

УДК 621.438(09), 661.666.2

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Трошенькин Б.А., Трошенькин В.Б.

Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина

АННОТАЦИЯ

В последние годы в балансе энергогенерирующего оборудования возрастает роль газотурбинных электростанций простого цикла и электростанций, работающих по парогазовому циклу. В связи с этим появилась необходимость в проведении термодинамического анализа циклических процессов, позво-

ляющих повысить энергоэффективность ГТУ и парогазовых установок (ПГУ).

При этом основное внимание обращено на возможность повышения температуры рабочих газов и их давления.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, замена простого паротурбинного цикла на парогазотурбинный дает возможность повысить коэффициент полезного действия (КПД) с 32...36 % до 52...60 %. Росту КПД способствует также регенерация тепла, воздушная утилизация, промежуточное охлаждение воздуха, подогрев газа, впрыск пара в различные участки проточной части и т. д.

В основе принимаемых решений по усовершенствованию ГТУ лежат, прежде всего, законы термодинамики необратимых процессов, протекающих в газовой турбине и компрессоре, а также в их элементах: входных и выходных устройствах, камере сгорания, утилизационных агрегатах и системах управления [1].

НЕКОТОРЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ЦИКЛОВ ГТУ

Дальнейшее увеличение КПД традиционных способов производства электроэнергии возможно лишь за счет повышения температуры сжигания топлива при одновременном повышении давления газов.

Но на этом пути возникает ряд серьезных препятствий. Можно выделить из них два основных: во-первых, материал газовых турбин не выдерживает температуру выше 1200 °С, во-вторых, с ростом температуры активизируется процесс образования токсичных соединений, в частности оксидов азота NO_x.

Вместе с тем последние достижения в области материаловедения позволяют преодолеть оба этих препятствия. Так, создание тонких ионно-обменных мембран открывает перспективы производства дешевого кислорода из воздуха. Мембраны изготавливают как из диоксида циркония, так и из соединений на основе оксидов лантана, стронция, кобальта, железа и т.п.

Применение мембран снижает стоимость производства кислорода по сравнению с криогенным способом на 40 %.

Сжигание топлива в чистом кислороде самым благоприятным образом сказывается на экономических и экологических показателях ТЭС.

Вначале остановимся на экологических преимуществах. Для исключения оксидов азота NO_x из продуктов сжигания необходимо, чтобы азот просто не подавался в топку электростанций. При сжигании мазута и газа в кислороде это условие выполняется полностью. Как известно, в твердом топливе содержится незначительное количество азота. При сжигании угля в кислороде количество образующихся оксидов азота не превышает установленных нормами предельно допустимых концентраций (ПДК).

Другой положительный момент рассматриваемой технологии заключается в том, что продукты сгорания состоят в основном из диоксида углерода и паров воды. Это позволяет без особых затрат на проведение процесса отделить диоксид углерода, ожить его и закачать в глубинные слои Земли.

Применение кислорода создает условия для повышения КПД ТЭС. Так, использование кислорода позволяет поднять температуру продуктов сгорания до 2000–2100 °С, тем самым обеспечивается повышение КПД ГТУ до уровня 77–81 %.

В этом случае для изготовления турбин пригоден материал, сформированный из нитей чистого углерода. В качестве связующего используют также углерод

(пироуглерод). Созданный материал называют углерод-углеродным. Прочностные свойства данного материала с повышением температуры от 20 до 2000 °С изменяются незначительно.

Наиболее приемлемой средой для эксплуатации турбин такого типа являются нейтральная и восстановительная среды. Но так как циклы с применением гелия, аргона, неона и других инертных газов сравнительно дороги в своем исполнении, то наиболее реальным является применение газообразного монооксида углерода.

Известно, что при температуре выше 1700–1800 °С продукты реакции углерода с кислородом состоят в основном из монооксида углерода. Последнее обстоятельство позволяет устанавливать на потоке газообразных продуктов сгорания угля турбины из углерод-углеродного материала

После ГТУ монооксид углерода с более низкой температурой направляют в парогенераторы, в топках которых производят его дожигание до диоксида углерода.

Далее диоксид углерода направляют в кислородные рекуператоры тепла и затем в конденсационную установку.

Расчеты показывают, что с учетом затрат на производство кислорода КПД ТЭС, работающей по высокотемпературному циклу, достигает 52–54 % [2].

Остановимся на перспективе увеличения давления в камере сгорания.

Известно, что термический КПД цикла ГТУ с изобарным подводом теплоты является прямой функцией степени повышения давления (в адиабатном процессе) или иначе прямой функцией степени сжатия.

Термический КПД определяется по формуле

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}$$

где β – степень повышения давления при адиабатном сжатии;

$$\beta = P_2/P_1,$$

P_1 – начальное давление;

P_2 – конечное давление;

k – коэффициент, являющийся отношением теплоемкости газа в процессах постоянного давления C_p и постоянного объема C_v .

$$k = C_p / C_v.$$

Из приведенной формулы следует, что, повышая давление газов, можно добиться значительного роста КПД.

Такая возможность следует из сравнения цикла двигателя Дизеля с циклом газотурбинной установки при равенстве максимальных температур и давлений, а также начальных состояний.

На рис. 1 приведены циклы газотурбинной установки $abcd$ и двигателя Дизеля $ABCD$.

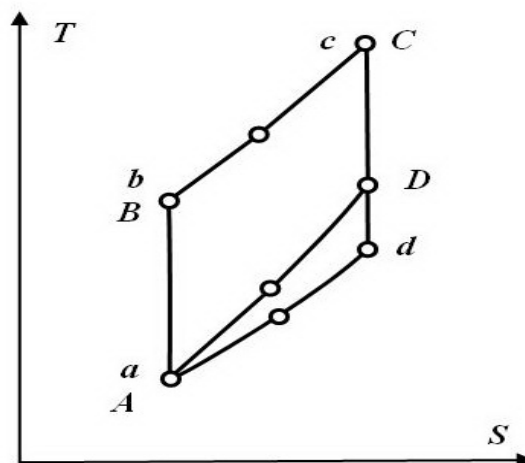


Рис. 1. Циклы газотурбинной установки и двигателя Дизеля

В представленном цикле Дизеля газ сначала сжимается в адиабатическом процессе AB , затем в изобарном процессе BC получает теплоту и нагревается. Далее происходит расширение газа в адиабатическом процессе CD и отвод тепла от газа в изохорном процессе DA .

Поскольку цикл газотурбинной установки обладает меньшей среднеинтегральной температурой процесса отвода тепла от газа, то ГТУ будет иметь больший термический КПД.

Но большинство специалистов убеждено, что такое сравнение циклов ГТУ и двигателя Дизеля является чисто теоретическим, так как двигатели Дизеля работают при таких максимальных давлениях и температурах, которые еще недоступны для газотурбинных установок [3].

Между тем, специалистам из *Research & Development Institute for Advanced Thermodynamic Science* удалось опровергнуть столь скептическое утверждение и провести дизелизацию ГТУ (сообщение *Dr. Marius Angelo Paul* на семинаре в ИПМаш им.А.Н.Подгорного НАНУ 21.08.2006 г.).

В типовых ГТУ компрессор и турбина имеют общий вал, который приводит в действие и топливный насос. Такое конструктивное решение приводит к жесткой связи между массами потоков и их давлением. Дизелизация заключается в устранении этой связи, массы потоков и давление разделяются. В этом случае компрессор состоит из двух ступеней, приводимых во вращение электродвигателями (рис. 2). Компрессор работает всегда при постоянном и максимально возможном давлении – 30 МПа.

Масса потока возрастает при подключении второй ступени. Обе ступени турбины механически не связаны с компрессором. Каждая ступень турбины выведена на один вал с генератором тока. Турбина полностью подчинена требованиям потребителя, ее

мощность варьируется за счет подключения второй ступени.

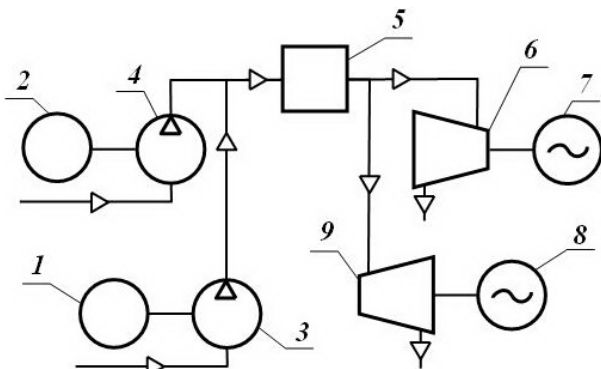


Рис. 2. Схема газотурбинной установки: 1, 2 – электродвигатель; 3 – первая ступень компрессора; 4 – вторая ступень компрессора; 5 – камера сгорания; 6 – первая ступень турбины; 7, 8 – генератор; 9 – вторая ступень турбины

Если обычные турбины и компрессоры имеют скорость вращения 3000 об/мин, то в разработанной в вышеназванном институте установке скорость вращения составляет 35–50 тыс. об/мин. Этим достигается максимальная компактность оборудования. Подшипники расположены на магнитных подвесках. Направление вращения турбинных ступеней взаимопротивоположное, чем достигается уравнивание массы турбины (для предотвращения вибрации). Топливо подается вместе с воздухом в каналы охлаждения лопаток компрессора. Окружная скорость лопаток составляет 600 м/с, поэтому «коктейль» воздуха и топлива получается высшего качества, и при этом обеспечивается надежное охлаждение лопаток. Определенным способом охлаждаются также лопатки турбины. Установка работает по циклу, представленному на рис. 3.

Здесь процессы, составляющие цикл:

12 – адиабатное сжатие;

23 – подвод тепла в изобарном процессе;

34 – адиабатное расширение продуктов сгорания;

45 – политропный процесс, близкий к изохорному;

му;

51 – отвод тепла.

Регенерация тепла происходит внутри цикла. Также внутри цикла генераторы тока снабжают электроэнергией двигателя компрессора.

Для снижения температуры при сжатии воздуха в поток впрыскивается вода, которая затем отводится и утилизируется. Выброс газов в окружающую среду производится при температуре 120 °С, что свидетельствует о максимально возможном использовании тепла в установке.

КПД ГТУ достигает 80 %. Высокий КПД позволяет в несколько раз снизить расход топлива и воздуха. Последнее особенно важно для авиации в стратосфере, где воздух разрежен. Низкая температура выбрасываемых газов также имеет важное значение, поскольку дает возможность самолету не оставлять за собой теплового следа. Ресурс работы двигателя 40 тыс. часов. Двигатель является турбоавиационным, установлен, в частности, на Боингах.

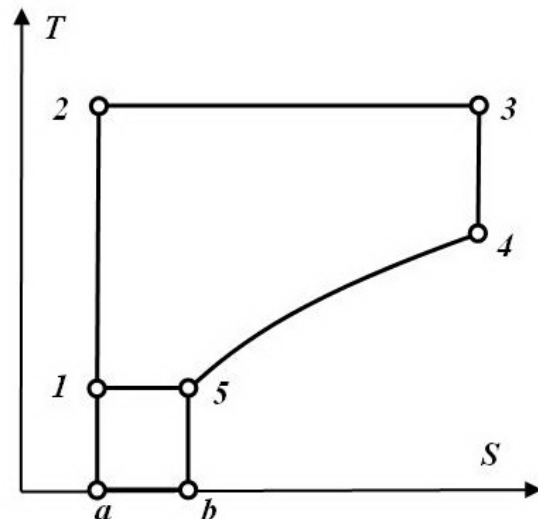


Рис. 3. Цикл газотурбинной установки Research & Development Institute for Advanced Thermodynamic Science

Представляет большой интерес адаптировать данный двигатель к устройствам в энергетике. Но при этом необходимо решить ряд проблем.

Как известно, на кораблях и самолетах часто меняется нагрузка и вместе с ней режим работы энергетической установки. В стационарных условиях даже если нагрузка падает – режим работы сохраняется. Сомнительно, чтобы в этих условиях «дизелизация» давала результат.

Другой недостаток связан с тем, что вода, впрыскиваемая в газовый тракт, может дать пар для бинарной установки с давлением не более 2,0–3,0 МПа, хотя на это затрачиваются температурные перепады в несколько сот градусов (сейчас параметры парового цикла в стационарной энергетике достигают 150,0 МПа и 540 °С). В итоге ожидаемые значения КПД предлагаемого паротурбинного цикла не превысят 20–25 %. Таким образом, убрать тепловой след у самолета – это одно, а создать стационарную энергетическую установку – это другое.

Наконец, эксплуатировать центробежные компрессоры при 30,0 МПа крайне сложно. Скорее всего, давлению в 30,0 МПа будет соответствовать значительная температура. Следовательно, возникнет проблема материалов, используемых для изготовления

компрессора. Электрическая система требует также корректировки, т. к. в современных энергосистемах ток подается при 50 Гц, а в разработанной установке ≈ 2000 Гц.

ВЫВОДЫ

Анализ высокотемпературных циклов и циклов с высоким давлением свидетельствует о том, что имеются возможности для радикального повышения эф-

Тем не менее, отдельные идеи авиационной установки, следует взять на вооружение при разработке нового поколения ГТУ [4].

фективности стационарных газотурбинных и парогазовых установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коваль В. А. Особенности рабочих процессов в газотурбинных и парогазовых энергетических установках и их элементах/Коваль В. А., Михайлов В. Е., Романов В. В., Ковалева Е. А. - Харьков: изд-во Иванченко И. С., 2013. - 338 с.
Koval V.A. Features of Work Processes in Gas Turbine and Combined Cycle Power Plants and their Components/Koval V.A., Mihailov V.E., Romanov V.V., Kovaleva E.A. - Kharkov: Ivanchenko I.S. publishers., 2013. 338 pp.
2. Трошенькин Б. А. Производство электроэнергии с применением высоко температурных циклов /Трошеькин Б. А., Гурин В. А., Трошенькин В. Б//Проблемы машиностроения. - 2007. - т. 10. - № 1. - С. 99-102.
Troshenkin B.A., Production of Electricity Using High Temperature Cycles/Troshekin B.A, Gurin V.A, Troshenkin V.B // The Problems of Mechanical Engineering. - 2007. - Vol. 10. - No. 1. - P.P. 99-102
3. Ястржембский А.С. Техническая термодинамика. -М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. -495 с.
Yastrzhembsky A.S. Technical Thermodynamics. - Moscow; - Leningrad: Gosenergoizdat, 1960. - 495 pp.
4. US Patent No: 7 426 832.US Patent Application No: 2006/0272329. Current US Class: 60/68. Current IPC: F01K 9/00 (20060101). Universal Thermodynamic Gas Turbine In A Closed Carnot Cycle / Paul, Marius A. (Fullerton, US)/ -№ 11/212815; Filing date. Aug 25, 2005; Issued date: Sep 23, 2008. Links:
<http://www.patentbuddy.com/Patent/7426832.jsessionid=93BDD7F8CF593312B06CD914E631AF3F>.