

УДК 629.5:621.436

**Б.Г. ТИМОШЕВСКИЙ, М.Р. ТКАЧ***Национальный университет кораблестроения  
им. адмирала Макарова, Николаев, Украина*

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМБИНИРОВАННЫХ УСТАНОВОК С ДВС И ЭЛЕМЕНТАМИ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ**

Рассмотрены перспективы, проблемы и рациональные пути использования углей в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания. Установлено, что одним из эффективных направлений является внутрицикловая газификация этого вида органического сырья с получением синтез-газа, богатого водородом. Достижение высокой эффективности энергетической установки в целом возможно за счет использования синтез-газа в комбинированной установке, в состав которой, кроме двигателя внутреннего сгорания входит и воздушно-водородный топливный элемент, обладающий высоким КПД. Приведена принципиальная схема комбинированной энергетической установки и выполнен укрупненный анализ ее эффективности.

**ДВС, комбинированная установка, паровая конверсия, катализатор, водород, топливный элемент, эффективность**

### **Введение**

Проблема надежного и экономически обоснованного обеспечения энергоносителями является одной из ключевых составляющих национальной безопасности стран импортирующих эти виды сырья. Решение этой проблемы может быть достигнуто за счет рационального использования сырьевых ресурсов, которыми располагает тот или иной регион. В частности перспективным представляется эффективное использование углей и продуктов их переработки в тепловых двигателях.

### **1. Формулирование проблемы**

Известно, что эффективность энергетических установок определяется полнотой использования энергии топлива и стоимостью выработанной энергии. Это заставляет исследователей направлять свои усилия по пути совершенствования схемных и конструктивных решений энергетических установок на базе тепловых двигателей и других систем преобразования энергии, а также – использования более дешевых сортов топлива.

В такой постановке определенный интерес пред-

ставляет вариант комбинированной энергетической установки на базе турбопоршневых двигателей внутреннего сгорания и топливных элементов, как преобразователей химической энергии.

На сегодняшний день современные турбопоршневые двигатели обладают самыми высокими показателями топливной экономичности среди тепловых двигателей. КПД таких двигателей достигает 52% при удельном расходе стандартного дизельного топлива 0,165 г/(кВт×ч) [1, 2]. В это же время КПД систем прямого преобразования химической энергии, например, топливных элементов с твердым электролитом, достигает 83% [3, 4].

Кроме того, постоянно растущие цены на дизельное топливо, достигшие к настоящему времени 1230 долларов США за тонну [5], требуют поиска более дешевых энергоносителей. Одним из таких энергоносителей является уголь, цены на который существенно ниже и в настоящее время составляют 63 доллара США за тонну [6]. В пересчете энергетическая стоимость этих топлив составит соответственно 29,2 и 3,15 долларов США/МДж. Такое соотношение цен в пользу угля заставляет исследователей искать эффективные пути его использования в

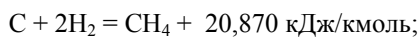
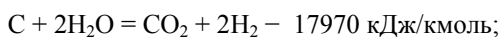
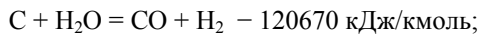
энергетических установках.

Использованию угля в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания на протяжении последних 50 лет было уделено значительное внимание [7 – 12]. Однако до настоящего времени остается нерешенным ряд серьезных проблем, связанных с использованием этого вида твердого топлива в ДВС, что не позволяет рассчитывать на близкую перспективу широкого использования углей в этом типе тепловых двигателей.

## 2. Решение проблемы

Одним из путей эффективного использования углей является его внутрицикловая газификация, продуктом которой является смесь горючих газов, теплотворная способность которой изменяется в широких пределах (10...45 МДж/кг) и существенно зависит от метода газификации [13]. В такой постановке целесообразным представляется паровая конверсия угля с получением синтез-газа.

При паровой конверсии угля возможны следующие реакции:



Незначительные количества других горючих газов метанового, этиленового и ацетиленового рядов, которые входят в состав синтез-газа, не оказывают сколь существенного влияния на процессы конверсии и, как правило, в первом приближении не учитываются. Преобладание той или иной реакции существенно зависит от условий: температуры, давления, катализатора и др.

Константы реакций образования  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$  могут быть определены из следующих зависимостей:

$$K_{\text{CO}} = \frac{P_{\text{CO}} \times P_{\text{H}_2}}{P_{\text{H}_2\text{O}}};$$

$$K_{\text{CO}_2} = \frac{P_{\text{CO}_2} \times P_{\text{H}_2}^2}{P_{\text{H}_2\text{O}}^2}.$$

Зависимость констант равновесия и, соответственно, выход компонентов синтез-газа существенно зависит от температуры, что показано на рис. 1 [13].

Из приведенных зависимостей видно, что процесс паровой конверсии углей необходимо вести при температурах не ниже 1300 °С для получения минимально возможного количества негорючей двуокиси углерода и максимального количества водорода с высокой теплотворной способностью.

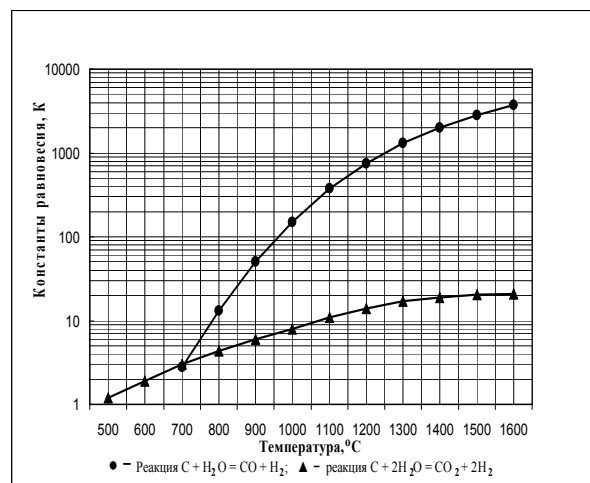


Рис. 1. Зависимость констант равновесия от температуры реакции

На практике при температуре паровой конверсии 1573К может быть получен синтез газ следующего состава (объемных %):  $\text{CO}_2$  – 6,5%,  $\text{N}_2$  – 5,5%,  $\text{CO}$  – 37%,  $\text{H}_2$  – 50%,  $\text{CH}_4$  – 0,5%,  $\text{H}_2\text{S}$  – 0,3% и  $\text{O}_2$  – 0,2%, при теплотворной способности 11,5 МДж/м<sup>3</sup> или 15,1 МДж/кг при плотности 0,76 кг/м<sup>3</sup>.

Перерасчет на массовые количества реагентов позволяет в удобном виде представить материальный баланс реакции, определить затраты водяного пара на конверсию 1 кг угля и выход синтез-газа. На паровую конверсию 1 кг обогащенного угля необходимо затратить 11,5...13,9 МДж тепла и 0,80...0,85 кг водяного пара, в результате чего образуется 1,8...1,85 кг синтез-газа общей теплотворной способностью 36,2...36,7 МДж, что на 22,1...22,3%

выше, чем теплотворная способность исходного топлива.

Увеличение теплотворной способности конечного продукта реакции (синтез-газа) относительно исходного угля объясняется тем, что в систему было внесено соответствующее дополнительное количество энергии (теплота реакции конверсии), что не противоречит положениям химической термодинамики.

Целесообразным представляется комплексное использование синтез-газа, полученного из угля, в комбинированной установке с турбопоршневым двигателем и воздушно-водородным топливным элементом. В такой установке паровая конверсия угля осуществляется за счет утилизации тепла выпускных газов ДВС и небольшого количества топлива, затрачиваемого на подогрев части выпускных газов до температуры реакции.

На рис. 2 приведена принципиальная схема комбинированной установки с элементом прямого преобразования энергии.

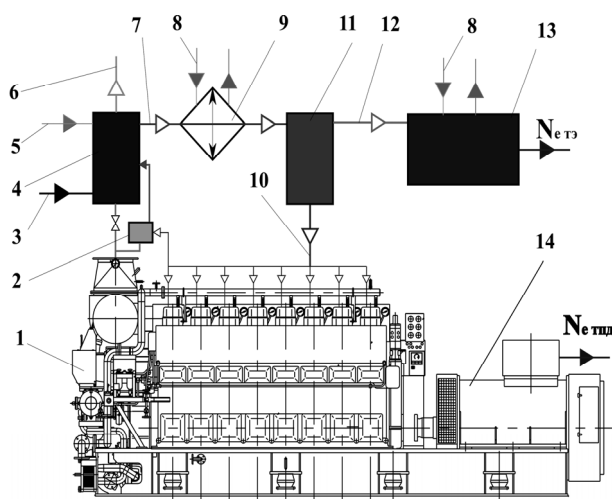


Рис. 2. Принципиальная схема комбинированной установки с ДВС и топливным элементом.

- 1 – турбопоршневой ДВС; 2 – дополнительная камера сгорания; 3 – подача угля; 4 – реформер; 5 – подвод воды; 6 – выпускные газы; 7 – выход синтез-газа из реформера; 8 – подвод охлаждающей воды; 9 – фильтр-сепаратор; 10 – топливный газ из сепаратора к ДВС; 11 – сепаратор синтез-газа; 12 – водород к топливному элементу; 13 – топливный элемент; 14 – электрогенератор ДВС

В состав установки, кроме традиционных элементов, входят: камера дожигания 2, реформер 4, фильтр-охладитель синтез-газа 9, металлгидридный сепаратор 11 и воздушно-водородный топливный элемент 13.

Установка функционирует следующим образом. Обогащенный уголь 3 поступает в реформер 4, где за счет тепла части выпускных газов ДВС 1, нагретых в дополнительной камере сгорания 2 до 1300 °С в присутствии катализатора, происходит паровая конверсия и получение синтез-газа широкого состава. В составе этого газа находится до 60% (объемных) водорода, который поступает в фильтр-охладитель 9 и металлгидридный сепаратор 11, где происходит разделение газов с выделением чистого водорода, который направляется в топливный элемент 13. Здесь происходит прямое преобразование химической энергии водорода в электрическую с КПД 80%.

Оценка энергетической эффективности, выполненная на базе укрупненной математической модели, позволила сделать заключение о целесообразности такого подхода к решению проблемы рационального использования углей в энергетических установках и определить ожидаемые показатели.

Так, например, расчеты, выполненные для установки на базе двигателя Wärtsilä 12V50DF, дают следующие результаты. При работе двигателя на синтез-газе, полученном из 1 кг угля, можно получить 2,55 кВт·ч электроэнергии с учетом затрат энергии на процесс конверсии. В это же время, при комплексном использовании синтез-газа с разделением его на топливный газ и водород, используемый в дополнительном топливном элементе, можно получить 4,83 кВт·ч электроэнергии из 1 кг угля также при учете затрат на осуществление процесса.

В целом, при затратах угля 11,068 т/ч установка позволяет развить мощность двигателя Wärtsilä 12V50DF 11400 кВт и получить дополнительно 8744 кВт мощности от топливного элемента. Таким обра-

зом, суммарная мощность комбинированной установки составляет 20144 кВт.

### Заключение

Выполненные исследования дают основание предположить, что использование комплексного подхода к рациональному использованию угля в энергетических установках на базе ДВС и топливных элементов позволит повысить коэффициент использования этого топлива примерно в 1,8...1,9 раза.

### Литература

1. Diesel Facts Magazine. MAN Diesel A/S. 2008.1.
2. Project Guide: Gas Power Plants. Wärtsilä 12V50DF. Wartsila Press, 06.2007.
3. Fuel cell fundamentals / Ryan O'Hayre et al. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 409 p.: ill. 2006.
4. Handbook of fuel cells: fundamentals, technology, and applications / Editors, Wolf Vielstich, Arnold Lamm, Hubert A. Gasteiger. England; Hoboken, N.J.: Wiley, 4v. ill. 2003.
5. Energy Information Administration. US DOE. April, 2008.
6. Higher Prices for Coal. The New-York Times / By the Associated Press, April 5, 2008.
7. Белоусов Е.В. Создание и совершенствованное твердотопливных поршневых двигателей внутреннего сгорания. – Херсон: ОАО "ХГТ", 2006. – 452 с.
8. US Pat. 5163385. Coal-water slurry fuel internal combustion engine and method for operating same. McMillian; Michael H. Appl. No.: 07/851,390 Filed Nov. 17, 1992. Current International Class: F02D19/04 (20060101); F02B 45/02 (20060101); F02B 45/10 (20060101); F02B 45/00 (20060101); F02D 19/00 (20060101); F02B 19/00 (20060101); F02B 19/14 (20060101); F02B 75/02 (20060101); F02B 045/00.
9. Coal-Fueled Diesels: Systems Development / M.H. McMillian et al. // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 111, Jul. 1989. – P. 485-490.
10. Coal-Fueled Diesel: Technology Development / G. Leonard et al. // DOE Report DOE/MC/22181-2694, Mar. – 1989.
11. US Pat. 3,965,870. Method of operating an internal combustion engine with solvent refined coal as a fuel. Clark, Wallace. Appl. No.: 05/554,633. Filed: March 3, 1975. Current International Class: F02D 19/00 (20060101); F02D 19/04 (20060101); F02B 45/00 (20060101); F02B 45/04 (20060101); F02B 045/04 (20060101); F02D 019/04.
12. Internal Combustion Engines. Proceedings of the ASME Power Conference, April 5- 7, 2005, US, Chicago, Illinois. – P. 1526.
13. Химические вещества из угля. Пер. с нем. / Под ред. И.В. Калевица. – М.: Химия, 1980. – 616 с.

*Поступила в редакцию 20.05. 2008*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.И. Сербин, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев.