

УДК 621.438.14:629.7

Ф. Г. БАКИРОВ, И. З. ПОЛЕЩУК, А. А. САЛИХОВ

ГАЗОТУРБИННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКСЕРГИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА, ПЕРЕКАЧИВАЕМОГО ПО ТРУБОПРОВОДАМ

Рассматриваются некоторые результаты термодинамического анализа комбинированной газотурбинной установки, позволяющей исключить дросселирование природного газа высокого давления с безвозвратными потерями эксергии при его подаче потребителю. *Природный газ; трубопровод; газотурбинная установка*

Природный газ, перекачиваемый по магистральным трубопроводам, обладает химической и термомеханической (физической) эксергией [1]. Последняя, как правило, в результате многоступенчатого дросселирования перед подачей газа потребителю безвозвратно теряется, хотя на сегодня разработаны различные способы рационального использования энергии сжатого газа: расширение в турбодетандерах, получение сжиженного газа и др.

Предложены также варианты применения газотурбинных установок (см., например, патенты РФ №№ 2005897, 2013615, 2013616, 2013618 — F02 C 6100) в комбинации с турбодетандерами, в частности, предусматривается подогрев выхлопными газами ГТУ природного газа перед его срабатыванием в турбодетандере. Недостатки таких схем связаны с необходимостью значительного подогрева природного газа (проблемы безопасности, термического пиролиза газа) и сложностью поддержания оптимальных режимов работы ГТУ при значительно меняющихся расходах газа, направляемых потребителям.

Авторы данной работы предложили [2, 3] схему комбинированной газотурбинной установки (КГТУ), в которой предусмотрены три рабочих контура (рис. 1): ГТУ с теплообменником-утилизатором в тракте выхлопных газов, промежуточная ГТУ замкнутого цикла (ЗГТУ) и турбодетандер в тракте природного газа с теплообменником-подогревателем. На рис. 2 условно изображены в $T-s$ диаграмме (рабочие тела во всех контурах могут быть разными и правильнее циклы и процессы разнести в отдельные диаграммы) термодинамические циклы такой КГТУ. Во втором контуре (цикле ЗГТУ) утилизи-

руются одновременно теплота, полученная от выхлопных газов ГТУ, и вырабатываемый турбодетандером холод. Энергоустановка позволяет повысить эффективность преобразования химической эксергии топлива (небольшого количества природного газа), сжигаемого в ГТУ, и термомеханической эксергии природного газа, перекачиваемого по магистральному трубопроводу, в механическую (электрическую) энергию. Выбор нейтральных (по отношению к продуктам сгорания и природному газу) или инертных газов в качестве рабочего тела в контуре ЗГТУ позволяет сделать установку взрывобезопасной, а перегрев природного газа исключен в принципе. Оптимальные режимы работы ГТУ и турбодетандера могут устанавливаться взаимонезависимо при меняющихся в широких пределах расходах потребляемого газа. При этом роль своеобразного «буфера» между ними, согласующего изменение режимов работы ГТУ и турбодетандера, выполняет ЗГТУ. Участок глубокого переохлаждения большого расхода природного газа ограничен турбодетандером и теплообменником-подогревателем (газ подается потребителю при заданном давлении и температуре окружающей среды — см. т. 11 на рис. 2), поэтому отпадает возникающая в ряде схем энергоустановок проблема расслоения металла труб, обмерзания прилегающего грунта, ведущего к «вспучиванию» трубопроводов.

Возможность варьирования режимами ГТУ и ЗГТУ, а также использование низкотемпературного природного газа, полученного в турбодетандере в качестве теплоприсадки, приводит к повышению эффективности бинарного цикла комбинированной газотурбинной установки. Работа замкнутой га-

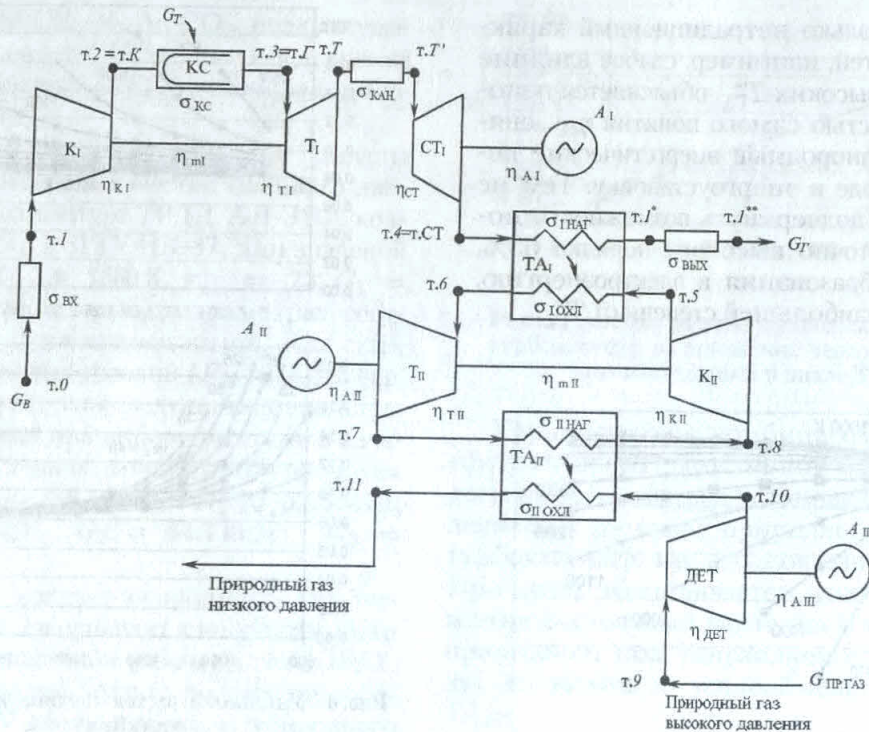


Рис. 1. Принципиальная схема комбинированной установки, использующей энергию природного газа высокого давления

зотурбинной установки осуществляется по традиционной схеме: рабочее тело циркулирует внутри замкнутого контура установки, где осуществляется его сжатие в компрессоре, нагрев в теплообменнике $ТА_1$ за счет теплоты выхлопных газов ГТУ, расширение в турбине, охлаждение в низкотемпературном теплообменнике $ТА_2$ низкотемпературным природным газом, полученным после его расширения в турбодетандере. Мощность ЗГТУ можно варьировать изменением массового расхода рабочего тела с помощью дозаторов и расходных баллонов низкого и высокого давления, содержащих запас рабочего тела.

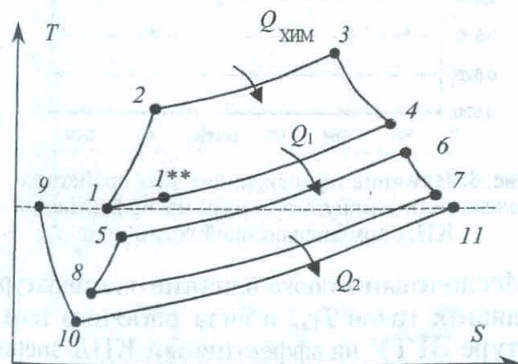


Рис. 2. Термодинамический цикл в $T-s$ -координатах комбинированной установки, использующей энергию природного газа высокого давления

Выполнены достаточно подробные термодинамические расчеты энергоустановки с варьированием параметров циклов ГТУ $\pi_{к1}^*$ в диапазоне от 5 до 40 с шагом 5, T_3^* (T_3^* на рис. 2) в диапазоне 800 ... 1800 К с шагом 100 К. При этом значения ряда других параметров, показанных на рис. 2, оставались постоянными и равными: $G_3 = 100$ кг/с; $P_9 = 75$ бар; $P_{11} = 12$ бар; $P_8 = 1$ бар; $\Delta T = 25$ К в теплообменниках; $\sigma_{вх} = 0,99$; $\sigma_{кс} = 0,95$; $\sigma_{кон} = 0,96$; $\sigma_{вых} = 1,00$; $\sigma_{наг.1} = 0,9$; $\sigma_{охл} = 0,9$; $\sigma_{наг.2} = 0,9$; $\sigma_{охл.2} = 0,9$; $\eta_{A1} = \eta_{A2} = \eta_{A3} = 0,98$; $\eta_{ТА1} = \eta_{ТА1} = 1$; $\eta_{дет} = 0,99$; $\eta_{мех1} = \eta_{мех2} = 1$; $\eta_T = 0,99$.

Расчеты эффективного КПД для энергоустановки выполнялись отдельно по каждому контуру, для бинарного цикла (ГТУ + ЗГТУ) и для всей КГТУ в целом. В последнем случае принималось

$$\eta_{e\Sigma} = \frac{N_{\Sigma}}{Q_{хим} + \Delta J_{ПГ}}$$

где $Q_{хим}$ — тепловыделение за счет сжигания природного газа в камере сгорания ГТУ; $\Delta J_{ПГ}$ — разность энтальпий расхода природного газа между точками 9 и 11 (см. рис. 1 и 2).

На рис. 3 представлены графики зависимостей $\eta_{e\Sigma}$ КГТУ от значений $\pi_{к1}^*$ и T_3^* в первом

контуре. Несколько нетрадиционный характер зависимостей, например, слабое влияние $\pi_{к1}^*$ в области высоких $T_{Г1}^*$, объясняется некоторой условностью самого понятия $\eta_{e\Sigma}$, связывающего разнородные энергетические величины на входе в энергоустановку. Тем не менее следует подчеркнуть возможность получения достаточно высокого, порядка 63%, КПД их преобразования в электроэнергию, зависящего в наибольшей степени от $T_{Г1}^*$.

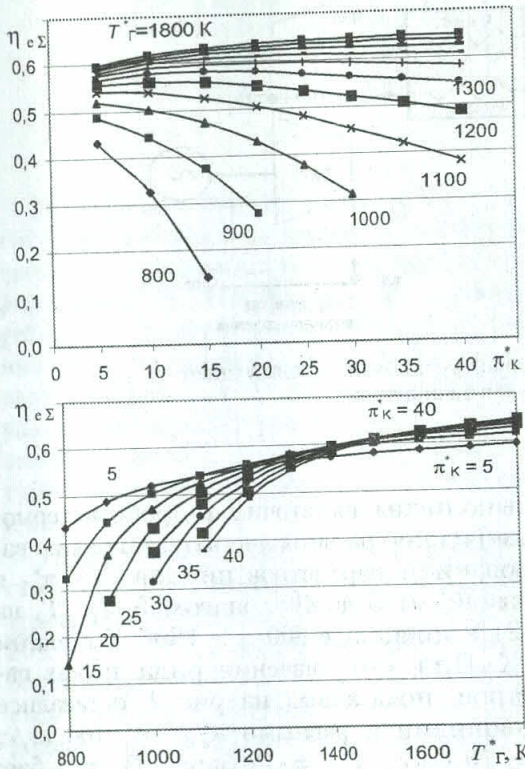


Рис. 3. Эффективный КПД установки $\eta_{e\Sigma} = f(\pi_k, T_{Г1}^*)$

В той же мере условно можно ввести понятие удельного расхода топлива $C_{уд\Sigma}$, кг/(кВт·ч), отнесенного к суммарной выработке электроэнергии (рис. 4). Рассчитанные значения являются весьма привлекательными, однако относятся только к КГТУ, тогда как значения $C_{уд1}$ для ГТУ в первом контуре и $C_{уд}$ для газоперекачивающих установок магистрального трубопровода имеют традиционные значения. Соответственно значения $\eta_{e\Sigma}$ и $C_{уд\Sigma}$ демонстрируют саму возможность эффективного преобразования химической и термомеханической эксергии природного газа в работу с помощью комбинированных энергоустановок в противовес редуцированию газа.

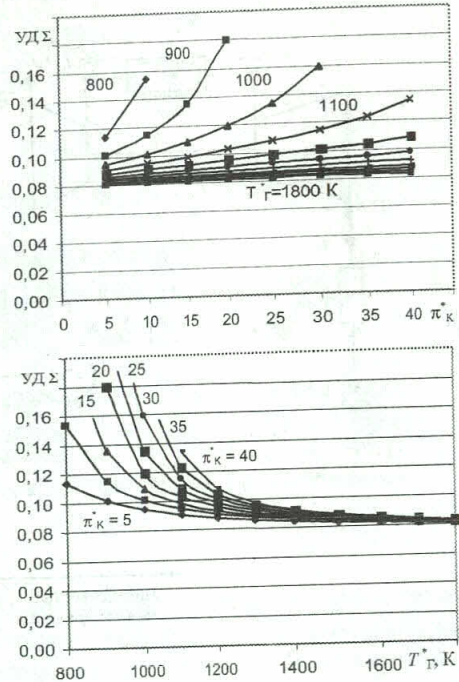


Рис. 4. Удельный расход топлива КГТУ $C_{уд\Sigma}$, кг/(кВт·ч)

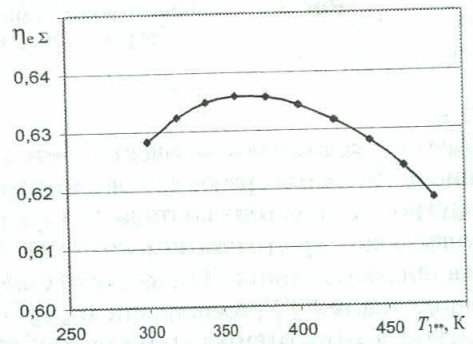


Рис. 5. Влияние температуры уходящих газов на эффективный КПД комбинированной установки

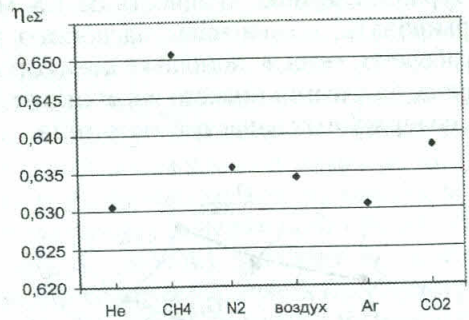


Рис. 6. Влияние термодинамических свойств рабочего тела замкнутого контура на эффективный КПД комбинированной установки

Исследовано также влияние температуры уходящих газов $T_{Г1**}$ и вида рабочего тела в контуре ЗГТУ на эффективный КПД энергоустановки (рис. 5 и 6). Видно, что существует оптимум $T_{Г1**}$ для получения наибольшего значения $\eta_{e\Sigma}$, а влияние выбора рабочего тела

из перечня He, CH_4, N_2, Ar, CO_2 , воздух существенно только для CH_4 , однако последнее не отвечает надежности КГТУ в смысле взрыво-безопасности.

Проведены термодинамические расчеты КГТУ при выборе в качестве базового двигателя первого контура ТРДД АЛ-31Ф, конвертированного в ЗГТУ НК-37, для значений параметров $T_{Г1}^* = 1660 K, \pi_{к1}^* = 23, G_1 = 112 \text{ кг/с}$, при остальных параметрах, соответствующих приведенным выше. Для стандартных стеновых условий ($P_H = 1,013 \text{ бар}, T_H = 288 K$) получены следующие параметры энергоустановки при выборе воздуха в качестве рабочего тела во втором контуре: $\eta_{e\Sigma} = 0,634; N_{\Sigma} = 116,4 \text{ МВт}; N_1 = 52,3 \text{ МВт}; N_2 = 15,4 \text{ МВт}; G_2 = 44,1 \text{ кг/с}; G_3 = 41,1 \text{ кг/с}$.

Изменение расхода природного газа через турбодетандер приводит к необходимости варьирования расходом рабочего тела ЗГТУ. При использовании воздуха в качестве рабочего тела ЗГТУ влияние расхода природного газа через турбодетандер на параметры цикла ЗГТУ приведено на рис. 7–9.

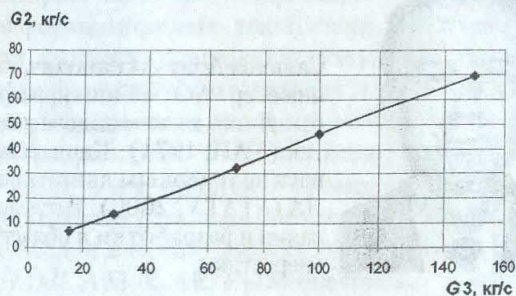


Рис. 7. Зависимость расхода воздуха через компрессор ЗГТУ от расхода природного газа через турбодетандер

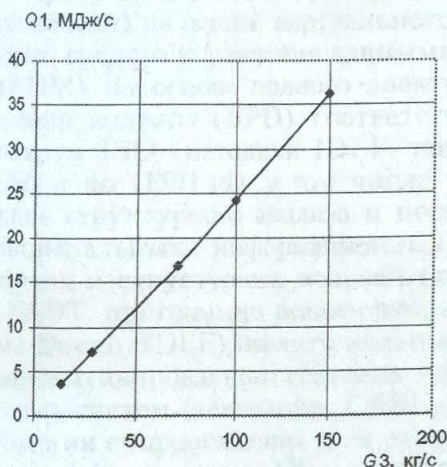


Рис. 8. Зависимость теплоты, подводимой к рабочему телу второго контура в теплообменнике ТА₁, от расхода природного газа через турбодетандер

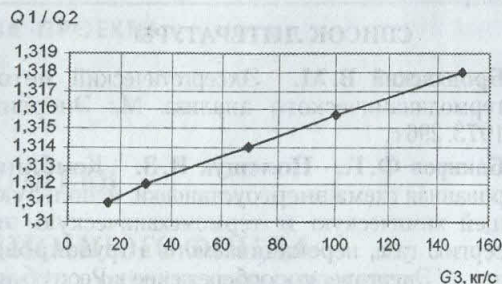


Рис. 9. Влияние расхода природного газа через турбодетандер на отношение теплот, подводенных и отведенных в цикле ЗГТУ

Характеристики комбинированной энергоустановки по эффективной мощности каждого из трех контуров установки также определяются расходом природного газа через турбодетандер, как это показано на рис. 10. При этом обеспечивается условие поддержания постоянного давления и температуры природного газа, направляемого потребителю, на выходе из теплообменного аппарата ТА_{II}.

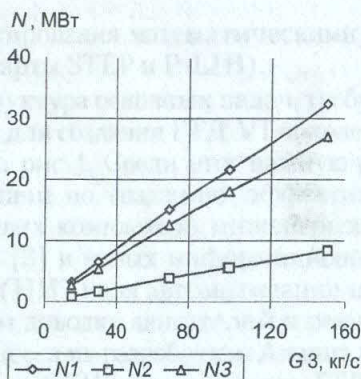


Рис. 10. Мощностные характеристики контуров установки в зависимости от расхода природного газа через турбодетандер

В целом выполненные термодинамические расчеты позволяют прогнозировать возможность достаточно эффективного преобразования эксергии природного газа, перекачиваемого в трубопроводах, в механическую и электрическую энергию с помощью рассмотренной комбинированной ГТУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бродянский В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа. М.: Энергия, 1973. 296 с.
2. Бакиров Ф. Г., Полещук И. З. Комбинированная схема энергоустановки, использующей химическую и термомеханическую эксергию газа, перекачиваемого в трубопроводах // Энергоресурсосбережение в Республике Башкортостан: Материалы второй науч.-практ. республ. конф. Уфа, 1999. С. 98–103.
3. Бакиров Ф. Г., Полещук И. З., Верзакова М. А. Комбинированная схема энергоустановки, использующей химическую и термомеханическую эксергию газа, перекачиваемого по магистральным трубопроводам // Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели: Тез. докл. XI Всерос. межвуз. НТК. МВТУ, 15–17 ноября 2000. М.: ГПНТБ, 2000. С. 14–15.

ОБ АВТОРАХ



Бакиров Федор Гайфулович, профессор, зав. каф. теории авиационных и ракетных двигателей УГАТУ. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1969). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УГАТУ, 1995). Исследования в области авиадвигателестроения, ракетных двигателей, энергоустановок, проблем энергосбережения.



Полещук Игорь Захарович, доцент той же кафедры. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1969). Канд. техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УАИ, 1979). Исследования в области энергетических и энерготехнологических процессов и установок.



Салихов Азат Ахсанович, гл. инженер АО «Башкирэнерго». Дипл. инж.-теплоэнергетик (УАИ, 1971). Канд. техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УГАТУ, 2000). Исследования и разработки в области энергетики.