

УДК 621.452.3

А.А. Иноземцев

ОАО «Авиадвигатель», Пермь, Россия

А.Н. Арбеков, Д.Д. Русаков

Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

А.Ю. Варакин

Объединенный институт высоких температур
Российской академии наук, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОНВЕРСИИ ДВУХКОНТУРНЫХ ТУРБОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ТРИГЕНЕРАЦИОННЫЕ СТАЦИОНАРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Посвящено исследованию возможности создания тригенерационных газотурбинных установок на базе серийно выпускающихся двухконтурных турбореактивных двигателей (ТРДД) с минимальными изменениями базового двигателя. Энергетические установки подобного типа в блочно-модульном исполнении позволяют одновременно решать задачи электро-, тепло- и холодоснабжения различных объектов, особенно в условиях кризисных ситуаций. Предложена схема использования воздуха второго контура ТРДД в холодильной части установки и выполнен термодинамический анализ холодильной части установки как представляющей наибольший интерес в рассматриваемой установке. Холодильная часть рассмотрена с простым и регенеративным циклами. Диапазон реализуемых в простом холодильном цикле температур ограничен работой турбодетандера, а использование регенератора существенно его расширяет. В результате выполненного анализа показано, что на базе ТРДД могут быть созданы двухконтурные тригенерационные газотурбинные установки, обеспечивающие потребителя электричеством, холодом и тепловой энергией. Создание предлагаемых установок не вносит существенных изменений в конструкцию базового серийного двигателя, при этом установка может быть реализована как в открытом, так и в полужамкнутом исполнении, что позволит существенно снизить расход через комбинированное воздухоочистительное устройство и дымовую трубу. Создание тригенерационных установок, реализующих рассмотренные циклы, требует привязки к конкретному ТРДД.

Ключевые слова: двухконтурный турбореактивный двигатель, компрессор, регенерация теплоты, термодинамические циклы, тригенерация, турбина, утилизация теплоты, холодильный газовый цикл.

A.A. Inozemtsev

OJSC „Aviadvigatel“, Perm, Russian Federation

A.N. Arbekov, D.D. Rusakov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

A.Yu. Varaksin

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

POSSIBILITY OF CONVERSION OF BYPASS TURBOJET ENGINE TO TRIGENERATION STATIONARY POWER PLANT

The work covers the possibility of creation of trigeneration gas turbine plants on the base of series-production bypass turbojet engines (BTE) with minimal changes in base engine. Similar power plants of block-module version enable to solve simultaneously the problems of electricity supply, heat supply and cooling supply of different objects, especially for critical situations. Scheme of using air of BTE secondary contour in cooling part of the plant is offered. Thermodynamic analysis of cooling part of the plant is fulfilled. The cooling part in terms of simple and regenerative cycles is considered. Temperature range of simple cooling cycle is limited by the work of turbine expander and use of regenerator expands this range. Fulfilled analysis showed that on the base of BTE one can build bypass trigeneration gas turbine plants supplying electricity, cold and heat energy to customer. Creation of the plants does not include additional amendments in series-production engine, at the same time the plant can be implemented both open and semi-open version. It allows considerably decreasing energy consumption through air-cleaning device and exhaust unit. Practical implementation of trigeneration plants with considered cycles demands connection with concrete BTE.

Keywords: bypass turbojet engines, compressor, heat regeneration, thermodynamic cycles, trigeneration, turbine, heat utilization, cooling gas cycle.

Введение

В настоящее время всё чаще возникает потребность в создании газотурбинного энергетического оборудования, способного эффективно обеспечивать электричеством, тепловой энергией и холодом потребителя. Наиболее важным это становится в условиях резких климатических и погодных изменений, стихийных бедствий (понижение температуры, ураганы, циклоны) [1–3], аварийных ситуаций в системах энергоснабжения городов, районов, террористических актов. Имеющаяся в нашей стране полностью развитая инфраструктура производства, обслуживания и ремонта авиационных газотурбинных двигателей в настоящее время недоиспользуется. Отечественный опыт создания

и эксплуатации газотурбинных электростанций свидетельствует о необходимости и возможности решения обеих проблем.

Создание тригенерационных установок представляет собой серьезную научно-техническую задачу, которая может быть решена в том числе путем конверсии двухконтурных турбореактивных двигателей (ТРДД) [4, 5], реализующих воздушную холодильную машину во втором контуре. Назовем созданную на базе двухвального ТРДД установку, в которой реализуется сочетание классических газотурбинных циклов – простого прямого [6] и регенеративного обратного [7], двухконтурной тригенерационной газотурбинной (ДТГТУ).

Рассмотрим работу ДТГТУ, схема которой представлена на рис. 1. Воздух в количестве $(1+m)G_0$, забираемый из окружающей среды с давлением p_0^* и температурой T_0^* , сжимается в компрессоре низкого давления (КНД) 1 до параметров p_1^* , после чего разделяется на три потока:

1) основной поток прямого цикла с расходом G_0 поступает в компрессор высокого давления (КВД) 2;

2) основной поток второго контура с расходом $mG_0(1-g)$, где g – доля воздуха второго контура, идущая на охлаждение статора двигателя, поступает в теплообменник-утилизатор холодильного контура 13;

3) вспомогательный поток второго контура с расходом mG_0g может использоваться для охлаждения статора газогенератора по аналогии с некоторыми промышленными установками на базе ТРДД ОАО «Авиадвигатель» (г. Пермь) [8–10].

Рассмотрим каждый из них. В газогенераторе воздух с параметрами p_1^* , T_1^* сжатый в КВД до давления p_2^* и температуры T_2^* , подается в камеру сгорания 3, в которую впрыскивается топливо, в результате сгорания которого подводится теплота Q_1 и температура поднимается до T_3^* , а давление несколько понижается до p_3^* . С этих параметров продукты сгорания расширяются последовательно в турбинах высокого (ТВД) 4 и низкого давления (ТНД) 5, совершая работу по приводу компрессоров и вспомогательных агрегатов. Далее продукты сгорания, смешавшись со вспомогательным потоком воздуха, поступают в силовую турбину (СТ) 6, где, срабатывая оставшийся тепलोперепад, вырабатывают полезную мощность для привода электрогенератора 7.

Оставшаяся теплота продуктов сгорания Q_2 , как в любой когенерационной установке, используется в котле-утилизаторе 12 для подогрева сетевой воды, прокачиваемой насосом 14, после чего продукты сгорания выбрасываются в атмосферу.

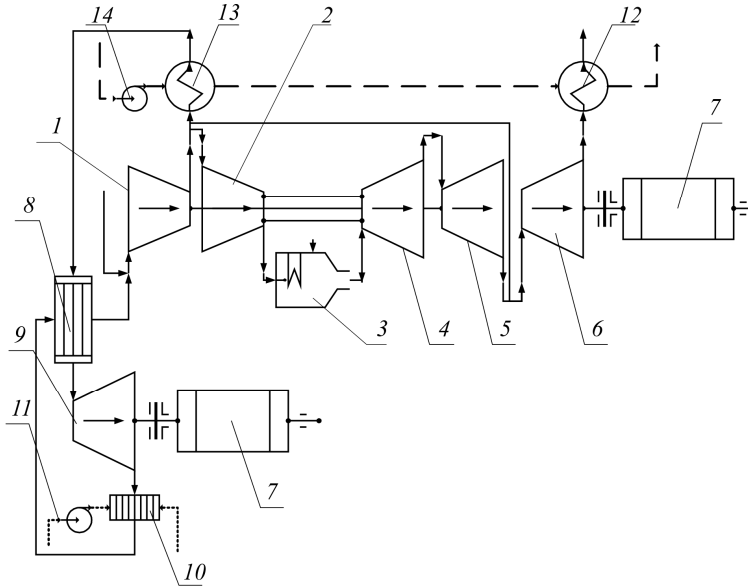


Рис. 1. Принципиальная схема ДТГТУ на базе ТРДД: 1 – КНД; 2 – КВД; 3 – камера сгорания; 4 – ТВД; 5 – ТНД; 6 – силовая турбина; 7 – генератор; 8 – регенератор; 9 – турбодетандер; 10 – холодильный теплообменник; 11 – насос хладагента; 12 – теплообменник-утилизатор; 13 – теплообменник-утилизатор холодильного контура; 14 – насос теплоносителя

Основной поток воздуха второго контура поступает в концевой холодильник 13, выполняющий функцию экономайзера, где осуществляет предварительный подогрев воды системы отопления или горячего водоснабжения перед подачей ее в котел-утилизатор, а затем, при необходимости, в рекуперативный регенератор 8, где он отдает теплоту Q_r , а его температура понижается до T_8^* . Далее этот поток расширяется в турбодетандере 9 до давления p_9^* и снижает температуру окончательно до T_9^* , с которой поступает в теплообменник потребителя холода 10, где, отобрав теплоту Q_3 , подогревается до T_{10}^* и, наконец, подогревшись до начальной температуры в рекуператоре 8, вновь поступает на вход КНД или выбрасывается в атмосферу.

Последнее позволяет замкнуть холодильный цикл (необязательно), получив таким образом полузамкнутую установку и разгрузив тем самым комбинированное воздухоочистительное устройство и систему выхлопа, расход через которые уменьшится на $mG_0(1-g)$.

Поскольку в рассматриваемой установке лопаточные машины исходного ТРДД не претерпевают никаких изменений, то балансы мощностей роторов высокого и низкого давления сохраняются.

Вновь проектируемая силовая турбина (СТ) вырабатывает полезную механическую мощность, которая может несколько измениться в случае добавления дополнительного относительного холодного воздуха, но основной интерес представляет термодинамика холодильной части второго контура.

Целью настоящей статьи является проведение термодинамического анализа холодильной части ДТГТУ, необходимого для обоснования возможности создания ДТГТУ на базе серийных ТРДД.

Исследование холодильной части ДТГТУ

Положим, что потери давления в тракте одинаковы для всех рассматриваемых вариантов и определяются величиной коэффициента сохранения полного давления $\sigma_{\Sigma q}^* = 0,93$. Величину температурного напора в регенераторе ΔT выберем в диапазоне от 5 до 40 К, а нижнюю температуру цикла T_9^* в пределах от 213 до 271 К; оценки выполним для степени двухконтурности $m = 0,5$ и величины отбора воздуха на охлаждение корпуса газогенератора $g = 0,2$. Степень повышения давления в КНД π_{k1}^* примем равной 2,5. Результаты представим в виде удельных величин, приведенных к расходу воздуха в газогенераторе $G_0 = 1$ кг/с.

Для указанных условий получим зависимости количества теплоты, отводимой из холодильного цикла, от нижней температуры цикла, а также величину степени регенерации при наличии регенератора в холодильном контуре при различных значениях температурного напора (рис. 2).

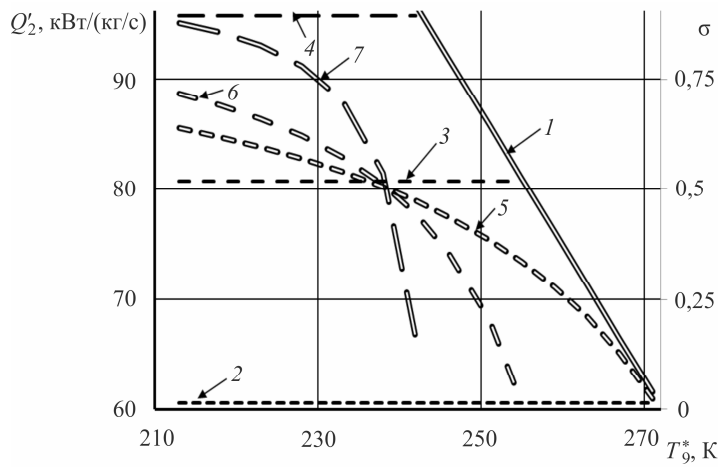


Рис. 2. Влияние нижней температуры цикла на количество теплоты (зависимости 1–4), отводимой от хладагента в окружающую среду, и степень регенерации (зависимости 5–7) при разных температурных напорах в регенераторе: 1 – без регенерации; 2, 5 – $\Delta T = 40$ К; 3, 6 – $\Delta T = 20$ К; 4, 7 – $\Delta T = 5$ К

Из данных рис. 2 видно, что для безрегенеративного цикла (линия 1) количество теплоты, отводимой из цикла, падает с ростом температуры за турбодетандером, а величина этой температуры ограничена расширительной способностью турбодетандера и для данной степени повышения давления в КНД не может быть ниже 243 К. Введение регенерации позволяет поддерживать количество теплоты, отводимой в окружающую среду, постоянной для заданного температурного напора в регенераторе (горизонтальные линии 2–4); при этом с ростом температуры за турбодетандером степень регенерации падает (линии 5–7), что особенно важно, если холодильный контур играет роль теплового насоса.

Основное назначение этой части установки – производство холода, зависимость которого от нижней температуры цикла приведена на рис. 3; здесь же представлены зависимости требуемых тепловых мощностей регенератора.

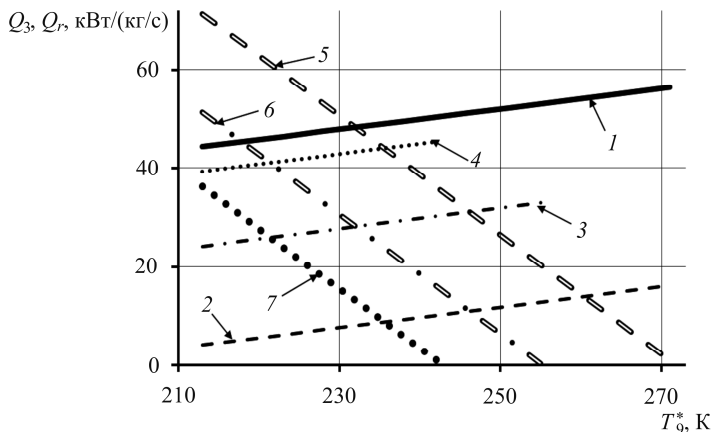


Рис. 3. Влияние нижней температуры цикла на количество теплоты, отбираемой от охлаждаемого объекта (зависимости 1–4) и возвращаемой в регенераторе (зависимости 5–7), при разных температурных напорах: 1 – максимально возможное; 2, 5 – $\Delta T = 40$ К; 3, 6 – $\Delta T = 20$ К; 4, 7 – $\Delta T = 5$ К

Из данных рис. 3 видно, что с ростом нижней температуры цикла (после турбодетандера) тепловая мощность регенератора убывает (в пределе он становится ненужным), а количество теплоты, отбираемой от охлаждаемого объекта, напротив, возрастает.

Заключение

Выполненный термодинамический анализ холодильной части ДТГТУ позволяет сделать следующие выводы:

1. На базе ТРДД могут быть созданы двухконтурные тригенерационные газотурбинные установки, обеспечивающие потребителя электричеством, холодом и тепловой энергией.

2. Создание таких установок не вносит существенных изменений в конструкцию базового серийного двигателя.

3. Установка может быть реализована как в открытом, так и в полузамкнутом исполнении; последнее позволяет существенно снизить расход через комбинированное воздухоочистительное устройство и дымовую трубу.

4. Практическая реализация рассмотренных циклов требует дальнейшей привязки к конкретному изделию. Для создания реальных ДТГТУ наиболее целесообразным будет использование в качестве базовых двигателей авиационных ТРДД с малой степенью двухконтурности ($m = 0,5 \dots 1$) типа Д-30 3-й серии, Д-30Ф6.

Библиографический список

1. Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н. Торнадо. – М.: Физматлит, 2011. – 344 с.
2. Experimental study of wall-free non-stationary vortices generation due to air unstable stratification / A.Y. Varaksin, M.E. Romash, V.N. Kopeitsev, M.A. Gorbachev // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – Vol. 55. – P. 6567–6572.
3. Varaksin A.Y., Romash M.E., Kopeitsev V.N. Effect of net structures on wall-free non-stationary air heat vortices // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2013. – Vol. 64. – P. 817–828.
4. Леонтьев А.И., Арбеков А.Н., Блинцов А.В. Исследование применения газодинамической температурной стратификации (ГТС) для совершенствования космических замкнутых газотурбинных установок (ЗГТУ) // Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели: XII Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. – 2004. – С. 165–166.
5. Емин О.Н. Турбохолодильные машины в системах охлаждения газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1978. – 176 с.
6. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок: учебник для вузов / Ю.С. Елисеев, Э.А. Манушин, В.Е. Михальцев [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 640 с.
7. Архаров А.М. Основы криологии. Энтропийно-статистический анализ низкотемпературных систем. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 507 с.
8. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2008. – Т. 2. – 366 с.
9. Иноземцев А.А. Энергетические и промышленные газотурбинные установки на базе авиационных ТРДД ОАО «Авиадвигатель». Принципы конвертации // Тяжелое машиностроение. – 2009. – № 9. – С. 2–6.
10. Иноземцев А.А. Двухконтурные газотурбинные установки мощностью 30..40 МВт для нового поколения магистральных газопроводов // Газовая промышленность. – 2010. – № 4. – С. 81–83.

References

1. Varaksin A.Yu., Romash M.E., Kopeitsev V.N. Tornado [Tornado]. Moscow: Fizmatlit, 2011. 344 p.
2. Varaksin A.Yu., Romash M.E., Kopeitsev V.N., Gorbachev M.A. Experimental study of wall-free non-stationary vortices generation due to air

unstable stratification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 55, pp. 6567-6572.

3. Varaksin A.Yu., Romash M.E., Kopeitsev V.N. Effect of net structures on wall-free non-stationary air heat vortices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 64, pp. 817-828.

4. Leontev A.I., Arbekov A.N., Blintsov A.V. Issledovanie primeneniya gazodinamicheskoy temperaturnoy stratifikatsii (GTS) dlya sovershenstvovaniya kosmicheskikh zamknutykh gazoturbinnnykh ustanovok (ZGTU) [Application of gas-dynamic thermal stratification for enhancement of closed gas turbine unit]. *XII Vserossiyskaya mezhvuzovskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Gazoturbinnnye i kombinirovannye ustanovki i dvigateli"*, 2004, pp. 165-166.

5. Emin O.N. Turbokholodilnye mashiny v sistemakh okhlazhdeniya gazoturbinnnykh dvigateley [Turborefrigerating unit in cooling systems of gas-turbine engines]. Moscow: Mashinostroenie, 1978. 176 p.

6. Eliseev Yu.S., Manushin E.A., Mikhaltsev V.E. [et al.]. Teoriya i proektirovanie gazoturbinnnykh i kombinirovannykh ustanovok [Theory and designing of gas-turbine and integrated plants]. Bauman Moscow State Technical University, 2000. 640 p.

7. Arkharov A.M. Osnovy kriologii. Entropiyno-statisticheskii analiz nizkotemperaturnykh system [Fundamental cryology. Entropy-statistical analysis of low temperature systems]. Bauman Moscow State Technical University, 2014. 507 p.

8. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskiy V.L. Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok [Design principles of aviation engines and power plants]. Moscow: Mashinostroenie, 2008. Vol. 2. 366 p.

9. Inozemtsev A.A. Energeticheskie i promyshlennye gazoturbinnnye ustanovki na baze aviatsionnykh TRDD OAO "Aviadvigatel". Printsipy konvertatsii. [Energy and industrial gas-turbine plants on the basis of OJSC "Aviadvigatel" bypass turbofan engines. Conversion principles]. *Tyazheloe mashinostroenie*, 2009, no. 9, pp. 2-6.

10. Inozemtsev A.A. Dvukhkонтурные газотурбинные установки мощностью 30...40 МВт для нового поколения магистральных газопроводов [Bypass gas-turbine plants with power 30...40 MW for new generation gas mains]. *Gazovaya promyshlennost*, 2010, no. 4, pp. 81-83.

Сведения об авторах

Иноземцев Александр Александрович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, управляющий директор – генеральный конструктор ОАО «Авиадвигатель» (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 93).

Арбеков Александр Николаевич (Москва, Россия) – кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, 2-ая Бауманская, 5, e-mail: arbekov@bmstu.ru).

Русаков Дмитрий Дмитриевич (Москва, Россия) – аспирант, ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, 2-я Бауманская, 5, e-mail: saturnrussia@rambler.ru).

Вараксин Алексей Юрьевич (Москва, Россия) – член-корреспондент Российской академии наук, доктор физико-математических наук, заведующий отделом Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская, 3, стр. 2, e-mail: varaksin_a@mail.ru).

About the authors

Aleksandr A. Inozemtsev (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Managing Director – General Designer of OJSC “Aviadvigatel” (93, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation).

Aleksandr N. Arbekov (Moscow, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of Bauman Moscow State Technical University (5, Baumanskaya 2nd st., Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: arbekov@bmstu.ru).

Dmitriy D. Rusakov (Moscow, Russian Federation) – Doctoral Student, Bauman Moscow State Technical University (5, Baumanskaya 2nd st., Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: saturnrussia@rambler.ru).

Aleksey Yu. Varaksin (Moscow, Russian Federation) – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Head of Department of Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (13, Izhorskaya st., building 2, Moscow, 125412, Russian Federation, e-mail: varaksin_a@mail.ru).

Получено 15.07.2014