

**Aristov Yu.V.<sup>1</sup>, Kolikov V.A.<sup>2</sup>, Korotkov S.V.<sup>1</sup>,  
Korotkov D.A.<sup>1</sup>, Snetov V.N.<sup>2</sup>, Stogov A.Y.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Ioffe Physical-Technical Institute of RAS, Russia

<sup>2</sup> The Institute for Electrophysics and Electric Power of RAS, Saint-Petersburg, Russia

## **The Economical High-Performance Dual-Channel Generator of Electrical Pulses for Pulsed Electro-Discharge Water Treatment**

The results of economical high-performance dual-channel generator of electric pulses for water treatment development and research are introduced. The designed dual-channel generator provides high reproducibility of the electro-discharge processes and effective electro-discharge water treatment and also provides aqueous dispersions of oxide and metal nanoparticles with required physical and chemical properties obtaining.

**Keywords:** dual-channel generator, pulsed electro-discharge water treatment.

Received June 20, 2012

УДК 533.17

**Братцев А.Н., Кузнецов В.А., Лернер А.С., Попов В.Е.,  
Субботин Д.И., Уфимцев А.А., Штенгель С.В.**

*Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, РФ*

## **Плазменная газификация отходов как метод экономии энергии**

Приведены результаты расчетного моделирования процесса плазменной газификации с использованием воздуха, водяного пара и углекислого газа в качестве плазмообразующего газа, а также экспериментальных показателей воздушно-плазменной газификации отходов древесины. Экспериментальные данные сравнены с расчетными. Показаны основные схемы организации процесса газификации отходов.

**Ключевые слова:** плазма, газификация древесины, синтез-газ.

Приведено результати розрахункового моделювання процесу плазмової газифікації з використанням повітря, водяної пари та вуглекислого газу як плазмоутворюючого газу, а також експериментальні показники повітряно-плазмової газифікації відходів деревини. Експериментальні дані порівняно з розрахунковими. Показано основні схеми організації процесу газифікації відходів.

**Ключові слова:** плазма, газифікація деревини, синтез-газ.

Ежегодно количество потребляемой энергии увеличивается в связи с ростом уровня жизни населения. В 2011 г. мировое потребление первичной энергии составило  $5,2 \cdot 10^{11}$  ГДж [1], а объем произведенных отходов —  $(2,8-5,3) \cdot 10^9$  т [2, 3]. Твердые бытовые отходы, содержащие до 70 % бумаги, имеют теплоту сгорания 15–20 МДж/кг, использование которой позволит сэкономить до 20 % первичной энергии.

В настоящее время наиболее эффективен процесс сжигания газообразного топлива в комбинированном парогазовом цикле. Поэтому рационально проводить газификацию твердого топлива, при которой органическая часть его превращается в синтез-газ (газовую смесь водорода и монооксида углерода), а неорганическая в шлак. Синтез-газ также может применяться для производства водорода и в процессах химического синтеза.

По способу подвода тепла процесс газификации разделяют на автотермический и аллотермический. Автотермический процесс осуществляется за счет частичного сгорания сырья. При аллотермической газификации энергия вводится с внешним теплоносителем. Применение низкотемпературной плазмы в качестве теплоносителя является наиболее перспективным [4, 5], при этом она также может являться окислителем процесса. Использование низкотемпературной плазмы позволяет повысить температуру процесса, что приводит к ускорению химических реакций, увеличению удельного выхода химической энергии и концентраций горючих компонентов в синтез-газе [6].

### Расчетное моделирование процесса

Для оценки показателей процесса газификации, был произведен расчет термодинамически равновесного состава газовой смеси при температуре 1500 К, атмосферном давлении и следующих допущениях:

1) неорганическая масса не участвует в химических реакциях и не является их катализатором;

2) энергозатраты на нагрев неорганической массы от 298 до 1500 К около 1,367 МДж/кг;

3) состав древесных отходов, %: С – 50,25; Н – 6,09; О – 43,35; N – 0,2; S – 0,1 (на сухое беззольное состояние). Зольность – 1 % (на сухое состояние), влажность – 20 % (мас.) (на рабочее состояние);

4) массовый состав воздуха, %: N<sub>2</sub> – 74,43; O<sub>2</sub> – 22,81; Ar – 1,27; CO<sub>2</sub> – 0,04; H<sub>2</sub>O – 1,45;

5) зависимость КПД комбинированного цикла от температуры при 1400–2000 К аппроксимирована полиномом [7]:

$$\eta = 0,133 + 4,3 \cdot 10^{-5} T + 2,6 \cdot 10^{-7} T^2 - 7,9 \cdot 10^{-11} T^3;$$

6) потенциально достижимый удельный выход жидких топлив рассчитывался, исходя из объемного соотношения:

если  $H_2/CO \geq 2$ , то

$$G_{SF} = G_{SG,d} \chi_{CO} \rho_{CH_2};$$

если  $H_2/CO < 2$ , то

$$G_{SF} = G_{SG,d} (\chi_{H_2} + \chi_{CO}) \rho_{CH_2}/3,$$

где  $G_{SF}$  – выход жидкого топлива, кг/кг;  $G_{SG,d}$  – выход сухого синтез-газа, нм<sup>3</sup>/кг;  $\chi_{CO}$  – объемная доля CO в синтез-газе;  $\rho_{CH_2}$  – плотность (при 25 °С и 101,3 кПа) условного газа с химической формулой –CH<sub>2</sub>–, кг/м<sup>3</sup>.

Расчетная зависимость состава синтез-газа от энергозатрат приведена на рис.1 при использовании в качестве плазмообразующего газа воздуха, водяного пара и CO<sub>2</sub>.

При использовании воздушной плазмы увеличение удельных энергозатрат способствует увеличению концентрации горючих газов. При этом доля побочных компонентов N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> снижается. При использовании паровой плазмы и CO<sub>2</sub>-плазмы наблюдается обратная ситуация. Это связано с затратами энергии на покрытие эндотермического эффекта процесса газификации, а также на разложение молекул пассивных окислителей.

Расчетная зависимость расхода плазмообразующего газа, удельного выхода химической энергии, удельного выхода электроэнергии при использовании комбинированного цикла и вы-

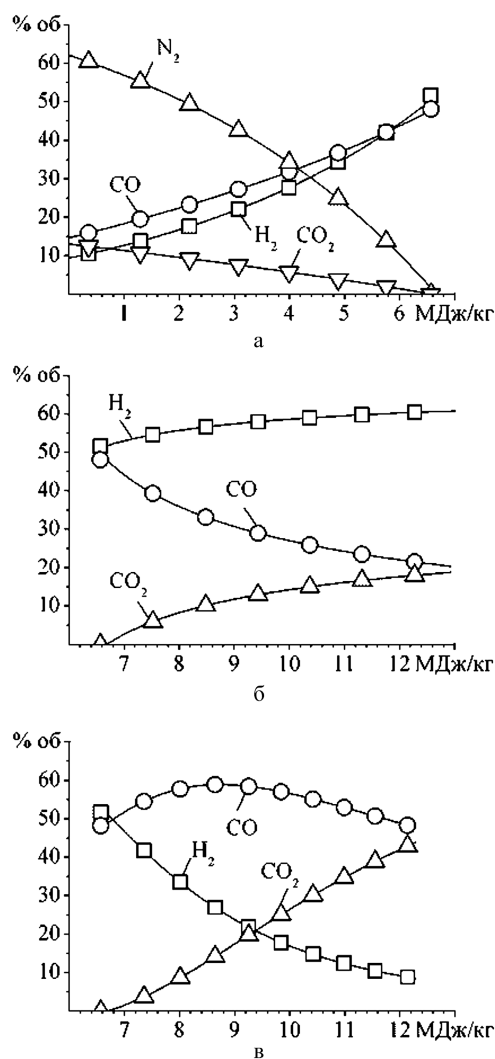


Рис.1. Зависимость состава синтез-газа от энергозатрат: а – воздух; б – водяной пар; в – CO<sub>2</sub>.

хода жидких топлив от энергозатрат показана на рис.2.

Величина энергозатрат около 6,57 МДж/кг для всех окислителей соответствует режиму пиролиза, то есть режиму, при котором расход окислителя равен нулю.

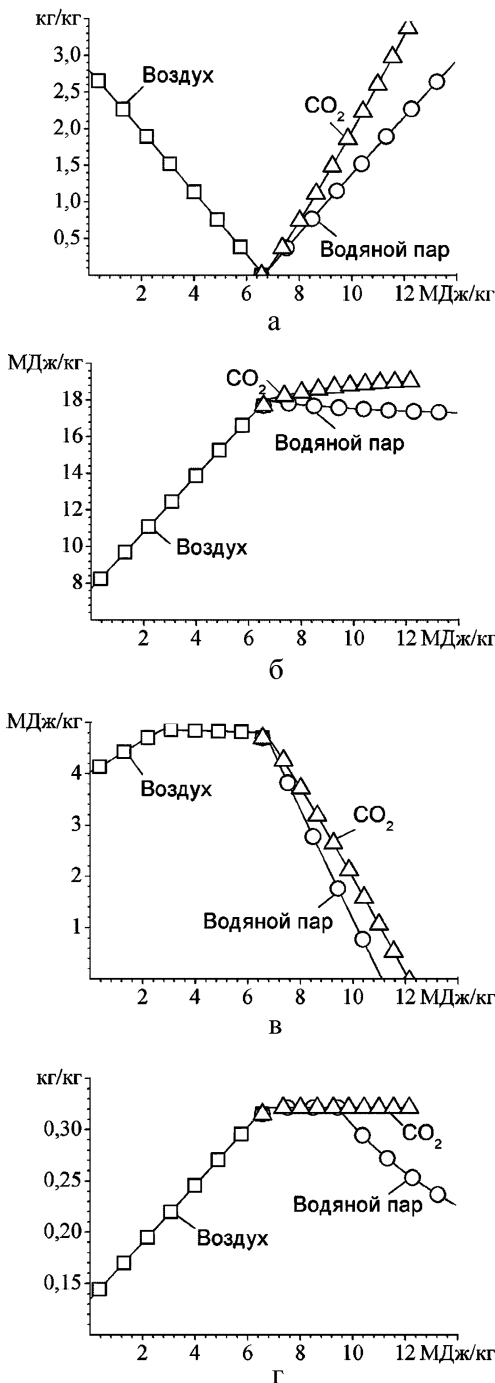


Рис.2. Зависимость от энергозатрат: а — расхода плазмообразующего газа; б — выхода химической энергии; в — электроэнергии; г — выхода жидких топлив.

Различные тенденции изменения состава связаны с внесением с окислителем в газовую смесь разных элементов. Так, при воздушно-плазменной газификации концентрация элементов N и O в газовой смеси увеличивается, при паро-плазменной газификации повышается содержание элементов H и O, при использовании CO<sub>2</sub>-плазмы — C и O. Объемное соотношение H<sub>2</sub>/CO при применении воздушной плазмы меняется в диапазонах 0,64–1,07, паровой плазмы — 1,07–3,65, CO<sub>2</sub>-плазмы — 0,18–1,07.

Наибольший выход химической энергии достигается вблизи режима пиролиза. При воздушно-плазменной и CO<sub>2</sub>-плазменной газификации выход химической энергии повышается с увеличением энергозатрат, а при использовании паровой плазмы снижается. Такой эффект связан со смещением равновесия в сторону окисления водорода и восстановления диоксида углерода.

Видно, что при применении паровой плазмы и CO<sub>2</sub>-плазмы удельный выход электроэнергии снижается с увеличением энергозатрат. Следовательно, использование пассивных окислителей для получения электроэнергии из древесных отходов нецелесообразно.

Применение паровой плазмы и CO<sub>2</sub>-плазмы нерационально для получения жидких топлив, так как стоимость их существенно выше, чем при воздушно-плазменной газификации.

### Способы организации процесса газификации

По способу организации процесс газификации принято разделять на прямой, обратный, комбинированный, поперечный и в потоке окислителя. Процесс плазменной газификации может быть организован по этим схемам без их модернизации.

Обычно выделяют зону пиролиза, окислительную и восстановительную зоны. В зоне пиролиза происходит сушка топлива с частичным его разложением без доступа окислителя. Продуктом разложения топлива является углеводородная смесь сложного состава — от метана до пирена. В окислительной зоне достигается наивысшая температура за счет ввода в нее окислителя, при этом происходит окисление топлива до CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O. Восстановительная зона характеризуется восстановлением CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O до H<sub>2</sub> и CO.

Процесс газификации по прямой схеме позволяет использовать тепловую энергию газа для сушки сырья. Горячая газовая смесь из зоны окисления поднимается в зону пиролиза, при этом ускоряются сушка и пиролиз сырья. Однако испаренная влага и продукты пиролиза не попадают в зону восстановления и окисления. При этом не тратится энергия на нагрев

влаги, а синтез-газ будет содержать большое количество смол.

### Сравнение результатов по воздушно-плазменной газификации отходов древесины

Параметр	Режим I	Режим II
Энергозатраты, МДж/кг	3,1/3,1	2,2/2,2
Расход воздуха, кг/кг	1,2/1,2	1,4/1,4
Выход синтез-газа, нм <sup>3</sup> /кг	2,4/2,2	2,5/2,3
Состав синтез-газа, % (об.):		
H <sub>2</sub>	32,2/27,2	28,0/24,7
CO	26,1/29,3	23,6/25,6
N <sub>2</sub>	33,4/35,8	38,2/40,1
CO <sub>2</sub>	7,6/7,2	9,3/9,0
остальное	0,7/0,5	0,9/0,6
Выход химической энергии, МДж/кг	14,7/13,5	13,5/12,7

*Примечание.* В числителе — экспериментальные значения, в знаменателе — расчетные.

При организации процесса по обращенной схеме все продукты пиролиза поступают в высокотемпературную окислительную зону, где происходит их разложение, поэтому количество смол при такой организации процесса значительно меньше. Затем в зоне восстановления H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> реагируют с твердыми продуктами пиролиза. Эти реакции являются эндотермическими, поэтому в восстановительной зоне необходимо поддерживать высокую температуру. Применение плазмы как окислителя процесса способствует увеличению скорости реакций восстановления, что приводит к более полному протеканию процесса.

Газификация по комбинированной схеме является более совершенной схемой, чем обращенная. В ней осуществляется дополнительный ввод окислителя в нижнюю зону, где происходит взаимодействие остаточного углерода с плазмой. Это способствует повышению температурного профиля в восстановительной зоне.

Процесс поперечной газификации характеризуется расположением ввода окислителя и вывода синтез-газа в горизонтальной плоскости на одном уровне. При этом одна часть продуктов пиролиза попадает в окислительную зону, а другая в восстановительную. Эти зоны являются высокотемпературными, следовательно, содержание смол в синтез-газе будет низким. Однако объем этих зон небольшой, что приводит к неполному восстановлению CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O и, как следствие, к их высокому содержанию в синтез-газе.

При организации процесса газификации в потоке окислителя совпадают направления ввода плазмы и вывода синтез-газа. В зоне окисления происходит сушка сырья и его частичное разложение. Зона восстановления характеризу-

ется малым временем пребывания твердой фазы, достижение высоких температур обеспечивается за счет избыточной подачи окислителя. Применение плазмы позволяет добиться высоких температур без избыточного ее количества. Энергоэффективность такой организации процесса существенно ниже, чем обращенной.

Исходя из вышесказанного, целесообразно проводить процесс плазменной газификации по обращенной и комбинированной схемам.

### Результаты эксперимента по газификации отходов

На опытной установке в Институте электрофизики и электроэнергетики РАН была проведена серия экспериментов по воздушно-плазменной газификации отходов древесины. Разогрев реактора осуществлялся на древесном угле около 8 ч, затем проводилась газификация древесных отходов. Полученные результаты приведены в таблице.

Различия экспериментальных и расчетных значений связаны с взаимодействием водяного пара с CO при охлаждении синтез-газа, при этом повышается концентрация H<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>, что не учитывалось в расчетах. В целом полученные результаты сходятся удовлетворительно.

### Выводы

Применение плазмы в качестве окислителя процесса газификации позволяет повысить выход химической энергии синтез-газа. Наиболее подходящим окислителем процесса газификации древесных отходов является воздушная плазма, а использование паровой плазмы и CO<sub>2</sub>-плазмы нецелесообразно.

Обращенная и комбинированная схемы газификации являются наиболее эффективными.

### Список литературы

1. BP Statistical Review of World Energy // BP plc. — June 2012. — P. 46.
2. State of World Population 2011 // UNFPA. — 2011. — P. 132.
3. «OECD Environmental Data Compendium» — <http://www.oecd.org/dataoecd/22/59/41878217.xls> (05.05.2012)
4. Bratsev A.N., Popov V.E., Shtengel S.V., Rutberg A.Ph. Some aspects of development and creation of plasma technology for solid waste gasification // High Temperature Material Processes. — 2006. — Vol. 10, № 4. — P. 549.
5. Bratsev A.N., Kuznetsov V.A., Popov V.E. et al. Experimental development of methods on plasma gasification of coal as the basis for creation of liquid fuel technology // Ibid. — 2009. — Vol. 13, № 2. — P. 147.

6. Кузнецов В.А., Рутберг Ф.Г., Братцев А.Н. и др. Газификация отработанных автомобильных шин воздушно и паровой плазмой // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2011. — № 2. — С. 46–50.
7. Ishikawa M., Terauchi M., Komori T., Yasuraoka J. Development of High Efficiency Gas Turbine Combined Cycle Power Plant. Mitsubishi Heavy Industries // Ltd. Technical Review. — 2008. — Vol. 45, № 1. — P. 15

Поступила в редакцию 20.07.12

***Bratsev A.N., Kuznetsov V.A., Lerner A.S.,  
Popov V.E., Subbotin D.I., Ufimtsev A.A., Shtengel S.V.***

*The Institute for Electrophysics and Electric Power RAS, St.-Petersburg, Russia*

## **Plasma Gasification of Waste as Energy Saving Method**

The results of numerical simulation of plasma gasification process with application of air, steam and carbon dioxide as plasma forming gas as well as experimental parameters of wood waste air-plasma gasification are presented. The experimental data are compared with the calculated data. The main schemes of waste gasification process are displayed.

**Key words:** plasma, gasification of wood, syngas.

Received July 20, 2012

УДК 536.7:519.85

***Директор Л.Б., Майков И.Л., Иванин О.А.***  
*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, РФ*

## **Задача оптимизации автономных энергетических комплексов в составе локальных распределительных сетей**

Рассмотрены проблемы энергетической оптимизации и управления автономными энергетическими комплексами малой энергетики, в состав которых входят разнотипные генерирующие установки и накопители энергии. Разработана математическая модель обобщенного энергокомплекса. Предложен подход к построению интеллектуальной системы управления. Представлены результаты стендовых испытаний макета адаптивной системы управления энергокомплексом.

**Ключевые слова:** малая энергетика, автономные энергетические комплексы, распределенная генерация, интеллектуальные системы управления.

Розглянуто проблеми енергетичної оптимізації та управління автономними енергетичними комплексами малої енергетики, до складу яких належать різнотипні генеруючі установки та накопичувачі енергії. Розроблено математичну модель узагальненого енергокомплексу. Запропоновано підхід до побудови інтелектуальної системи управління. Представлено результати стендових випробувань макету адаптивної системи управління енергокомплексом.

**Ключові слова:** мала енергетика, автономні енергетичні комплекси, розподілена генерація, інтелектуальні системи управління.