

УДК 621.438:662.994.004.18

О.С. КУЧЕРЕНКО, Е.Н. ПОЖИДАЕВА

ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект»

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ В ГТУ

Для повышения эффективности использования природного газа в энергетических установках необходимо тем или иным способом утилизировать физическое тепло отходящих газов на выходе из установок. Одним из способов повышения эффективности энергетических установок является термохимическая регенерация тепла уходящих газов. В статье представлены результаты оценки эффективности применения термохимической регенерации в газотурбинных установках. Рассмотрено применение термохимической регенерации в газотурбинной установке простой схемы, газотурбинной установке с регенератором и в контактной газотурбинной установке «Водолей».

Ключевые слова: термохимическая регенерация, степень конверсии, паровая конверсия метана, ГТУ простой схемы, ГТУ с регенератором, контактная ГТУ «Водолей».

Введение

Традиционным путем повышения топливной эффективности ГТУ является создание высокотемпературных газовых турбин, что связано с повышением начальных параметров термодинамического цикла. Однако в последние годы возможности улучшения эффективности ГТУ за счет повышения начальных параметров цикла значительно уменьшились. Это связано с тем, что во многих случаях почти достигнут предел жаропрочности известных материалов [1].

Одним из путей повышения эффективности ГТУ является термохимическая регенерация тепла, которая предусматривает конверсию топлива за счет энергии тепловых выбросов установки.

Анализ схем ГТУ с термохимическим регенератором (ТХР) с позиций существующих технологий ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» показал, что наиболее вероятно создание в ближайшей перспективе ГТУ с ТХР, использующих паровую конверсию топлива.

Настоящая работа выполнена с целью оценки эффективности применения термохимической регенерации, использующей паровую конверсию топлива, для модернизации и дальнейшего совершенствования ГТУ ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект».

Результаты расчетов и их анализ

Для повышения эффективности использования природного газа в энергетических установках необходимо тем или иным способом утилизировать физическое тепло отходящих газов на выходе из уста-

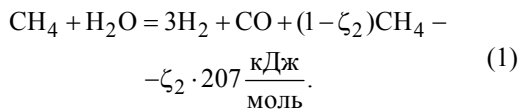
новок. Одним из способов повышения эффективности энергетических установок является термохимическая регенерация тепла уходящих газов.

Сущность термохимической регенерации тепла уходящих газов заключается в использовании их физического тепла для эндотермической переработки топлива, которое при этом получает больший запас химически связанного тепла [2, 3]. Кроме того, при этом образуется значительное количество молекулярного водорода и монооксида углерода, сжигание которых сопровождается малой эмиссией NO_x [4].

Степень конверсии метана отображает энергетическую эффективность ТХР, которая наиболее заметно зависит от температуры, давления и компонентного состава метано-паровой смеси. На рис. 1 представлены графики зависимости максимальной степени конверсии метана ζ_2 от температуры и давления, приведенные в работе [5]. Здесь предполагается, что в ТХР поступает чистый метан CH_4 , а дымовые газы, образованные при сжигании метана имеют состав $\text{CO}_2:\text{H}_2\text{O}:\text{N}_2 = 1:2:7,52$. Анализ графиков (рис. 1) позволяет сделать несколько выводов. Так, наиболее сильно степень конверсии метана ζ_2 зависит от температуры. Значение $\zeta_2 = 1$ можно получить лишь при очень высокой температуре конверсии $T_{\text{ТХР}}$ в ТХР, а именно при $T_{\text{ТХР}} \geq 1400 \text{ К}$. В диапазоне от $T_{\text{ТХР}} = 800 \text{ К}$ до $T_{\text{ТХР}} = 1300 \text{ К}$ на степень конверсии метана ζ_2 заметно влияет давление в ТХР. Чем давление меньше, тем степень конверсии метана ζ_2 больше. В диапазоне температур уходящих газов, характерных для ГТУ производства ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» от $T_{\text{ТХР}} = 673 \text{ К}$ до $T_{\text{ТХР}} = 773 \text{ К}$, степень конверсии метана ζ_2 не превы-

шает значения $\zeta_2 = 0,3$ даже для самых оптимистических вариантов.

Реакция паровой конверсии метана описывается уравнением:



Для организации процесса конверсии топлива по уравнению (3) исходное топливо и водяной пар должны быть смешаны между собой и нагреты до температуры конверсии. Потом эта смесь подается в ТХР, где при температуре конверсии протекает эндотермическая реакция с отбором теплоты от уходящих из энергетической установки газов. В результате из ТХР при температуре конверсии выходит смесь газов (синтез-газ) состоящая из водорода H_2 , окиси углерода CO .

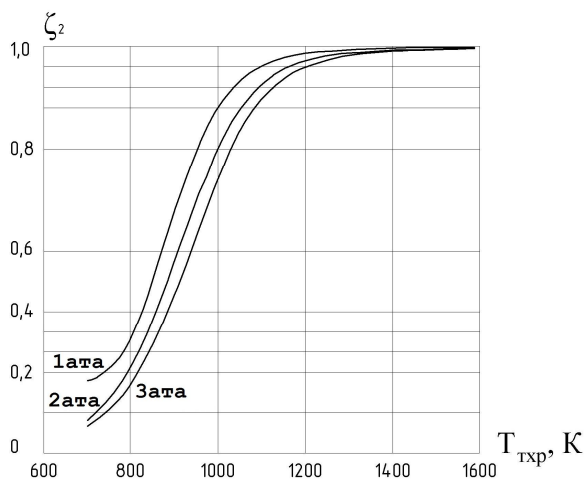


Рис. 1. Зависимость степени конверсии метана ζ_2 от температуры и давления [5]

ГТУ с ТХР с паровой конверсией топлива, представленная на рис. 2, работает следующим образом. Атмосферный воздух поступает в компрессор ГТУ, сжимается и подводится в камеру сгорания. В камере сгорания в потоке сжатого воздуха сжигается синтез-газ и образовавшиеся продукты сгорания поступают на турбину ГТУ, расширяются с совершением работы, которая затрачивается на привод компрессора и потребителя мощности. Отходящие из турбины газы поступают в ТХР 3 по стороне низкого давления, где отдают часть тепла на организацию процесса конверсии. Далее отходящие из турбины газы поступают в утилизационный парогенератор 2, где отдают тепло на генерацию пара, после чего отводятся в атмосферу. Водяной пар $G_{\text{г.Н}_2\text{O}}$ из утилизационного парогенератора 2 смешивается с топливом $G_{\text{топ}}$ и подается в ТХР по стороне высокого давления, где протекает реакция конверсии с получением синтез-газа. Синтез-газ в количестве

$(G_{\text{г.Н}_2\text{O}} + G_{\text{топ}})$ из ТХР по стороне высокого давления подается в камеру сгорания ГТУ.

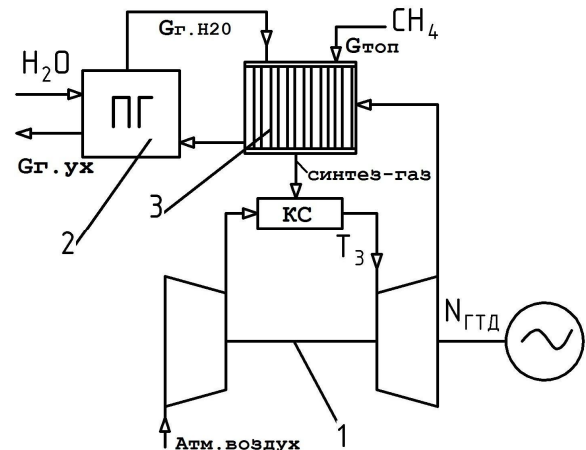


Рис. 2. Схема ГТУ с термохимическим регенератором с паровой конверсией топлива:
1 – ГТД; 2 – парогенератор;
3 – термохимический регенератор

Исследовались три схемы ГТУ: простая – ГТУ с ТХР, с термодинамическим регенератором – ГТУР с ТХР, контактная ГТУ «Водолей» – КПТУ с ТХР.

На рис. 3 показаны графики зависимостей КПД ГТУ простого цикла и ГТУ с ТХР от степени повышения давления в компрессоре. Из сопоставления графиков на видно, что оптимальные по КПД степени повышения давления для ГТУ простой схемы и ГТУ с ТХР практически совпадают. Такая особенность позволяет улучшать топливную экономичность ГТУ простой схемы дополнением ее ТХР без переделки конструкции двигателя.

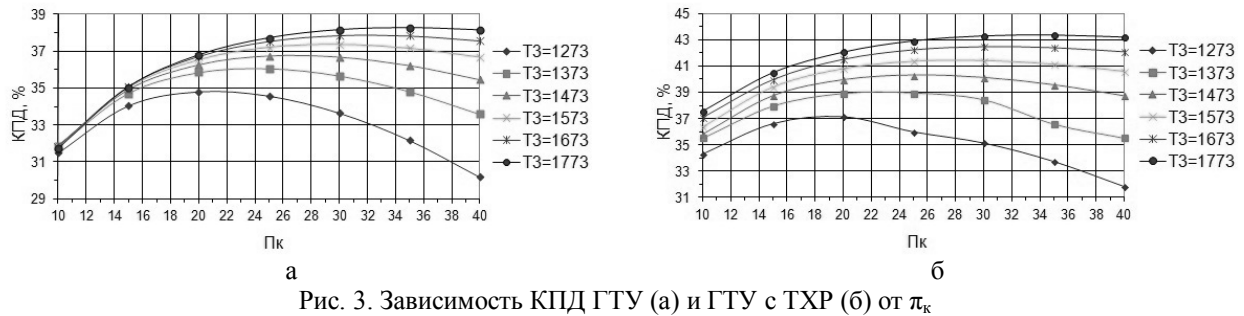
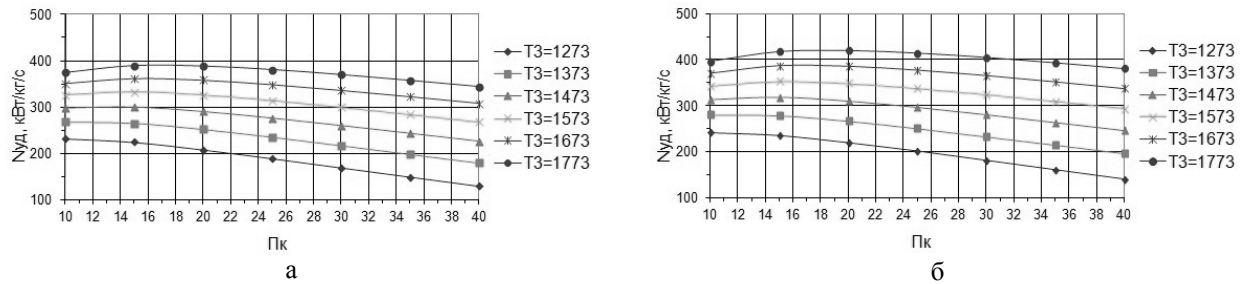
На рис. 4 представлены графики зависимости удельной мощности ГТУ простого цикла и ГТУ с ТХР от степени повышения давления в компрессоре. Анализ показывает следующее. Применение ТХР позволяет улучшить топливную экономичность ГТУ простого термодинамического цикла. Чем больше температура газа за камерой сгорания, тем больший выигрыш в топливной экономичности обеспечивает применение ТХР. Это объясняется увеличением степени конверсии топлива с увеличением температуры конверсии.

Оценка улучшения топливной экономичности ГТУ простой схемы применением ТХР для разных значений температур газа за камерой сгорания показана в табл. 1.

Таблица 1

Изменение прироста КПД

T_3 , К	1273	1373	1473	1573	1673	1773
Прирост КПД, %	2,3	2,9	3,4	4,0	4,5	5,1

Рис. 3. Зависимость КПД ГТУ (а) и ГТУ с ТХР (б) от π_k Рис. 4. Зависимость $N_{уд}$ ГТУ (а) и ГТУ с ТХР (б) от π_k

Результаты оценки возможности улучшения характеристик ГТУР применением ТХР с паровой конверсией топлива представлены в виде графиков зависимостей КПД и удельной мощности ГТУР и ГТУР с ТХР от степени повышения давления в компрессоре (рис. 5 – 8).

Из приведенных оценок видно, что заметный выигрыш по КПД от 4,5 до 5,1 % от применения ТХР в ГТУ простого цикла возможен при температурах газа за камерой сгорания не меньших 1673 К.

На рис. 7 и рис. 8 показаны графики зависимостей удельной мощности ГТУР и ГТУР с ТХР от степени повышения давления в компрессоре.

Для оценки возможности улучшения топливной экономичности ГТУР применением ТХР из всего множества расчетных точек, для каждой из тем-

ператур газа за камерой сгорания и степени повышения давления, были выбраны точки соответствующие максимальным значениям КПД (табл. 2). Расчеты показали, что применение ТХР для ГТУР с высокой степенью регенерации тепла уходящих газов ($\sigma = 0,85$) не позволяет улучшить топливную экономичность установки. Это объясняется, прежде всего, низкими значениями температуры газов на входе в ТХР (соответственно, низкими значениями температуры конверсии) и низкими значениями температуры газов на выходе из ТХР - на входе в регенератор (большое «захолаживание» потока газа в ТХР). Кроме того, потери полного давления в ГТУР с ТХР больше, чем потери в ГТУР на величину потерь полного давления в ТХР по стороне газа, влияние которых на КПД существенно.

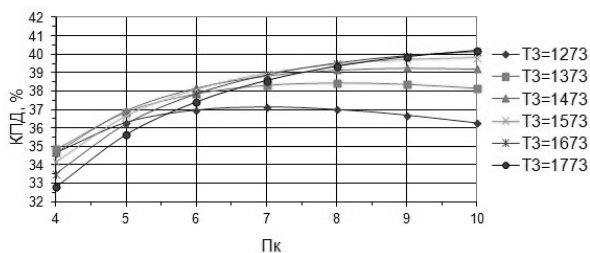
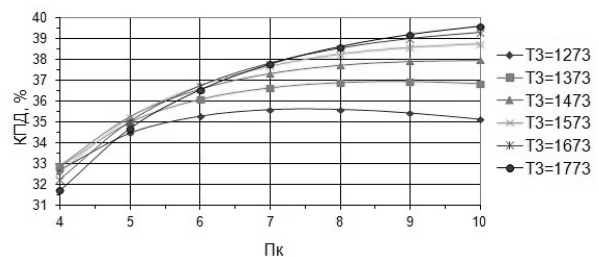
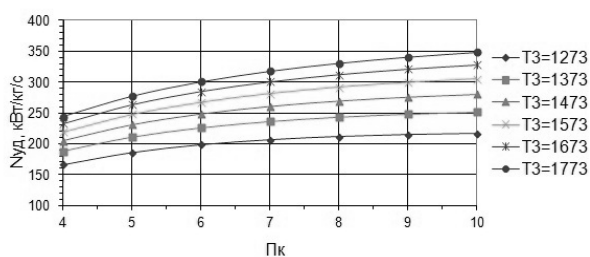
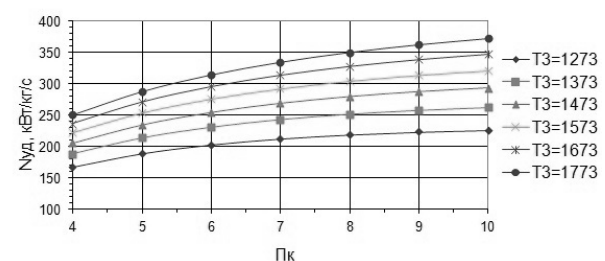
Рис. 5. Зависимость КПД ГТУР от π_k Рис. 6. Зависимость КПД ГТУР с ТХР от π_k Рис. 7. Зависимость $N_{уд}$ ГТУР от π_k Рис. 8. Зависимость $N_{уд}$ ГТУР с ТХР от π_k

Таблица 2

Точки, соответствующие
максимальным значениям КПД

T_3, K	ГТУР		ГТУР с ТХР	
	π_k	КПД	π_k	КПД
1273	7	37,1	7	35,6
1373	8	38,4	9	36,9
1473	9	39,3	10	38
1573	10	39,8	10	38,7
1673	10	40,1	10	39,8
1773	10	40,2	10	39,6

Анализ показывает, что наиболее близким аналогом схемы ГТУ с ТХР с паровой конверсией топлива, из линейки ГТУ разработки ГП НПКГ «Зоря»-Машпроект», является КГПТУ «Водолей». Схема ГТУ с паровой конверсией метана отличается от КГПТУ «Водолей» наличием ТХР перед утилизационным парогенератором и отсутствием контактного конденсатора парогазового потока. Одним из наиболее значимых недостатков рассматриваемой схемы является сравнительно низкие значения темпе-

ратур газа на входе в ТХР. С одной стороны, это не позволяет получить высокие значения степени конверсии метана, что в свою очередь не позволяет получить заметный выигрыш в топливной экономичности ГТУ с ТХР.

С другой стороны, при этом на величину от 3 до 5 % увеличиваются потери полного давления в тракте отходящих газов, что существенно снижает топливную экономичность ГТУ с ТХР.

Для численной оценки эффективности применения термохимической регенерации в ГТУ были рассмотрены следующие варианты схем КГПТУ «Водолей» с ТХР:

- 1) ТХР отсутствует;
- 2) ТХР расположен перед ТВД;
- 3) ТХР расположен перед ТНД;
- 4) ТХР расположен перед СТ;
- 5) ТХР расположен перед УПГ.

Расчеты термодинамических циклов КГПТУ с ТХР производились для температур газа за камерой сгорания $T_3 = 1573 K$ и $T_3 = 1773 K$.

В табл. 3, 4 приведены основные результаты расчетов термодинамических циклов КГПТУ с ТХР.

Таблица 3

Основные результаты расчетов

	Исходный вариант	ТХР перед ТВД	ТХР перед ТНД	ТХР перед СТ	ТХР перед УПГ
Температура газа за КС, К	1573	1573	1573	1573	1573
Степень повышения давления	25	25	25	25	25
КПД, %	49,1	45,3	45,0	44	48,6
Удельная мощность, кВт/кг	609,7	417,6	401,2	364,5	370
Коэффициент избытка воздуха в КС	1,93	2,74	2,82	2,89	3,14
Расход пара в КС, доли ед.	0,176	0,115	0,095	0,079	0,04
Избыток воды, доли ед.	0,017	0,002	-	-	-

Таблица 4

Основные результаты расчетов

	Исходный вариант	ТХР перед ТВД	ТХР перед ТНД	ТХР перед СТ	ТХР перед УПГ
Температура газа за КС, К	1773	1773	1773	1773	1773
Степень повышения давления	30	30	30	30	30
КПД, %	52,3	49,5	49,1	48,3	51,9
Удельная мощность, кВт/кг	803,6	576,5	551,7	519,4	478,1
Коэффициент избытка воздуха в КС	1,39	2,04	2,12	2,18	2,48
Расход пара в КС, доли ед.	0,228	0,156	0,132	0,113	0,050
Избыток воды, доли ед.	0,031	0,013	0,01	-	-

Анализ результатов расчетов показывает следующее. Постановка ТХР перед ТВД, ТНД, СТ, УПГ существенно снижает мощность и топливную экономичность КГПТУ «Водолей». Основная причина это снижение температур рабочего тела перед турбинами и УПГ, что ведет к снижению количества сгенерированного пара и, соответственно, к снижению количества пара поданного в камеру сгорания КГПТУ «Водолей».

Температурный перепад на ТХР по стороне рабочего тела КГПТУ «Водолей» зависит от места расположения ТХР в схеме установки и от параметров термодинамического цикла.

Заключение

Применение ТХР, как средства модернизации ГТУ, производимых ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», с целью улучшения топливной экономичности и показателей экологии представляется целесообразным для дальней перспективы, когда температуры газов за камерой сгорания ГТУ будут не менее 1673 К.

Наибольшая проблема видится в создании ТХР, способных использовать бросовое тепло ух-

дящих газов ГТУ сравнительно невысоких температур (поиск эффективных катализаторов термохимических реакций), отличающихся приемлемыми весогабаритными характеристиками и стоимостными показателями.

Литература

1. Иноземцев, А.А. Газотурбинные двигатели [Текст]: в 2 ч. / А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий. – Пермь: ОАО «Авиадвигатель», 2006. – Ч. 1. – 224 с.
2. Семенов, Н.А. Вторичные энергоресурсы промышленности и энерготехнологическое комбинирование [Текст] / Н.А. Семенов. – М.: Энергия, 1983. – 260 с.
3. Носач, В.Г. Энергия топлива [Текст] / В.Г. Носач. – К.: Наукова Думка, 1989. – 148 с.
4. Сигал, И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива [Текст] / И.Я. Сигал. – Л.: Недра, 1988. – 312 с.
5. Пащенко, Д.И. Определение максимальной степени конверсии метана продуктами полного сгорания природного газа [Текст] / Д.И. Пащенко // Вестник СГТУ. Энергетика и электротехника. – 2010. – № 3. – С. 143 – 150.

Поступила в редакцию 1.06.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. кафедры А.П. Шевцов, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова.

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРМОХІМІЧНОЇ РЕГЕНЕРАЦІЇ В ГТУ

О.С. Кучеренко, О.М. Пожидаева

Для підвищення ефективності використання природного газу в енергетичних установках необхідно тим або іншим чином утилізувати фізичне тепло відхідних газів на виході з установок. Одним з способів збільшення ефективності енергетичних установок є термохімічна регенерація тепла відхідних газів. В статті представлено результати оцінки ефективності застосування термохімічної регенерації в газотурбінних установках. Розглянуто застосування термохімічної регенерації в газотурбінній установці простої схеми, газотурбінній установці з регенератором та в контактній газотурбінній установці «Водолей».

Ключові слова: термохімічна регенерація, степінь конверсії, парова конверсія метану, ГТУ простої схеми, ГТУ з регенератором, контактна ГТУ «Водолей».

EFFICIENCY ESTIMATION OF THERMOCHEMICAL REGENERATION APPLICATION TO GTU

O.S. Kucherenko, E.N. Pozhidaeva

It's necessary to find the way how to utilize the physical heat of flue gases on an exit from the power installations and increase the efficiency of natural gas using in this installations. Thermochemical regeneration of exhaust gases heat is one of the ways to increase the efficiency of the power installations. In this article, efficiency estimation results of thermochemical regeneration application to gas turbine units are presented. Thermochemical regeneration application to the simple cycle gas turbine unit, gas turbine unit with regenerator and gas turbine unit "Aquarius" is considered.

Key words: thermochemical regeneration, conversions power, steam conversion to methane, the simple cycle of GTU, GTU with regenerator, GTU «Aquarius».

Кучеренко Олег Спиридонович – ведущий конструктор, ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина.

Пожидаева Елена Николаевна – инженер-конструктор III категории, ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина.