и гидроаккумулирующие электростанции. За три года (2011—2013 гг.) годовое производство электроэнергии в стране стабилизировалось на уровне 194—198 млрд кВт·ч, однако в 2014 г. упало до 182 млрд кВт·ч. В 2013 г. на тепловых электростанциях было выработано 49% всей выработанной электроэнергии, на атомных — 42,9%; суммарно произведено 194 млрд кВт·ч, что соответствует почти 3500 кВт·ч электроэнергии на душу населения (56-е место в мире).

Тепловая энергетика Украины создавалась в 60—70-х годах XX в. и сейчас почти 85% мощностей превысили проектный ресурс. Ее установленная мощность (блоки 150, 200 и 300 МВт) — около 30 ГВт (54,5%); среднегодовой коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) ТЭС Украины в 2013 г. составил только 31% (для сравнения: в мире в среднем — около 45%), что обусловлено простоями и ремонт-

ными работами, а также консервацией устаревшего оборудования.

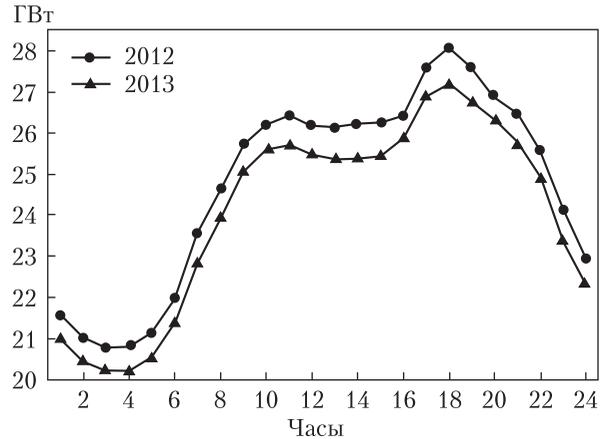
В настоящее время 11 энергоблоков суммарной мощностью более 2 ГВт уже отработали свыше 300 тыс. часов, что соответствует *граничному сроку эксплуатации*, 43 блока мощностью 10,4 ГВт эксплуатируются 250–300 тыс. часов, а 26 блоков мощностью 6,7 ГВт — 200–250 тыс. часов (0,6 ГВт — в долгосрочном ремонте и на консервации). Как известно, 200 тыс. часов наработки соответствуют также границе *физического износа* энергоблока [1]. В 2012 г. среднее количество аварийных остановок энергоблоков в месяц (46) было наивысшим за весь срок эксплуатации энергетического оборудования Украины.

Фактическая установленная мощность ТЭС Украины в 2012 г. снизилась до 20,3 ГВт, из которых 1,5 ГВт находились на реконструкции. До 2020 г. в Украине не планируется строительство новых энергоблоков, а лишь реконструкция действующих с продолжением срока их эксплуатации на 15–20 лет и увеличением установленной мощности на 5–10 %.

Средний электрический КПД ТЭС Украины составляет 29–31 %, тогда как за рубежом лучшие энергоблоки при работе в базовом режиме достигли уровня 45 %. При работе на антраците удельные затраты топлива в Украине превышают 400 г у.т./1 кВт·ч электроэнергии. Наилучший показатель по затратам топлива достигнут на Змиевской ТЭС (блок № 8) — 345–385 г у.т./1 кВт·ч. В 2030 г. в Украине планируется достичь показателя 347 г у.т./1 кВт·ч, тогда как в Европе он сегодня составляет 280–320 г у.т./1 кВт·ч.

По экологии ТЭС Украины также не соответствуют европейским требованиям; их показатели составляют: твердые частицы — 400–3200 мг/нм³, диоксид серы — 600–9000 мг/нм³ и оксиды азота — 400–1600 мг/нм³. Энергетика Украины дает свыше 50 % выбросов оксидов азота, более 60 % оксидов серы и 30 % твердых частиц. Выбросы углекислого газа от энергетики составляют около 2,2 т на человека в год.

Энергосистема Украины работает в условиях дефицита маневренных мощностей



Среднее потребление электроэнергии в Украине по часам в рабочие дни в январе 2012 и 2013 г. [2]

(4–5 ГВт), которые сегодня составляют только 9 % от установленной мощности против минимально необходимых для стабильной работы ОЭС Украины 15–20 %. Энергоблоки мощностью 100–200 МВт, которые можно было бы использовать в качестве «полупиковых» мощностей, составляют только 17 % против необходимых 30–35 %.

Суточная разница между максимальной и минимальной нагрузкой энергосистемы (ночной «провал») в Украине составила: зимой 2012 г. — 7400 МВт, зимой 2013 г. — около 7000 МВт (см. рис.). В летний период эта разница на 35–40 % меньше. Например, 02.02.2012 минимальная загрузка мощности ОЭС Украины была 24,6 млн кВт, а максимальная — рекордные 31,8 млн кВт.

В целом при базовой загрузке более 5000 часов в год объем «пиковой» нагрузки ТЭС Украины составляет 3000–4500 часов, а «полупиковой» — менее 1500 часов в год. Покрытие «пиковой» части суточного графика нагрузки в Украине на 40–50 % обеспечивается агрегатами ГЭС и ГАЭС, а остальная часть — за счет работы ТЭС в маневренном режиме, что приводит к необходимости остановки в ночное время на 4–6 часов около 15 блоков осенью-зимой и 7 блоков — летом. Учитывая современное состояние тепловой энергетики Украины, ее эксплуатация в маневренном ре-

жиме усиливает сложившуюся негативную ситуацию. Частота отказов турбогенератора при работе ТЭС в маневренном режиме возрастает в 2,5–2,7 раза по сравнению с работой энергоблоков в базовом режиме. Одновременно существенно снижается его эксплуатационный ресурс.

Хотя в ближайшей перспективе планируется достроить Днестровскую и Ташлыкскую ГАЭС и расширить Каневскую ГАЭС, дефицит «пиковой» мощности в Украине сохранится до конца 2030 г., т.е. даже после завершения строительства всех ГАЭС. Мировой опыт показывает, что для устойчивой работы энергосистемы необходимо иметь 15–20% маневренных мощностей по отношению к общей установленной мощности.

Что касается потребления электроэнергии населением Украины, то этот показатель составляет только 461 кВт·ч на человека в год (чуть более 13% от произведенной электроэнергии). Это в 5,65 раза меньше, чем в Норвегии, и в 3 раза меньше, чем в США. По HDI-индексу (Human Development Index) Украина занимает 78-е место в мире (HDI = 0,74). Энергоемкость внутреннего валового продукта в Украине в 2,5 раза выше, чем в среднем в развитых странах мира. В Украине этот показатель составляет 0,5 нефтяного эквивалента на 1 долл. США, в то время как в Дании он равен 0,13, в Великобритании — 0,14, в Японии — 0,16 и в США — 0,22. Это обусловлено несовершенной структурой украинской экономики и использованием устаревших технологий в наиболее энергоемких отраслях промышленности.

В 2014–2015 гг. в результате боевых действий на Юго-Востоке Украины в энергетике страны возникли проблемы с работой пылеугольных энергоблоков, использующих угли марок А и Т, которые преимущественно добываются на Донбассе. Таких электростанций в Украине половина (7 из 14), причем их суммарная установленная мощность составляет около 11 ГВт. К сожалению, по ряду причин Польша, Австралия и другие страны не могут восполнить недостаток угля антрацитовой

группы. Переход ТЭС Украины на использование угля марки Г, которого достаточно много в центральной и западной части страны, принципиально возможен, но он сопряжен с дополнительными финансовыми затратами и реорганизацией инфраструктуры электростанций с целью повышения их пожаробезопасности.

Другая проблема заключается в том, что в неконтролируемой Украиной зоне Луганской и Донецкой областей остались 85 (60%) угольных шахт и обогатительных фабрик, 4 ТЭС установленной мощностью около 5 ГВт, что составляет более 25% от технически задействованной мощности ТЭС Украины. По-видимому, при неблагоприятном развитии ситуации на Юго-Востоке страны стратегия украинской энергетики уже не сможет базироваться на преобладании «угольного сценария».

Газотурбостроение в энергетике

В последние годы в мировой энергетике широкое распространение получили инновационные разработки в области энергетического газотурбостроения. Единичная мощность газотурбинной установки (ГТУ) простого цикла Брайтона достигла 375 МВт, а парогазовой установки (ПГУ) — превысила 550 МВт. Стоимость газовых турбин простого цикла мощностью 100–200 МВт составляет 200–250 долл. США за 1 кВт установленной мощности, а стоимость ПГУ мощностью от 100 до 200 МВт — 570–650 долл. США за 1 кВт установленной мощности. Стоимость «под ключ» 1 кВт установленной мощности ПГУ электростанций на природном газе составляет 2000–2500 долл. США, что значительно ниже стоимости АЭС и угольных ТЭС с минимизацией вредных выбросов по европейским нормам. Парогазовые установки характеризуются высоким коэффициентом использования топлива (до 90%). При сжигании 1 м³ природного газа можно получить 4–5 кВт·ч электричества и 3–4 кВт·ч тепловой энергии (в эквиваленте).

Газовые турбины обладают высокой маневренностью, они характеризуются быстрым стартом и набором полной мощности в течение

20–30 мин. Это позволяет использовать их в базовом режиме, но особенно эффективно — для покрытия «пиковых» и «полупиковых» нагрузок, причем без существенной потери в КПД. Газотурбинные электростанции имеют малый срок ввода в эксплуатацию (2–3 года), характеризуются более низкими капитальными затратами и малым сроком возврата вложенных инвестиций (3–5 лет).

Сегодня в развитых европейских странах до 20 % базовых электрогенерирующих мощностей приходится на газовые турбины простого цикла и парогазовые установки, а удельный вес газовых турбин для покрытия «пиковых» и «полупиковых» нагрузок составляет 30 % мощностей. При этом газотурбинные установки характеризуются низким уровнем выбросов вредных продуктов в атмосферу, которые уже сегодня удовлетворяют европейским стандартам в энергетике.

Использование природного газа в ГТУ и ПГУ не является сдерживающим фактором для развития газотурбинных технологий, т.к. технико-экономические и, особенно, экологические характеристики газовых турбин существенно превышают показатели многих энерготехнологий. В последние годы все чаще применяются альтернативные энергоносители для ГТУ и ПГУ, наиболее распространенные из них — продукты газификации угля, внутрицикловая газификация угля, уголь микронного помола и др. В отдельных случаях рентабельной является доставка сжиженного газа морским путем (например, в Японии и Южной Корее).

Состояние украинского газотурбостроения

Украина входит в число шести стран мира, которые обладают полным циклом проектирования и серийного производства газовых и паровых турбин, что подтверждает высокий уровень ее технологического производства. Инфраструктура украинского газотурбостроения является уникальной, ее особенность — проектирование и производство газотурбинных двигателей и

установок для авиации, морского флота, энергетики и механического привода. Мощностной ряд серийного производства газотурбинных установок простого цикла составляет от 2,5 до 25 МВт (в ближайшей перспективе — до 60 МВт), парогазовых установок — от 13,5 до 70 МВт. Около 80 % средних по мощности ГТУ (до 60 МВт) и ПГУ (до 170 МВт) Украина может производить на своей территории.

Основные конструкторские бюро и производственные организации турбостроения Украины — это ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект» (г. Николаев), ГП «Ивченко-Прогресс» и ОАО «Мотор-Сич» (г. Запорожье), ОАО «Турбоатом» (г. Харьков), ОАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе», Криворожский завод «Констар». В инфраструктуру турбостроения входят также институты НАН Украины, изучающие проблемы материаловедения, сварки металлов, ремонта, прочности и надежности, теплофизики, электродинамики, газодинамики, горения топлив. С 2007 г. при Отделении физико-технических проблем энергетики НАН Украины функционирует Комиссия по промышленным газовым турбинам и электроприводам, в состав которой входят ученые Академии, вузов и специалисты газотурбинной промышленности Украины. Подготовка инженерных и исследовательских кадров проводится в технических университетах Киева, Харькова, Николаева, Запорожья.

В ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект» созданы более 30 типов главных и ускорительных корабельных газотурбинных установок, которыми оснащены около 30 % газотурбинных кораблей мирового флота. Двигатели предприятия составляют 33 % суммарной мощности газотурбинных двигателей морских транспортных средств мира. Продажа морских газотурбинных двигателей осуществляется в 20 стран мира. Свыше 660 приводных и энергетических газовых турбин мощностью от 6 до 25 МВт установлены в России, Беларуси, Казахстане, Туркменистане, Китае, Южной Корее и других странах.

Более 20 лет назад в ГП НПКГ «Зоря»—«Машпроект» по заказу Российской Феде-

рации была создана энергетическая ГТУ-110 мощностью 110 МВт с КПД 35,5% и ПГУ-160 на ее основе, которая сегодня успешно работает в России. Для газотранспортной системы Украины разработан проект регенеративной ГТУ-16Р мощностью 16 МВт с КПД около 40%. Близка к выходу на рынок энергетическая газовая турбина ГТЭ-45/60 мощностью 45 и 60 МВт с КПД 34–36%, на основе которой возможно создание парогазовой установки мощностью 85 и 170 МВт с КПД около 52%.

Газотурбинные авиационные двигатели ГП «Ивченко-Прогресс» применяются на 54 типах летательных аппаратов в 122 странах мира. В последние годы в конструкторском бюро начата работа над новым газотурбинным двигателем АИ-28 для серии гражданских самолетов АН-148, АН-158, АН-168, АН-178, разработан проект газотурбинного двигателя АИ-312 для механического привода мощностью 12 МВт с КПД около 36%.

Перспективы использования газовых турбин в энергетике Украины

Продукция украинского газотурбостроения может эффективно использоваться в энергетике Украины. Для базовой энергетики — это украинско-российская ГТД-110 и ПГУ-160 на ее основе, а также перспективные ГТЭ-45/60, ПГУ-85 и ПГУ-170 МВт. Для покрытия «пи-

ковых» и «полуциковых» нагрузок могут применяться создаваемые ГТЭ-45/60, ПГУ-85, серийные газотурбинные установки мощностью 16 и 25 МВт, парогазотурбинные установки среднего класса мощностью 13,5–70 МВт на базе ГТУ 10–25 МВт (ГП НПКГ «Зоря» — «Машпроект»). Кроме того, серийные ГТУ мощностью 25 МВт и ГТЭ-45/60 мощностью 45 и 60 МВт могут использоваться в качестве газотурбинной «надстройки» энергетических котлов, работающих на докритических параметрах пара, и для их преобразования в ПГУ.

Газотурбинная надстройка является наиболее оптимальным решением при реконструкции угольных энергоблоков Украины мощностью 200 и 300 МВт, которые являются основой ее тепловой энергетики. Оптимальное соотношение ГТУ и ПГУ в этом случае составляет 15–30%, что позволяет использовать украинские газовые турбины мощностью 25 и 60 МВт.

ГП НПКГ «Зоря» — «Машпроект» имеет достаточный опыт использования этой технологии в Беларуси на Березовской ГРЭС. Применение двух установок ГТУ-25 позволило преобразовать паротурбинный блок ПТУ-160 в ПГУ мощностью 215 МВт. При этом КПД блока увеличился до 39–40%, а потребный расход газа — всего на 5%. Стоимость модернизации энергоблока составила около 100 долл. США в расчете на 1 кВт установленной мощности,

Сравнительные характеристики украинских и зарубежных наземных газотурбинных установок

Модификация двигателя и производитель	Мощность, МВт	КПД, %	Эмиссия NO _x , мг/нм ³	Ресурс до капитального ремонта / назначенный ресурс, ч
UGT-16000 НПКГ «Зоря»—«Машпроект» (Украина)	16,3	35	40	33 000/100 000
LM1600-PE-NGW General Electric (США)	14,89	36,8	50	40 000/160 000
UGT-25000 НПКГ «Зоря»—«Машпроект» (Украина)	26,7	36,5	50	25 000/100 000
FT8-2 Pratt & Whitney (США)	27,49	38	50	50 000/240 000
Д-336-2Т ГП «Ивченко-Прогресс» (Украина)	6,3	31	50	25 000/100 000
501-КВ7 Rolls-Royce (Великобритания)	5,8	32,9	50	25 000/100 000
АИ-336-1; -2 ГП «Ивченко-Прогресс» (Украина)	10,0	34	50	25 000/100 000
Mars 100 GS Solar Turbines (США)	10,7	32,5	50	40 000/200 000

расчетный срок эксплуатации станции увеличился на 20 лет.

Неплохие перспективы имеет также газотурбинная надстройка в сочетании со стадийным сжиганием топлива, что позволяет снизить выбросы оксидов азота на 40–50 %.

Как уже отмечалось выше, продукция газотурбинной промышленности Украины пока еще занимает устойчивые позиции на международном рынке, однако в последние годы намечилось определенное отставание от ведущих мировых производителей по ряду важных показателей в своем классе (см. табл.). Подобная ситуация в значительной степени обусловлена отсутствием программы научных исследований на ближайшую и далекую перспективы и практически полным исчерпанием имеющегося научного «задела». Сегодня роль отраслевых институтов, которые в 1991 г. остались за пределами Украины, вынужденно выполняют институты НАН Украины. Они сохранили основные научные кадры в области газотурбостроения, однако не имеют серьезной опытно-экспериментальной базы. До сих пор в Украине отсутствует государственная программа в этой области.

Важное место в украинской энергетической системе занимает *малая энергетика*, которая потребляет значительное количество топлива. Это промышленные ТЭЦ, котлы коммуналь-

ной энергетики, районные котельные, автономные теплоцентрали, энергетические узлы промышленных предприятий. Сегодня они характеризуются высоким удельным расходом условного топлива (181,9 кг у.т. на 1 Гкал теплоты) [2].

Для промышленности и коммунального хозяйства Украины большой интерес представляют когенерационные установки с использованием паровых турбин малой мощности (0,2–2,0 МВт), потребность в которых составляет около 3000 установок, а также реконструкция существующих котельных в мини-ТЭЦ с электрической мощностью до 50 МВт. Удельный расход топлива на выработку электроэнергии в таких установках составляет около 180 г у.т. на 1 кВт·ч, что более чем в 2 раза меньше по сравнению с «большой» энергетикой. Удельная стоимость 1 кВт установленной мощности мини-ТЭЦ составляет 1000–2000 долл. США, а срок окупаемости проектов – 3–5 лет [2].

В заключение отметим, что для сохранения уникального потенциала газотурбинной промышленности Украины и обеспечения конкурентоспособности ее продукции на мировом рынке крайне необходима государственная поддержка отрасли, как в части проведения новых конструкторских разработок, так и выполнения передовых научно-технических исследований.

REFERENCES

1. Volchyn I.A., Dunaevska N.I., Haponych L.S., Chernyavskiy M.V., Topal O.I., Zasyadko Ya.I. *Prospects for implementation of clean coal technologies in the energy sector of Ukraine*. Kyiv: Gnozis, 2013. [in Ukrainian].
[Вольчин І.А., Дунаєвська Н.І., Гапонич Л.С., Чернявський М.В., Топал О.І., Засядько Я.І. *Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України*. К.: ГНОЗИС, 2013].
2. Shubenko A.L., Malyarenko V.A., Senetskiy A.B., Babak N.Yu. *Heat and power technologies in the energy sector, based on the application of small power steam turbines*. Kharkov: Institute for Mechanical Engineering Problems, 2014. [in Russian].
[Шубенко А.Л., Маляренко В.А., Сенецкий А.В., Бабак Н.Ю. *Когенерационные технологии в энергетике на основе применения паровых турбин малой мощности*. Харьков: Институт проблем машиностроения НАН Украины, 2014].

Статья поступила 22.07.2015.

А.А. Халатов ¹, І.М. Карп ², Ю.Г. Куцан ³

¹ Інститут технічної теплофізики НАН України (Київ)

² Інститут газу НАН України (Київ)

³ Міністерство енергетики та вугільної промисловості України (Київ)

ЕНЕРГЕТИЧНЕ ГАЗОТУРБОБУДУВАННЯ: ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ УКРАЇНИ

Розглянуто перспективи використання газових турбін для покриття базових, пікових і напівпікових навантажень в енергетиці України, проаналізовано інфраструктуру газотурбінної промисловості України, зроблено висновок про необхідність створення Державної програми в інтересах проектування газових турбін нового покоління. Статтю підготовлено за матеріалами круглого столу «Енергетичне газотурбобудування в Україні: сучасний стан та перспективи розвитку», що відбувся 19 березня 2015 р. в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

Ключові слова: газова турбіна, енергетика України, пікові та напівпікові навантаження.

А.А. Khalatov ¹, I.N. Karp ², Yu.G. Kutsan ³

¹ Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

² Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

³ Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine (Kyiv)

THE POWER GAS TURBINES: PROSPECTS OF APPLICATION IN POWER ENGINEERING OF UKRAINE

The prospects of gas turbine applications in power engineering of Ukraine are given to cover the basic, peak and semi-peak electrical loading. The infrastructure of gas turbine industry of Ukraine is analyzed, a conclusion is made to create a State program in support of new generation gas turbine development.

Keywords: gas turbine, power engineering of Ukraine, peak and semi-peak loads.