

13. Boyko, V. N. Development of modes for limestone calcination in cyclone furnaces [Text] / V. N. Boyko. – Metallurgical heat engineering, 2004. – P. 15–26.
14. Boyko, V. N. Calculation of cyclone calciner working chamber for the firing fine limestone [Text] / V. N. Boyko. – Metallurgical heat engineering, 2006. – P. 16–22.
15. Luo, H. Modeling the Gas-Solid Flow in Calcining Furnace [Text] / H. Luo // Journal of Computational Multiphase Flows. – 2011. – Vol. 3, Issue 1. – P. 3–12. doi: 10.1260/1757-482x.3.1.1
16. Wei, R. Simulation on pore size distribution of calcined product from calcium based sorbents [Text] / R. Wei, H. Chen, J. Yan, J. Gao // 2010 International Conference on Digital Manufacturing & Automation, 2010. – P. 387–390. doi: 10.1109/icdma.2010.430
17. Shih, T.-H., New k-ε Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows – Model Development and Validation [Text] / T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, J. A. Zhu // Computers and Fluids. – 1995. – Vol. 24, Issue 3. – P. 227–238. doi: 10.1016/0045-7930(94)00032-t
18. Cundall, P. A. Discrete numerical-model for granular assemblies [Text] / P. A. Cundall, O. D. L. Strack // Geotechnique. – 1979. – Vol. 29, Issue 1. – P. 47–65. doi: 10.1680/geot.1979.29.1.47

Наводяться матеріали щодо розробки та аналізу енергетичної ефективності двопаливних монарних парогазових установок з форкотлом, що працює на паливах-замінниках природного газу низької або середньої калорійності. Розглядаються технологічні схеми даних установок, які відповідають роботі теплоутилізаційного контуру в режимі підігріву живильної води та в режимі її підігріву та випаровування

Ключові слова: двопаливна монарна газопарова установка, форкотел, палива – замінники природного газу

Приводятся материалы по разработке и анализу энергетической эффективности двухтопливных монарных парогазовых установок с форкотлом, работающим на топливах-заменителях природного газа низкой или средней калорийности. Рассматриваются технологические схемы данных установок, соответствующие работе теплоутилизационного контура в режиме подогрева питательной воды и в режиме ее подогрева и испарения

Ключевые слова: двухтопливная монарная газопаровая установка, форкотел, топлива – заменители природного газа

УДК 621.438.629.12

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.43465

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВУХТОПЛИВНЫХ МОНАРНЫХ ГАЗОПАРОВЫХ УСТАНОВОК

Г. М. Любчик

Доктор технических наук, профессор

Н. М. Фиалко

Доктор технических наук, профессор,

заведующая отделом, заслуженный деятель науки и техники,

член-корреспондент НАН Украины*

E-mail: nmfiialko@ukr.net

А. Реграги

Младший научный сотрудник*

E-mail: regrab@rambler.ru

Р. А. Навродская

Ведущий научный сотрудник*

E-mail: navrodsкая@rambler.ru

О. Н. Кутняк

Младший научный сотрудник*

E-mail: onrutnak@ukr.net

Л. А. Швецова

Младший научный сотрудник*

E-mail: akimowna.lyudmila@yandex.ru

*Отдел малой энергетики

Институт технической теплофизики НАН Украины

ул. Желябова, 2а, г. Киев, Украина, 03057

1. Введение

Одним из перспективных направлений развития газотурбинных установок (ГТУ) является, как известно, совершенствование монарных газопаровых

технологий. Среди различных путей такого совершенствования выделяется разработка схемных решений, ориентированных на сокращение потребления дефицитных, высококалорийных энергетических топлив (природный газ и специальные марки жидких газотур-

бинных топлив). Данное обстоятельство обуславливает актуальность исследования предлагаемых двухтопливных монарных газопаровых установок (МГПУ), в которых наряду с природным газом используются топлива-заменители низкой и средней калорийности.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Анализ перспектив развития ГТУ показывает, что повышение энергетической эффективности и единичной мощности газотурбинных энергоустановок возможно на основе модернизации монарных газопаровых технологий [1–3].

Монарные циклы и соответствующие комбинированные установки на основе ГТУ в процессе развития претерпели ряд преобразований. При этом общей особенностью их технической реализации остаются: объединение газовой и паровой турбины в общее устройство преобразования теплового потенциала смеси продуктов сгорания и перегретого пара в механическую или электрическую энергию; генерирование перегретого пара в теплоутилизационном контуре, установленном на выхлопе; реализация вторичного перегрева водяного пара в камере сгорания базовой ГТУ.

Запатентованная С. А. Христиановичем технология впрыскивания пара в камеру сгорания [4, 5] получила достаточно широкое распространение под названием STIG (Steam Intention Gas Turbine) или ISTIG при наличии промежуточного охлаждения воздуха в компрессоре. Высокая эффективность цикла STIG обусловлена использованием теплоты газов после турбины в теплоутилизационном контуре с целью генерирования перегретого пара и значительным повышением КПД [6–8]. Установки типа STIG характеризуются: большим приростом мощности – до 80 %, низким уровнем эмиссии NOx и CO, малыми капитальными затратами на 1 кВт мощности и пр. [5, 9].

Известны также варианты монарных газопаровых установок на основе цикла Ченга, в которых вода или пароводяная смесь испаряется в самом тракте высокого давления как до, так и после камеры сгорания [10, 11]. Здесь, как и в установках с технологией STIG, предусматривается химическая очистка поступающей воды. В обоих случаях пары воды вместе с уходящими продуктами сгорания выбрасываются в атмосферу, что приводит к значительной потере теплоты и загрязнению окружающей среды.

В установках типа «Водолей» [6] данный недостаток устранен введением контактного конденсатора, в котором конденсируются содержащиеся в отработанных газах водяные пары, и вода вновь возвращается в цикл установки. Недостаточная эффективность реализации цикла «Водолей» объясняется термической перегрузкой ее теплоутилизационного контура, в котором осуществляются все составляющие процесса подогрева питательной воды и генерирования пара. Поэтому термодинамическое форсирование монарных ПУ возможно путем использования в технологической схеме выносного теплогенератора для генериро-

вания пара или его первичного перегрева [2]. Причем для его работы возможно использование низкосортных топлив промышленного, искусственного (продукты газификации) или биологического происхождения. Последнее обстоятельство приобретает особенное значение в условиях подорожания энергоносителей [1, 3, 11].

Монарные газопаровые установки, технологии которых основаны на использовании топлив – заменителей природного газа предоставляют большие возможности экономии дефицитного и дорогостоящего природного газа. А научно-технические задачи, связанные с реализацией ресурсосберегающих технологий, требуют дальнейшего развития исследований в данном направлении.

3. Цель работы и задачи исследования

Цель данной работы состоит в проведении анализа энергетической эффективности предложенных двухтопливных монарных газопаровых установок с форкотлом, работающим на топливах-заменителях природного газа низкой или средней калорийности.

Для достижения этой цели решению подлежали следующие задачи:

- выполнить анализ термодинамических процессов, происходящих в топочном пространстве и парогенерирующем контуре форкотла;
- провести расчеты термодинамических параметров предложенной двухтопливной МГПУ при работе теплоутилизационного контура в режиме подогрева питательной воды и режиме ее подогрева и испарения;
- выполнить сопоставление технико-экономических показателей рассматриваемых двухтопливных МГПУ, базовой ГТУ и МГПУ типа «Водолей».

4. Описание технологических схем двухтопливных монарных газопаровых установок (МГПУ)

На рис. 1, а, б представлены принципиальные технологические схемы предлагаемой двухтопливной МГПУ. В данных схемах перегретый экологический и энергетический водяной пар, который подается в камеру сгорания, генерируется в форкотле. При этом в случае применения топлив-заменителей низкой калорийности форкотел работает в режиме испарителя и пароперегревателя, а топлив-заменителей средней калорийности – в режиме только пароперегревателя. В обоих случаях экологический и энергетический пар генерируется в объемах m_n , эквивалентных расходу компрессорного воздуха m_k . Экологический пар подается в зону горения, которое происходит в режиме близком к стехиометрическому (при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1,05...1,2$), с образованием первичной газопаровой смеси с паросодержанием $d_{ЕК,П}=5...10\%$. Подачу энергетического пара осуществляют в зону смешения, которая расположена между зоной горения и газосборником газопаровой турбины, где происходит его дополнительный перегрев от начального уровня температуры T_0 после форкотла до номинальной температуры цикла T_3 .

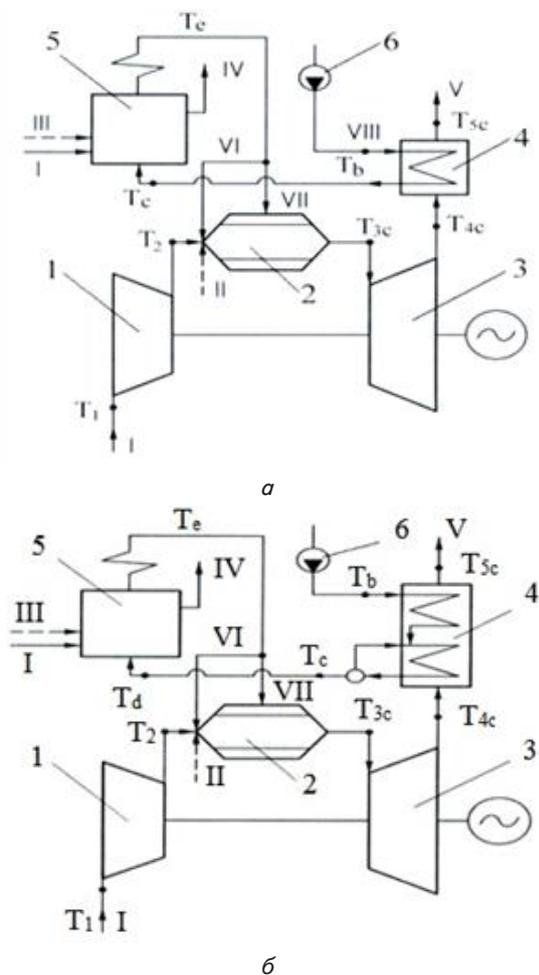


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема двухтопливной монарвной газопаровой установки при работе теплоутилизационного контура в режиме подогрева питательной воды (а) и в режиме ее подогрева и испарения (б): 1 – компрессор; 2 – камера сгорания; 3 – газопаровая турбина; 4 – теплоутилизационный контур; 5 – форкотел; 6 – насос; I – атмосферный воздух; II – газовое топливо; III – топливо-заменитель природного газа; IV – отходящие газы форкотла; V – отработанная газопаровая смесь; VI и VII – экологический и энергетический пар; VIII – питательная вода

В результате использования теплового потенциала полученных в зоне горения стехиометрических продуктов сгорания образуется рабочая газопаровая смесь с паросодержанием $d_{ГПС}$, которое может превышать 50%. Остаточный тепловой потенциал этой смеси после газопаровой турбины используется в утилизационном контуре, который расположен в ее выхлопном тракте. В данном контуре реализуется режим подогревателя питательной воды (вариант ППВ, рис. 1, а) при сжигании в форкотле заменителей природного газа низкой калорийности, или режим подогревателя питательной воды и испарителя (вариант ППВИ, рис. 1, б) в условиях сжигания топлив заменителей средней калорийности с последующей подачей питательной воды или насыщенного водяного пара в паровой тракт форкотла.

5. Анализ особенностей термодинамических процессов двухтопливных МГПУ

Ниже рассматриваются результаты выполненного анализа термодинамических процессов, происходящих в основных элементах и трактах предлагаемых двухтопливных МГПУ. В качестве примера на рис. 2 в TS координатах приводятся данные расчетов для процессов, происходящих в топочном пространстве и парогенерирующем контуре форкотла, работающем на угле марки АШ при твердом шлакоудалении. Приведенные результаты соответствуют двум режимам работы теплоутилизационного контура – ППВ (рис. 2, а) и ППВИ (рис. 2, б) при температуре дутьевого воздуха $T_2=600$ К и коэффициенте избытка воздуха в топке котла $\alpha_T=1,25$.

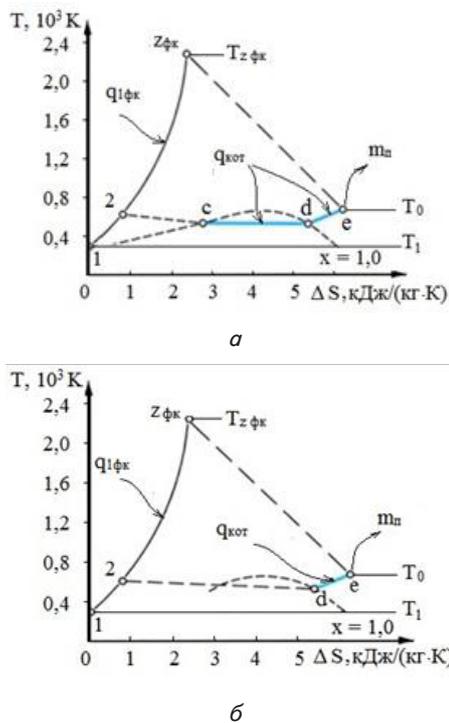


Рис. 2. Диаграмма рабочих процессов в топке и теплогенерирующем контуре форкотла при работе теплоутилизационного контура в режиме подогрева питательной воды (а) и в режиме ее подогрева и испарения (б)

Процессы горения топлива в топке форкотла определяются линией 2 – $z_{ФК}$ и характеризуются для двух указанных режимов одинаковым количеством теплоты, подведенной к 1 кг дутьевого воздуха $q_{1ФК}$, а также к 1 кг генерированного водяного пара $q_{кот}$ ($q_{кот}=\eta_{ФК}q_{1ФК}$, где $\eta_{ФК}=0,92$ – принятый в расчетах КПД форкотла).

Процессы в парогенерирующем контуре форкотла изображаются линией c-d-e в режиме работы теплоутилизационного контура ППВ (рис. 2, а), и линией d-e в режиме его работы ППВИ (рис. 2, б). Указанные режимы соответствуют разным величинам прироста энтальпии на 1 кг пара. Так, при давлении свежего пара $P_0=6$ МПа и температуре ее перегрева $T_0=673$ К указанный прирост энтальпии для ППВ режима работы теплоутилизационного контура превышает соответствующее значение для режима ППВИ примерно в 5,8 раза.

Рис. 3 иллюстрирует TS – диаграмму рабочего процесса в газотурбинном и теплоутилизационном контуре предлагаемой установки для двух режимов работы данного контура (ППВ и ППВИ). Термодинамические параметры газопаровой турбины определены при начальной температуре цикла $T_3=1366$ К, степени повышения давления в компрессоре $\pi_K = P_2/P_1=19,5$, сжигании в камере сгорания природного газа с коэффициентом избытка воздуха $\alpha_{КСГ}=1,1$ и температуре воздуха на входе $T_2=727$ К. Данным параметрам соответствует температура «сухих» продуктов сгорания $T_{ЗКСГ}=2366$ К для двух режимов работы теплоутилизационного контура. Собственно процесс сжигания газа в атмосфере воздуха, изображаемый в TS-диаграмме изобарой 2–3 – $z_{КСГ}$, имеет две составляющие: процесс 2–3, характеризующий теплоту, подведенную к смеси компрессорного воздуха и топлива и определяющуюся соотношением $q'_1 = h_3 - h_2$ (где h_3, h_2 – энтальпии топливо-воздушной смеси, кДж/кг) и процесс 3 – $z_{КСГ}$, соответствующий количеству теплоты, $q''_1 = h_{ЗКСГ} - h_3$, которая расходуется на дополнительный перегрев экологического и энергетического пара в камере сгорания. Исходя из вышеизложенного, для оценки величины относительной подачи водяного пара на 1 кг компрессорного воздуха можно воспользоваться соотношением

$$\frac{m_n}{m_k} \approx \frac{h_{ЗКСГ} - h_3}{h_{3П} - h_0}$$

где $h_{3П}$ – энтальпия водяного пара при номинальной температуре цикла. Для рассматриваемых условий,

$\frac{m_n}{m_k} \approx 1,0$, что соответствует паросодержанию газопаровой смеси, подводимой к турбине, $d_{ГПС} \approx 50\%$.

По результатам проведенных расчетных исследований определены технико-экономические показатели предложенных двухтопливных монарных газопаровых установок. В табл. 1 приводятся основные из этих показателей по сравнению с МГПУ типа «Водолей» и ГТУ простой схемы. (Здесь K_N определяется как отношение мощности газопаровой установки к мощности базовой ГТУ, а $K_{ПГ}$ – как отношение расходов условного топлива в форкотле и камере сгорания двухтопливной МГПУ).

Как свидетельствуют выполненные оценки, предлагаемые двухтопливные МГПУ при относительном

расходе водяного пара $\frac{m_n}{m_k} \approx 1,0$ характеризуются по

сравнению с базовой ГТУ простого цикла увеличением единичной мощности установки в 4,4 раза и повышением ее КПД на 4 % при работе утилизационного контура в режиме ППВ и на 25 % – при его работе в режиме ППВИ. При этом достигается замещение расхода природного газа на 87 % для первого из указанных вариантов и на 15 % – для второго.

Таким образом, выполненные исследования показали, что присоединение к технологической схеме монарной газопаровой установки форкотла (который вместе с теплоутилизационным контуром на выхлопе турбины и камерой сгорания образует последовательную цепь генерирования водяного пара) позволяет:

- обеспечить замещение части расхода дефицитного природного газа низкосортными топливами;
- существенно повысить уровень использования теплового потенциала камеры сгорания и увеличить паросодержание газопарового рабочего тела;
- достичь повышения энергетической эффективности и значительного роста единичной мощности монарной газопаровой установки.

Таблица 1

Основные технико-экономические показатели монарных газопаровых энергоустановок на базе ГТУ – 16

Технико-экономические показатели	Базовая ГТУ	Монарные газопаровые установки на базе ГТУ–16		
		МГПУ «Водолей»	ДМГПУ	
			ППВ	ППВИ
Мощность, N_E , МВт	16,0	25,0	~70,0	~70,0
Относительный расход водяного пара m_n/m_k	0	0,13	1,0	1,0
Коэффициент увеличения мощности, K_N	1,0	1,6	4,4	4,4
КПД установки, %	31,0	43,0	35,0	56,0
Абсолютное повышение КПД, $\Delta\eta_{УСТ} = \eta_{УСТ} - \eta_{ГТУ}$, %	0	12,0	4,0	25,0
Относительное повышение КПД, $\delta\eta = \Delta\eta_{УСТ} / \eta_{ГТУ}$, %	0	-39,0	-13,0	-81,0
Коэффициент замещения природного газа, $K_{ПГ}$	0	0	0,87	0,15

6. Выводы

1. Установлены закономерности протекания термодинамических процессов в двухтопливных МГПУ с форкотлом, работающим на топливах-заменителях природного газа низкой или средней calorificity. В частности, показано, что при включении в технологическую схему форкотла как дополнительного источника генерирования пара снижается термическая перегрузка теплоутилизационного контура, существенно повышается паросодержание рабочего тела, КПД установки и её единичная мощность.

2. Выполнен анализ рабочих процессов в топочном пространстве и па-

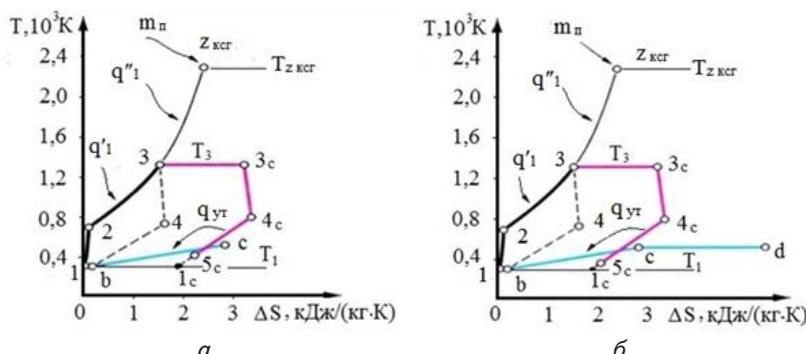


Рис. 3. Диаграмма рабочих процессов в газотурбинном и теплоутилизационном контуре двухтопливной монарной газопаровой установки при работе теплоутилизационного контура в режиме подогрева питательной воды (а) и в режиме ее подогрева и испарения (б)

рогенирующем контуре форкотла. Установлено, что при работе утилизационного контура установки в режиме подогрева питательной воды приращение эн- тальпии на 1 кг водяного пара превышает примерно в 5,8 раза соответствующее приращение при реализации в данном контуре режима подогрева и испарения воды.

3. Проведено сопоставление основных технико- экономических показателей предлагаемой двухто- пливной МГПУ, базовой ГТУ и МГПУ типа «Водо-

лей». В частности, показано, что при паросодержании рабочей смеси равном 50 % в предлагаемых двухто- пливных установках по сравнению с ГТУ базовой схе- мы достигается увеличение единичной мощности в 4,4 раза. При этом соответствующее повышение КПД установки составляет 4 % в случае работы теплоути- лизационного контура в режиме подогрева питатель- ной воды и 25 % – в режиме ее подогрева и испарения.

Литература

1. Христин, В. А. Газотурбинные установки: История и перспективы. [Текст] / В. А. Христин, Г. Б. Варламов. – К.: НТУУ «КПИ», 2006. – 384 с.
2. Любчик, Г. Н. Предельные возможности термодинамического форсирования монарной газопаровой технологии [Текст]/ Г. Н. Любчик, Н. А. Дикий, Н. М. Фиалко, А. Реграги // Промышленная теплотехника. – 2011. – № 6. – С. 46–51.
3. Любчик, Г. Н., Перспективы повышения энергетической эффективности теплосиловых установок на базе газовых турбин [Текст] / Г. Н. Любчик, А. Реграги // Экотехнология и ресурсосбережение. – 2007. – № 3. – С. 33–39.
4. Giampaolo, T. Gas Turbine Handbook: Principles and Practices 3rd Edition [Text] / T. Giampaolo. – The Fairmont Press, Inc., 2006. – P. 131–139.
5. Horlock, J. H. Advanced Gas Turbine Cycles [Text] / J. H. Horlock. – Elsevier Science Ltd, Oxford, 2003. – P. 85–109.
6. Газотурбинные двигатели для энергетики и газотурбинные электростанции [Электронный ресурс] / Зоря-Машпроект. – Николаев, 2015. – Режим доступа: <http://www.zmturbines.com/>
7. Спосіб виробництва електричної енергії у монарній газопаровій установці [Текст] / Любчик Г. М., Дикий М. О., Реграги А. – Патент України № 38125 від 25.12.2008. – Бюл. № 24. – 2008. – 8 с.
8. Haselbacher, H. Performance of water/steam injected gas turbine power plants consisting of standard gas turbines and turbo expanders [Text] / H. Haselbacher // International Journal of Energy Technology and Policy. – 2005. – Vol. 3, Issue 1/2. – P. 12–23. doi: 10.1504/ijetp.2005.006737
9. Koivu, T. G. New Technique for Steam Injection (STIG) using Once Through Steam Generator (GTI/OTSG) Heat Recovery to improve Operational Flexibility and Cost Performance [Text] / T. G. Koivu // Proceedings of the 17th Symposium on Industrial Application of Gas Turbines (IAGT). Banff, AB, Canada, 2007. – P. 4–32.
10. Roumeliotis, I. Evaluation of water injection effect on compressor and engine performance and operability [Text] / I. Roumeliotis, K. Mathioudakis // Applied Energy. – 2010. – Vol. 87, Issue 4. – P. 1207–1216. doi: 10.1016/j.apenergy.2009.04.039
11. Boyce, M. P. Gas Turbine Engineering Handbook, Fourth Edition [Text] / M. P. Boyce. – Elsevier Science Ltd, Oxford, 2012. – P. 3–78.