

Исследование цикла замкнутой газотурбинной тригенерационной установки последовательной схемы 77-30569/359008

03, март 2012

авторы: Арбеков А. Н., Бурцев С. А.

УДК 621.438

МГТУ им. Н.Э. Баумана

arbekov2012@yandex.ru

serg7573@pochta.ru

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня уже нельзя себе представить жизнь без электричества. Нас повсюду окружают электроприборы, многие из которых требуют бесперебойного электропитания. Классическим примером могут служить оборудование для обеспечения связи и телекоммуникации, банкоматы, терминалы, серверы и т.д. Однако обеспечение бесперебойным электропитанием требуется не только там, где находится дорогостоящее оборудование или идут какие-то непрерывные технологические процессы, но и где от этого зависит жизнь людей. Это медицинские учреждения, центры обработки данных, государственные административные учреждения, аэропорты, торговые центры и пр.

Обычно при обеспечении гарантированного электропитания оборудования используются источники бесперебойного питания постоянного или переменного тока с необходимым временем резервирования. Но кроме бесперебойного электропитания часто требуется обеспечение заданного уровня температуры в помещениях (отсеках), где размещается электронная аппаратура и/или находятся люди.

Традиционное решение этого круга задач обеспечивается двумя соответствующими системами, одна из которых обеспечивает электроснабжение, а вторая кондиционирование (термостатирование) и является дополнительной нагрузкой первой. Альтернативным решением может быть использование одноконтурной замкнутой газотурбинной тригенерационной установки (далее тригенерационной ЗГТУ), которая реализует комбинацию прямого и обратного циклов Брайтона и может одновременно вырабатывать электроэнергию, теплоту и холод для нужд кондиционирования и/или термостатирования. Безусловным достоинством комбинированной схемы является то, что несмотря на значительное снижение электрического КПД установки суммарный эффект от ее

использования может оказаться выше, чем при классическом варианте: энергетической установке с нагрузкой в виде холодильной установки.

ОПИСАНИЕ СХЕМЫ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В зависимости от заданного уровня температур кондиционирования и соотношения мощностей электропотребления и кондиционирования (термостатирования) возможно создание различных комбинированных схем. В данной работе рассмотрим последовательную схему цикла замкнутой газотурбинной тригенерационной установки. Принципиальная схема данной установки представлена на рисунке 1.

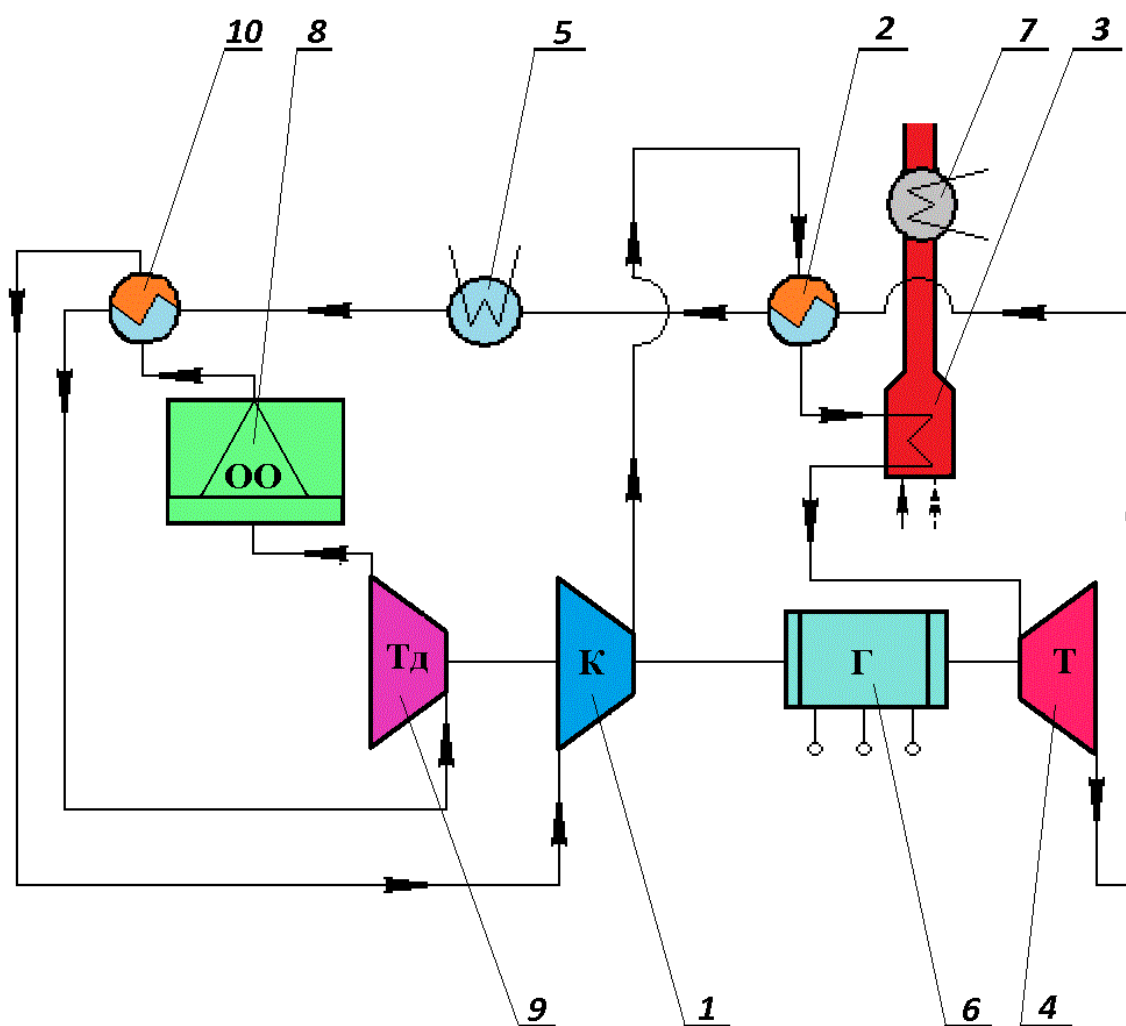


Рис. 1. Принципиальная схема замкнутой газотурбинной тригенерационной установки последовательной схемы:

1 – компрессор; 2 – рекуперативный теплообменник энергетической части контура; 3 – нагреватель; 4 – турбина; 5 – конечный холодильник; 6 – генератор; 7 – система утилизации теплоты; 8 – охлаждаемое (кондиционируемое) помещение, 9 – турбодетандер, 10 – рекуперативный теплообменник холодильной части контура.

Установка работает следующим образом: рабочее тело сжимается в компрессоре (1), выйдя из которого поступает в холодную часть рекуператора энергетической части (2), где подогревается теплом газа, вышедшим из турбины (4) и поступает в нагреватель (3).

В нагревателе (3) температура рабочего тела повышается до максимального значения в цикле (подвод теплоты в ЗГТУ может быть реализован в любой форме, т.к. этот класс энергоустановок инвариантен к типу нагревателя), после чего он поступает в турбину (4), где срабатывает свой теплоперепад. Затем через систему утилизации теплоты (7), горячую часть рекуператора энергетической части контура (2) и концевой холодильник (5) поступает в холодильную часть контура.

В холодильной части контура рабочее тело поступает в холодильный рекуператор (10), где дополнительно охлаждается. После этого рабочее тело расширяется в турбодетандере (турбине низкого давления) (9), срабатывая теплоперепад, и затем нагревается, отводя теплоту от охлаждаемого (кондиционируемого) помещения (8) и вновь поступает в холодильный рекуператор (10). После подогрева в холодильном рекуператоре (10) поступает на вход компрессора (1).

Принципиальный термодинамический цикл (для неидеальных компрессоров и турбин и ненулевых температурных напоров в теплообменниках) замкнутой газотурбинной тригенерационной установки последовательной схемы в координатах T-S представлен на рисунке 2.

На базе типовой одномерной модели расчета термодинамического цикла энергоустановки (см., например, [1]) и имеющегося набора эмпирических зависимостей и данных, характерных для данного класса замкнутых газотурбинных установок (см. работы [2, 3, 4, 5, 6]) создадим методику расчета цикла для данной схемы ЗГТУ.

Оценим параметры такой установки электрической мощностью 10 кВт и холодопроизводительностью 5 кВт и температурой рабочего тела на входе в охлаждаемое (кондиционируемое) помещение 278 К, при характеристиках узлов и материалов, достижимых в ближайшем будущем.

Известно, что в заданном классе мощностей целесообразнее использовать радиальные турбомшины. Для дальнейших исследований примем неохлаждаемые радиальные (центростремительные) турбину и турбодетандер (турбину низкого давления) и центробежный компрессор. Примем для расчета температуру рабочего тела перед турбиной 1273 К - эта температура позволяет создать неохлаждаемое рабочее колесо турбины при заданном ресурсе не менее $10^4 \dots 10^5$ часов.

Примем для расчета температуру рабочего тела на входе в компрессор 353 К – данный уровень температур позволит легко организовать отвод теплоты от контура ЗГТУ и сброс ее в окружающую среду.

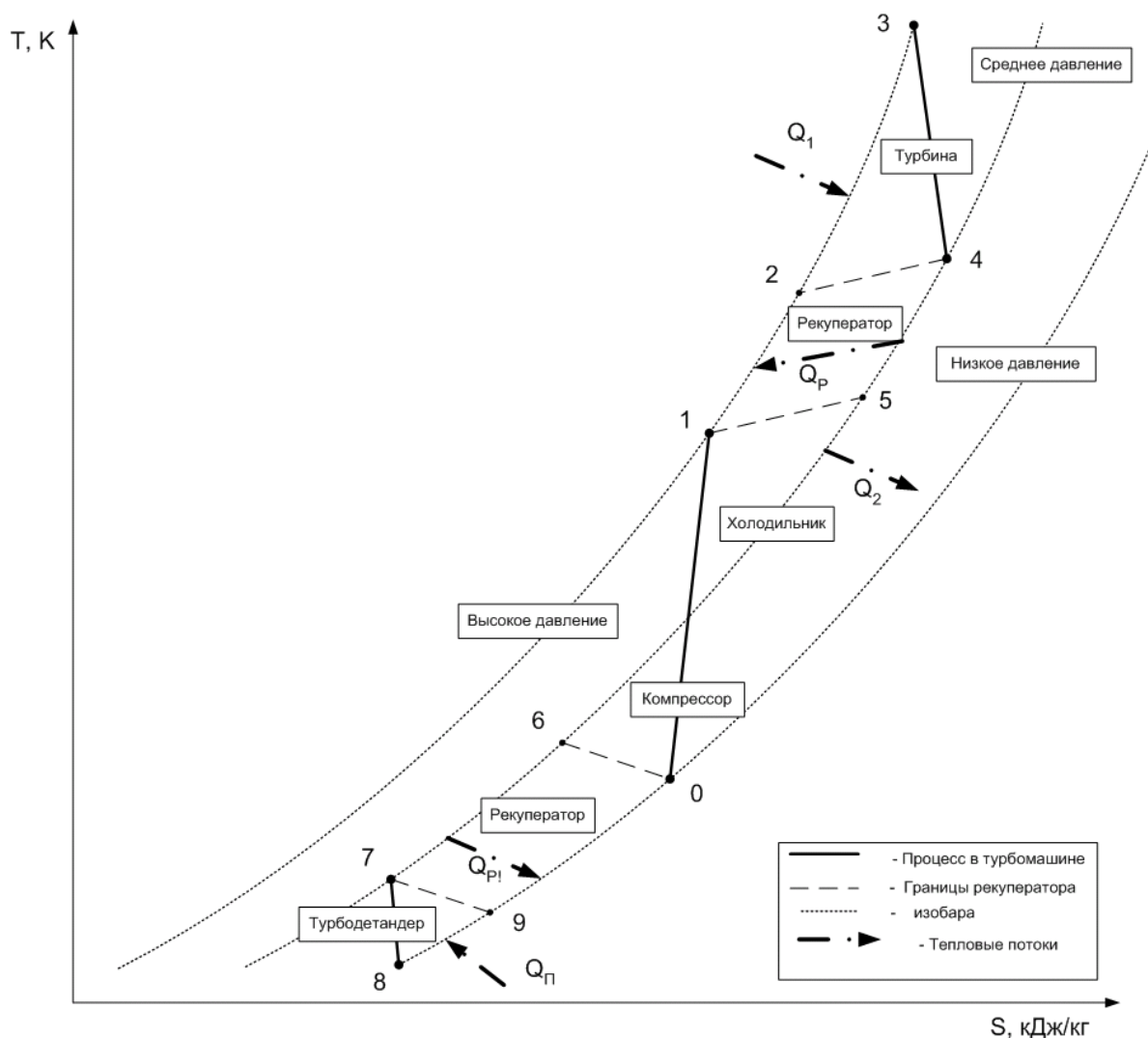


Рис. 2. Термодинамический цикл замкнутой газотурбинной тригенерационной установки последовательной схемы

В расчетах будем учитывать только работу, связанную с получением холодного газа, а подвод теплоты (если это необходимо для термостатирования кондиционируемого помещения) можно легко реализовать за счет отвода теплоты от системы утилизации теплоты (7) или конечного холодильника (5) (см. рис. 1). Подогрев рабочего тела в охлаждаемом (кондиционируемом) помещении будем рассматривать в диапазоне 10...27,5 К.

С учетом имеющихся данных об уровнях потерь и величинах КПД узлов для данного класса мощностей примем КПД турбины на уровне 88 %, компрессора 82 % и

турбодетандера 89 %; механический КПД примем равным 98 %; отборы рабочего тела на собственные нужды и утечки на уровне 2 % примем приведенными к выходу из компрессора. Степень рекуперации в рекуперативных теплообменниках энергетической (2) или холодильной (10) части контура (см. рис. 1) примем одинаковой и равной 0,95; потери полного давления в тракте 7 %. Из-за конструктивных особенностей исполнения данного класса машин примем КПД генератора 92 %. В качестве рабочего тела рассмотрим гелий-ксеноновую смесь с молярной массой 40 кг/кмоль (аналог аргона).

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Пример результатов расчетов для случая максимального КПД представлен в таблице 1.

Таблица 1.

Результаты расчета цикла замкнутой газотурбинной тригенерационной установки последовательной схемы при оптимальной (с точки зрения КПД) степени повышения давления в компрессоре

Параметр	Размерность	Значение
Степень повышения давления в компрессоре	-	2,257
Подогрев рабочего тела в охлаждаемом помещении	К	25
Удельная работа компрессора	кДж/кг	86,26
Температура за компрессором	К	518,7
Суммарная степень понижения давления в турбине и турбодетандере		2,099
Степень понижения давления в турбине		1,606
Степень расширения в турбодетандере	-	1,307
Удельная работа турбины	кДж/кг	112,1
Удельная работа турбодетандера	кДж/кг	14,4
Теплота, подводимая к контуру	кДж	48,47
Теплота, отводимая от контура	кДж	38,53
Теплота, возвращаемая в рекуператоре энергетической части	кДж	102,39
Расход рабочего тела в компрессоре	кг/с	0,392
КПД цикла	-	0,229
Коэффициент использования теплоты (КИТ)	-	0,310
Электрический КПД на клеммах	-	0,206

Особенности расчета данной схемы комбинированной ЗГТУ состоят в том, что для обеспечения замыкания балансов работ, температур и энергий (теплоты) снимается условие необходимости выработки определенного количества электроэнергии. Эта величина получается как один из результатов расчета цикла тригенерационной ЗГТУ последовательной схемы. Затем это накладывается как дополнительное условие и при заданной степени подогрева рабочего тела в охлаждаемом (кондиционируемом) помещении мы получаем фиксированное значение степени повышения давления в компрессоре и степеней понижения давления в турбине и турбодетандере.

На рисунке 3 представлены графики зависимости электрической мощности, вырабатываемой тригенерационной ЗГТУ последовательной схемы от степени повышения давления в компрессоре при различных степенях подогрева рабочего тела в охлаждаемом (кондиционируемом) помещении ($\Delta T = 10 \dots 27,5$ К) и предельная кривая, соответствующая выработке 10 кВт электрической энергии.

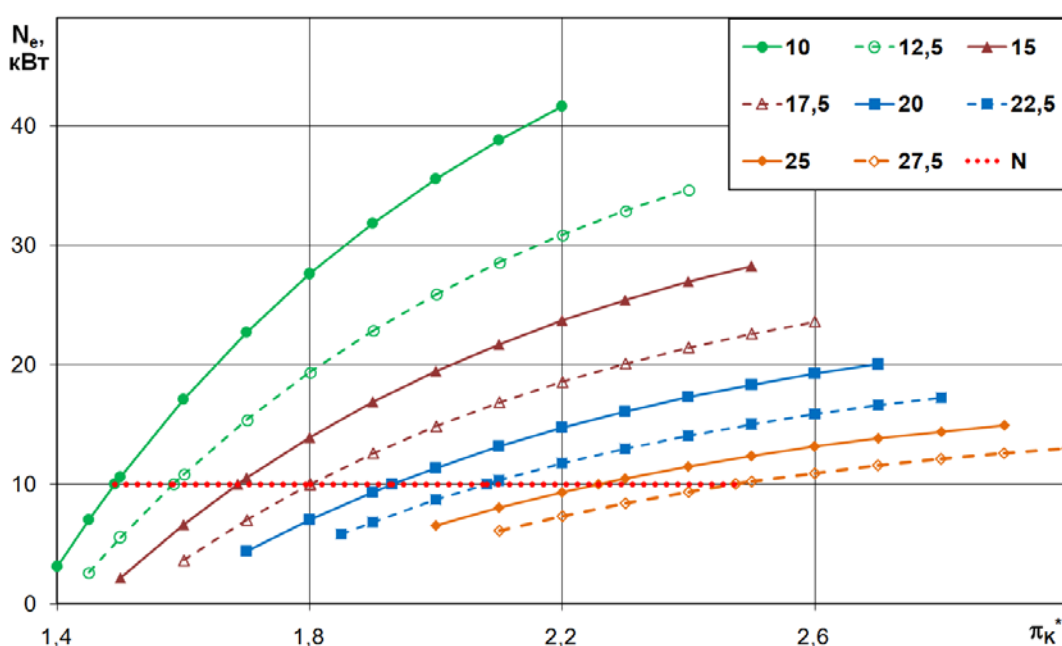


Рис. 3. Графики зависимости электрической мощности, вырабатываемой тригенерационной ЗГТУ последовательной схемы от степени повышения давления в компрессоре при различных степенях подогрева рабочего тела в охлаждаемом (кондиционируемом) помещении: 10, 12,5, 15, 17,5, 20, 22,5, 25, 27,5 - степени подогрева рабочего тела в охлаждаемом (кондиционируемом) помещении, К; N - предельная кривая, соответствующая выработке 10 кВт электрической энергии.

Для оценки эффективности данного класса установок целесообразнее использовать не КПД, а коэффициент использования теплоты (КИТ), предложенный

русским теплотехником директором Императорского Московского технического училища (МГТУ им. Н.Э. Баумана) Василием Игнатьевичем Гриневецким (1871-1919).

В дано случае КИТ определяется как сумма мощности на клеммах генератора и холодопроизводительности, отнесенная к подведенному теплу в энергетической части цикла. Хотя использование этого коэффициента вызывает ряд возражений из-за неравноценности механической работы (выработанной электроэнергии) и подведенной и отведенной теплоты, но, тем не менее, в данном случае этот критерий оценивает эффективность установки лучше, чем электрический КПД.

На рисунке 4 представлены графики зависимости КИТ тригенерационной ЗГТУ последовательной схемы от степени повышения давления в компрессоре при различных степенях подогрева рабочего тела в охлаждаемом (кондиционируемом) помещении ($\Delta T = 10 \dots 27,5 \text{ K}$) и предельная кривая, соответствующая выработке 10 кВт электрической энергии.

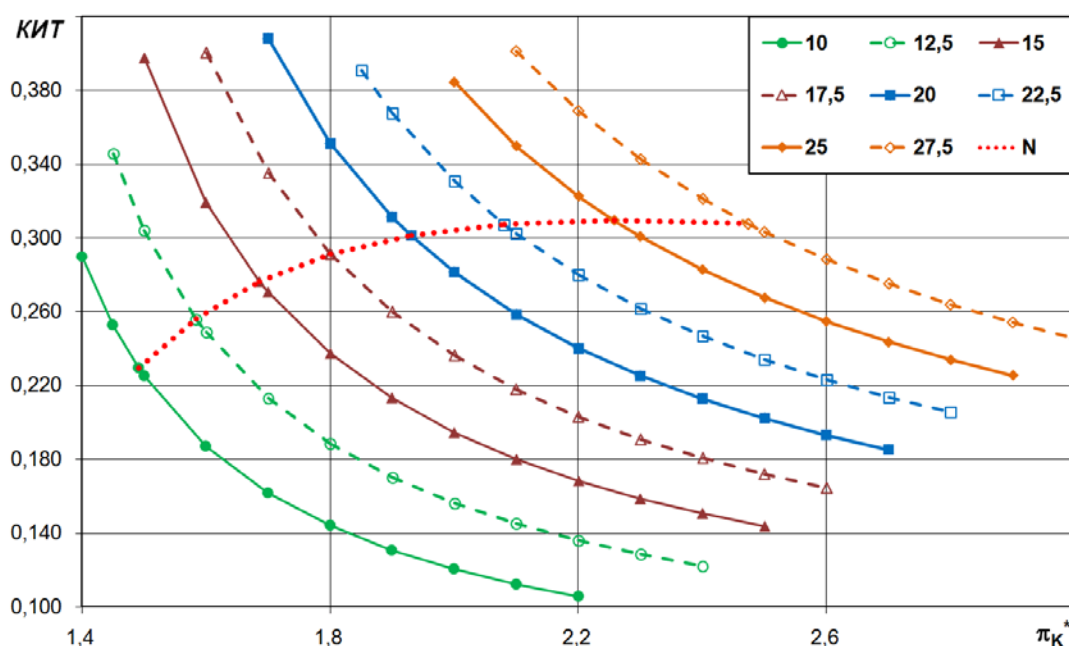


Рис. 4. Графики зависимости КИТ тригенерационной ЗГТУ последовательной схемы от степени повышения давления в компрессоре при различных степенях подогрева рабочего тела в охлаждаемом (кондиционируемом) помещении (обозначения представлены на рис. 3).

Анализ данных, представленных на рис. 3 и рис. 4 позволяет сделать вывод, о том, что при заданном наборе исходных данных можно значительно увеличить вырабатываемую электрическую мощность, но это приведет к значительному снижению КИТ (и КПД) и уменьшит возможный диапазон степеней подогрева

рабочего тела в охлаждаемом (кондиционируемом) помещении. Например, при том же наборе исходных данных и уровне электрической в 20 кВт физически нереализуемыми станут степени подогрева 22,5, 25 и 27,5 К. Для реализуемых степеней подогрева рабочего тела в охлаждаемом (кондиционируемом) помещении произойдет снижение КИТ в 1,5...2 раза (подробнее см. аналогичные точки на рис. 3 и рис. 4).

Аналогично, снижение уровня вырабатываемой электрической мощности приведет к росту КИТ (и КПД) без уменьшения возможного диапазона степеней подогрева рабочего тела в охлаждаемом (кондиционируемом) помещении.

В дальнейшем анализе будем использовать только результаты, получаемые при заданном наборе исходных данных (в т.ч. выработка электроэнергии 10 кВт).

График зависимости реализуемых (при заданном наборе исходных данных) степеней повышения давления в компрессоре от степени подогрева рабочего тела в охлаждаемом (кондиционируемом) помещении представлен на рисунке 5.

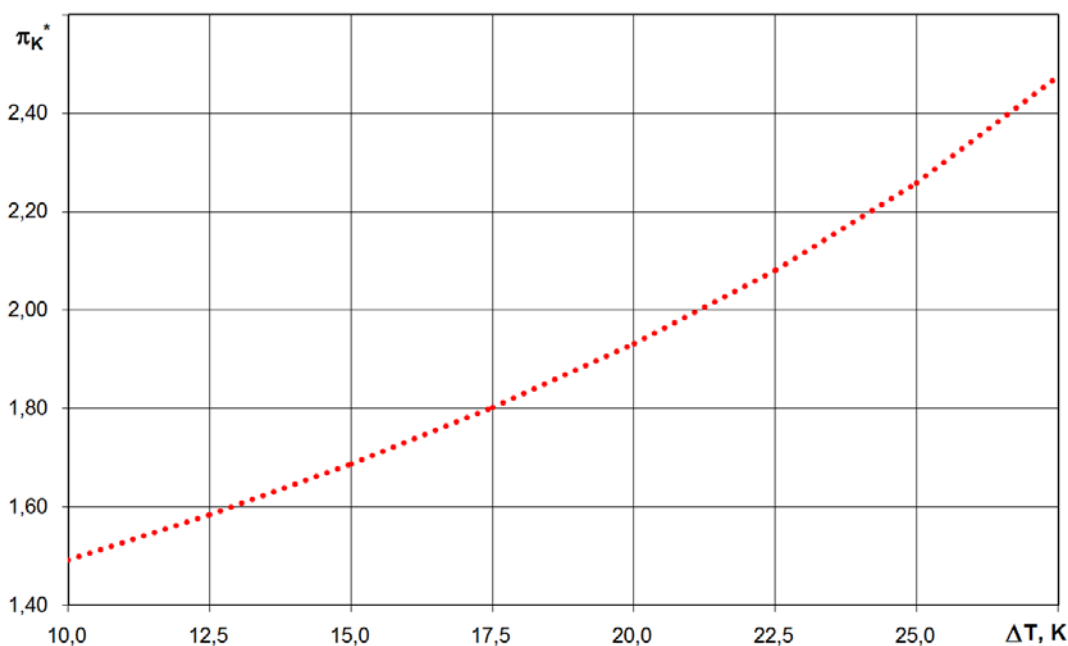


Рис. 5. Графики зависимости реализуемых степеней повышения давления в компрессоре от степени подогрева рабочего тела в охлаждаемом (кондиционируемом) помещении при принятых исходных данных.

Из представленных данных видно, что с увеличением степени подогрева рабочего тела в охлаждаемом (кондиционируемом) помещении монотонно возрастает реализуемая степень повышения давления в компрессоре (аналогичная картина наблюдается со степенями понижения давления в турбине и турбодетандере).

Сравнение графиков зависимости КПД и КИТ от степени повышения давления в компрессоре представлены на рисунке 6.

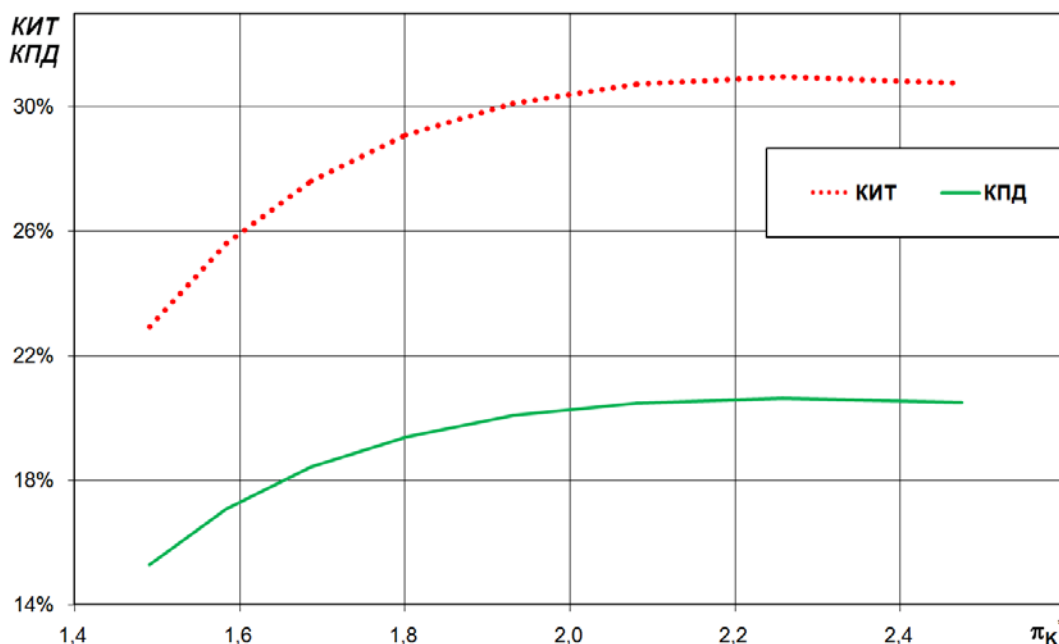


Рис. 6. Графики зависимости КИТ и КПД тригенерационной ЗГТУ последовательной схемы от степени повышения давления в компрессоре при принятых исходных данных.

Из анализа данных, представленных на рис. 6 видно, что в диапазоне степеней повышения давления в компрессоре от 1,9 до 2,5 (или степеней подогрева рабочего тела в охлаждаемом (кондиционируемом) помещении в диапазоне 20...27,5 К) КПД и КИТ слабо изменяются имея пологий максимум вблизи $\pi_k = 2,25$ (или $\Delta T = 25$ К).

При этом относительное изменение КИТ (КПД) при снижении степени повышения давления в компрессоре до уровня $\pi_k \approx 1,9$ (или степени подогрева рабочего тела в охлаждаемом помещении до $\Delta T = 20$ К) не превышает 3 % отн. (менее 0,5 % абс. КПД и около 0,6 % абс. КИТ).

Соответственно, для практической реализации может быть более целесообразно снизить оптимальную степень повышения давления в компрессоре, т.к. это позволит получить одноступенчатый центробежный компрессор с более высоким КПД.

График зависимости расхода рабочего тела через компрессор от степени повышения давления в компрессоре представлен на рисунке 7.

Из анализа данных, представленных на рис. 7 видно, что с ростом степеней повышения давления в компрессоре (или степеней подогрева рабочего тела в охлаждаемом помещении) расход рабочего тела через компрессор значительно

уменьшается. При принятом наборе исходных данных при снижении степени повышения давления в компрессоре с $\pi_K = 2,25$ до уровня $\pi_K \approx 1,9$ расход увеличивается в 1,25 раза, что при размерах лопаточных машин (компрессора, турбины и турбодетандера), получаемых при данном наборе исходных данных, так же положительно сказывается на КПД узлов.

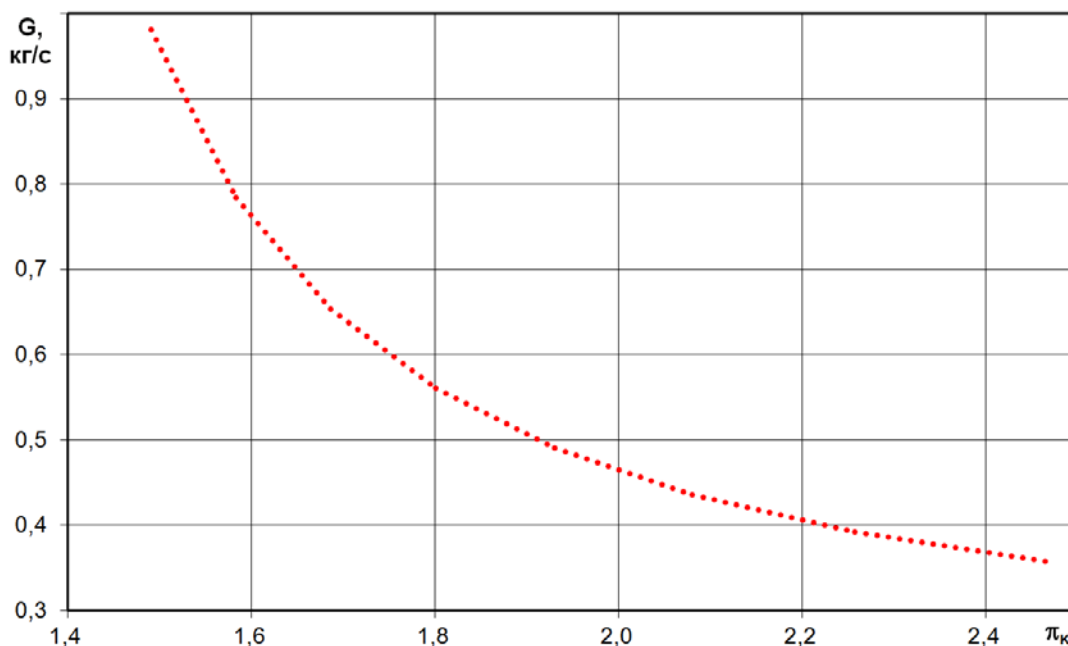


Рис. 7. График зависимости расхода рабочего тела через компрессор тригенерационной ЗГТУ последовательной схемы от степени повышения давления в компрессоре при принятых исходных данных.

Графики зависимости количеств теплоты подведенной, отведенной и возвращенной в рекуператоре энергетической части цикла тригенерационной ЗГТУ последовательной схемы (при заданном наборе исходных данных) от степени повышения давления в компрессоре представлены на рисунке 8.

Из анализа данных, представленных на рис. 8 видно, что количество подводимой и отводимой в цикле теплоты не очень сильно зависит от степени повышения давления в компрессоре, имея пологий минимум вблизи $\pi_K = 2,25$ (или $\Delta T = 25 \text{ K}$).

Однако если количества подведенной и отведенной теплоты мало зависят от выбранной рабочей точки цикла, то количество тепла, возвращаемое в цикл в регенераторе энергетической части, монотонно уменьшается с ростом степени повышения давления в компрессоре. С точки зрения уменьшения массы и размеров регенератора энергетической части целесообразно максимально повышать степень повышения давления в компрессоре.

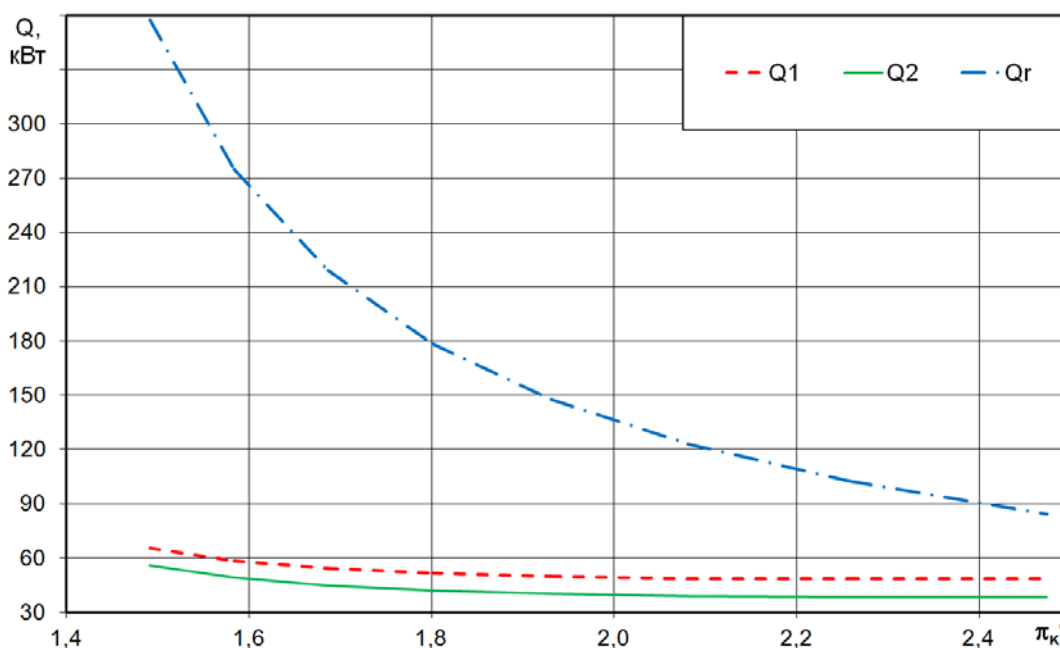


Рис. 8. Графики зависимости количества подведенной, отведенной и возвращенной в «энергетическом» рекуператоре теплоты от степени повышения давления в компрессоре тригенерационной ЗГТУ последовательной схемы при принятых исходных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом можно сделать вывод, что при заданном наборе исходных данных с точки зрения получения наименьшей массы энергоблока и условия достижения максимальной эффективности работы узлов желательно использовать степень повышения давления в компрессоре $\pi_k = 1,9 \dots 2,5$, которая реализуется при степени подогрева рабочего тела в охлаждаемом (кондиционируемом) помещении в диапазоне $20 \dots 27,5$ К.

При условии, что будет принята степень повышения давления в компрессоре $\pi_k \approx 1,9$ (что соответствует степени подогрева рабочего тела в охлаждаемом (кондиционируемом) помещении 20 К) становится возможным спроектировать одновальную машину, включающую в себя одноступенчатую центростремительную турбину, одноступенчатый центробежный компрессор, генератор и турбодетандер на заданные параметры КПД узлов.

Работа выполнена под научным руководством академика РАН Александра Ивановича Леонтьева, которому авторы благодарны за обсуждения и полезные советы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт от 25 августа 2011 года № 16516.11.6112).

ЛИТЕРАТУРА

1. Манушин Э.А, Михальцев В.Е., Чернобровкин А.П. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок. М.: Машиностроение, 1977, 447 с.
2. Arkhangelsky V.I., Chvanov V.K., Pavlov K.A., Samsonov V.L. Space Closed Brayton Power System Technique. Proceeding of the European Space Power Conference. Poitiers, France, 4-8 Sept. 1995, p.p. 159...161.
3. Арбеков А.Н., Елисеев Ю.С., Леонтьев А.И. и др. Безъядерная энергетика пилотируемой экспедиции на Марс. Известия РАН, сер. «Энергетика», №4, 2002 г, С. 3-12.
4. Mason L.S. Status of Brayton Cycle Power Conversion Development at NASA GRC. NASA/TM - 2002-211304, January 2002.
5. Babaev I.K., Beknev V.S., Samsonov V.L. et al. Laser Orbital Energy Module – The First Step to Space Power Station. Proceeding of the 1995 Space Technology & Applications International Forum, 12th Symposium on Space Nuclear Power System, American Institute of Physics, p.p. 1027...1033.
6. Mohamed S. El-Genk Dual-mode, high energy utilization system concept for Mars mission. Proceeding of the 2000 Space Technology & Applications International Forum, 17th Symposium on Space Nuclear Power System (SSNPS), American Institute of Physics, p.p. 1290...1301.

Research of the working cycle of a closed gas turbine in a tri-generation unit operating on a sequential scheme

77-30569/359008

03, March 2012

Arbekov A.N., Burtsev S.A.

Bauman Moscow State Technical University

arbekov2012@yandex.ru

serg7573@pochta.ru

The authors consider the scheme which they previously introduced in cooperation with A.I. Leontyev. It is a closed gas turbine tri-generation unit operating on a sequential scheme. The unit can simultaneously produce electric power, heat and cold (on specified temperature levels) ensuring conditioning and/or thermostatic control. The results of the research of its thermodynamic cycle with the assumption of realistic efficiency of unit components and non-zero temperature differences in heat exchangers are presented in the article. The authors define the field of reasonable rates of pressure rise in the compressor. The pressure increase provides high efficiency and small-scale dimensions and mass of the energy unit. The authors propose recommendations on choosing the rate of pressure rise in the compressor for design simplification of a closed gas turbine tri-generation unit operating on sequential scheme.

Publications with keywords: [energetics](#), [cold generation](#), [cycle thermodynamic](#), [closed gas turbine](#), [combain closed gas turbine](#), [heat generation](#), [trigeneration unit](#)

Publications with words: [energetics](#), [cold generation](#), [cycle thermodynamic](#), [closed gas turbine](#), [combain closed gas turbine](#), [heat generation](#), [trigeneration unit](#)

References

1. Manushin E.A, Mikhal'tsev V.E., Chernobrovkin A.P. *Teoriia i proektirovanie gazoturbinnnykh i kombinirovannykh ustanovok* [Theory and design of gas turbine and combined installations]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 447 p.
2. Arkhangelsky V.I., Chvanov V.K., Pavlov K.A., Samsonov V.L. Space Closed Brayton Power System Technique. *Proc. 4th Eur. Space Power Conf. (ESPC)*, Poitiers, France, Sept. 4-8, 1995, ESA Publ., 1995, pp. 159-161. (ESA SP-369).
3. Arbekov A.N., Eliseev Iu.S., Leont'ev A.I., Samsonov V.L., e.a. Bez''iaderaia energetika pilotiruemoi ekspeditsii na Mars [Non-nuclear energetics of a manned expedition to Mars]. *Izvestiia RAN. Ser. Energetika* [Journal of Russian Academy of Sciences. Ser. Energetics], 2002, no. 4, pp. 3-12.

4. Mason L.S., Shaltens R.K., Dolce J.L., Cataldo R.L. Status of brayton cycle power conversion development at NASA GRC. *AIP Conference Proceedings*, 2002, vol. 608, p. 865. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1449813>.
5. Babaev I.K., Leontiev A.I., Samsonov V.L., Schmidt K.L., Katorgin B.I., Ponomarev-Stepnoi N.N. Laser orbital energy module – The first step to space power station. *AIP Conference Proceedings*, 1995, vol. 324, pp. 1027-1033. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.47218>.
6. El-Genk M.S. Dual-mode, high energy utilization system concept for Mars mission. *AIP Conference Proceedings*, 2000, vol. 504, pp. 1290-1301. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1290942>.