

## Плазменная конверсия биоэтанола в сухой синтез-газ

**Жовтянский В.А.<sup>1</sup>, Дудник А.Н.<sup>2</sup>, Невзгляд И.О.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт газа НАН Украины, Киев

<sup>2</sup> Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев

Создана и испытана установка для исследований плазменной конверсии раствора биоэтанола в сухой синтез-газ с объемным содержанием водорода от 66,8 до 68,2 % и химическим КПД конверсии до 74,8 %. Производительность установки по сухому синтез-газу составила 0,23–0,5 м<sup>3</sup>/ч. Разработана и апробирована методика определения эффективности этого процесса. Определены зависимости производительности установки от параметров работы плазмотрона, расхода электрической энергии на получение синтез-газа и чистого водорода, а также экономические показатели процесса конверсии.

**Ключевые слова:** альтернативные топлива, биоэтанол, плазменная конверсия, плазмотрон, синтез-газ, водород.

Створено та випробувано установку для досліджень плазмової конверсії розчину біоетанолу в сухий синтез-газ із об'ємним вмістом водню від 66,8 до 68,2 % та хімічним ККД конверсії до 74,8 %. Продуктивність установки за сухим синтез-газом склала 0,23–0,5 м<sup>3</sup>/год. Розроблено та апробовано методику визначення ефективності цього процесу. Визначено залежності продуктивності установки від параметрів роботи плазмотрона, витрат електричної енергії на отримання синтез-газу та чистого водню, а також економічні показники процесу конверсії.

**Ключові слова:** альтернативні палива, біоетанол, плазмова конверсія, плазмотрон, синтез-газ, водень.

В 1997 г. в Программе государственной поддержки развития нетрадиционных и возобновляемых источников энергии и малой гидро- и теплоэнергетики [1] было показано, что наибольшим ресурсом для экономии традиционных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в Украине является использование альтернативных топлив. По выполненному тогда прогнозу на 2010 г., этот показатель составлял 20,03 млн т у. т./год, или 50 % общей экономии за счет всех источников, включенных в Программу. Об особой важности этого ресурса для развития национальной экономики свидетельствовало также принятие специального Закона Украины «Об альтернативных видах жидкого и газового топлива» в 2000 г. Прошлогодними изменениями в упомянутом Законе (согласно которым он принял название «Об альтернативных видах топлива») предусмотрено существенное расширение использования биологических видов топлива (твердых, жидких и газовых), изготовленных из биологически возобновляемого сырья (биомассы).

Современные технологии продуцирования альтернативных топлив позволяют существенным образом расширить сырьевую базу для их

производства. Например, в настоящее время для этих целей все более широкое применение находят плазменные технологии [2]. Они позволяют газифицировать даже наиболее низкокачественное углеродное сырье, а в случае опасных отходов — витрифицировать (остекловывать) твердые остатки переработки, получаемые к тому же в минимальном количестве (на уровне процентов от начальной массы), что позволяет безопасно хранить их в грунте или использовать в качестве строительного материала. Кроме того, за счет высоких температур, характерных для плазменной среды, возможна значительная интенсификация технологических процессов.

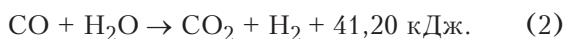
Плазменная газификация характеризуется тем, что необходимое для протекания процесса тепло вводится в систему, например, с водяной плазмой, а не за счет сжигания части газифицируемого топлива [3–5]. Обычно в качестве источника плазмы в этих технологиях применяются плазмотроны — устройства, генерирующие плазменную струю в потоке плазмообразующего газа [6]. Единичные мощности плазмотронов, используемых в промышленных технологиях, составляют сотни киловатт [4, 5], достигая да-

же уровня мегаватт [7]. Однако они достаточно сложны для обслуживания в составе применяемого оборудования, что вызывает значительные затруднения для их использования в исследовательских целях. Поэтому в предлагаемой работе для этой цели применен относительно маломощный плазмотрон серии «Мультиплаз», который в настоящее время освоен в серийном производстве. В этом плазмотроне в качестве плазмообразующего газа используются пары воды либо раствора этанола. Ранее он уже применялся нами для моделирования процессов плазменно-паровой конверсии углеродсодержащих материалов [8]. В предлагаемой работе он используется для исследования процессов непосредственной плазменной конверсии раствора биоэтанола.

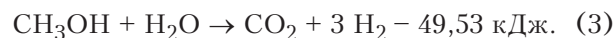
Процессы получения водорода уже исследовались в Институте газа НАНУ на основе разложения водного раствора метанола [9–11]. Содержательная часть этих исследований представлена только в работе [11], которая длительное время была засекреченной. Дело в том, что указанные исследования проводились с целью потенциального оснащения малых подводных лодок бесшумными источниками энергии на основе топливных элементов. В этом процессе доминирующими являются реакции собственно разложения метанола:



а также конверсии получаемого в этой реакции монооксида углерода с водяным паром:



В случае, если целевым продуктом реакции является водород, то целесообразно проводить реакцию (2) в полном объеме, причем суммарная реакция является эндотермической (реакции записаны для газовой фазы):

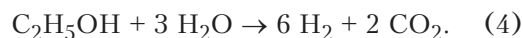


Для ее осуществления требуется подвод тепла извне. Автотермическое протекание процесса возможно только при добавлении к исходным веществам свободного кислорода, в частности, кислорода воздуха или пероксида водорода. Однако оно сопровождается снижением концентрации водорода в сухом газе от 75 % при чисто паровой конверсии до 67,2 % при паровоздушной и до 73,7 % при пероксидной. Это происходит за счет разбавления конвертированного газа продуктами полного окисления ( $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ ).

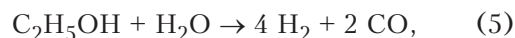
Экспериментальные исследования [11] проводились с применением цинк-хром-медного ка-

тализатора. Наблюдался быстрый рост образования водорода по мере возрастания температуры; для упомянутого катализатора основное превращение метанола в водород происходило в области температур 250–300 °С. При 320–330 °С наблюдалось его почти полное разложение. В случае стехиометрического соотношения метанол : пар получался газ следующего состава, % (об.):  $\text{H}_2$  – 65,9;  $\text{CO}_2$  – 17,3;  $\text{CO}$  – 7,0;  $\text{H}_2\text{O}$  – 8,4;  $\text{CH}_3\text{OH}$  – 1,4 % (давление  $p = 2,5$  атм). В дальнейшем осуществлялась принципиально необходимая для обеспечения работы топливного элемента очистка смеси от монооксида углерода посредством ее метанизации. В результате выполнения работы [11] разработана технологическая схема и основная аппаратура производительностью по водороду 180  $\text{nm}^3/\text{ч}$ .

В настоящее время активно изучаются процессы получения водорода из этанола. Они проводятся с точки зрения получения биоэтанола. Этанол также представляется лучшим выбором в качестве сырья для производства водорода по сравнению с метанолом, поскольку он менее токсичен, имеет более высокую температуру кипения и более низкую фотохимическую активность [12]. Исследования проводились в диапазоне температур 300–900 К с использованием катализаторов на основе Ni, Co, Pt, Al, Zr, Mg и Rh [13–18]. Весьма эффективными для данного процесса оказались катализаторы на основе никеля [14]. В основе процесса конверсии этанола при этом в области относительно невысоких температур находится реакция:



При высоких температурах (около 900 К) этанол газифицируется до  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$  [17]:



а для увеличения выхода водорода и уменьшения концентрации  $\text{CO}$  в дополнительном реакторе проводят реакцию сдвига водяного пара (2).

Подобно реакции (3) в целом процесс конверсии этанола также является эндотермическим. Как уже отмечалось, необходимая для протекания этого процесса энергия вводится в систему с плазмой. Интересны в этом отношении работы [19, 20], в которых для получения водорода применяется резко неравновесная плазма. В целом такие методы могут иметь значительные преимущества, если удастся организовать процесс таким образом, чтобы максимально селективно и эффективно использовать те или иные свойства разряда. Применительно к обсуждаемой проблеме предполагается использовать то обстоятельство, что химические связи

C–H, C–O и другие легко разрываются под воздействием электронов плазмы; при этом в неравновесном разряде удается существенно нагревать только электронную компоненту, не затрачивая энергию на разогрев балластной в этом отношении тяжелой компоненты плазмы.

В работе [19] для этих целей применена так называемая скользящая дуга — нестационарный разряд, развивающийся между двумя расходящимися электродами. Она создавалась с помощью импульсного напряжения около 20 кВ при частоте следования 50 Гц. При этом возбуждался импульсный ток в среде паров этанола амплитудой до 1 А. Выход по водороду в пересчете на сухой газ составил 72 %. Авторами отмечен недостаток конструкции плазменного реактора, который не позволял получать степень конверсии газовой смеси выше 40–45 %.

В работе [20] исследовались кинетические процессы, протекающие в плазме подобного нестационарного разряда в плазменно-жидкостной системе применительно к паро-плазменной конверсии раствора этанола. Показано, что в относительно небольших объемах микроразрядов в такой системе можно получать высокие концентрации водорода (около  $7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) при относительно небольших концентрациях диоксида углерода. Однако в настоящее время такие процессы ограничены небольшими объемами и соответственно малой производительностью реакционных объемов реакторов.

### Экспериментальная установка и методика проведения исследований

Принципиальная схема установки для получения синтез-газа с высоким содержанием водорода из раствора этанола показана на рис.1.

Основу конструкции плазмотрона представляет электродная система — конусный катод (медь-гафний) и полый анод, помещенные на расстоянии 0,35–0,45 см между собой вдоль оси разрядной трубки. Стенки трубки содержат пористый материал, используемый в качестве испарителя рабочей жидкости. Анод содержит центральное отверстие и выполняет также роль сопла. При зажигании дуги между электродами сопло разогревается, одновременно разогревая и активизируя работу испарителя. В нем рабочая жидкость превращается в пар с избыточным давлением 0,4–1,2 атм. Для заправки плазмотрона в качестве рабочей жидкости в наших экспериментах используется раствор этанола в дистиллированной воде при концентрации 60 % (об.). Предельной мощности плазмотрона 3,5 кВт соответствует предельное значение разрядного тока 9,5 А.

При работе плазмотрона могут использоваться аноды-сопла с различными диаметрами отверстий для вывода потока плазмы из рабочего объема плазмотрона в реактор. При уменьшении диаметра анода увеличивается острота «фокусировки» плазменной струи, что соответствует переходу от режима сварки к режиму резки в технологических применениях упомянутого плазмотрона. С точки зрения параметров плазмы это соответствует увеличению ее температуры и концентрации заряженной компоненты, а также скорости плазменной струи.

Перед началом экспериментов рабочий объем установки продувается защитным газом ( $\text{CO}_2$ ). После достижения стабильного режима работы плазмотрон закрепляется соплом вниз в верхней части корпуса реактора, а поток защитного газа замещается продуктами конверсии спирта, которые после зоны реагирования охлаждаются на стенках реактора, где происходит конденсация влаги, которая собирается в конденсатосборнике, а полученный синтез-газ направляется на фильтр для полного удаления влаги. Расход последнего определяется ротаметром, положение поплавка которого фиксируется WEB-камерой, подсоединенной к компьютеру. Далее сухой синтез-газ поступает в горелку для сжигания. На линии между ротаметром и горелкой отбираются пробы полученного газа для анализа состава с помощью хроматографа, который через интерфейс соединен с компьютером. Пики показаний хроматографа,

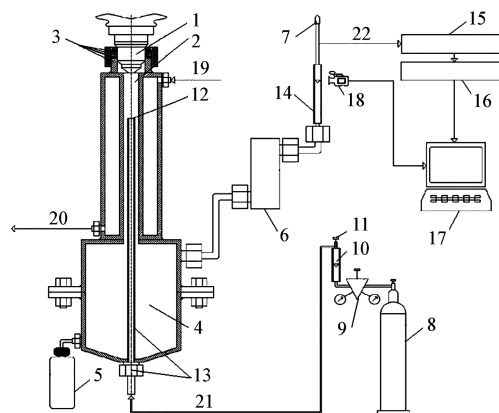


Рис.1. Принципиальная схема установки для получения синтез-газа из этанола: 1 — плазмотрон «Мультиплаз-3500»; 2 — реактор; 3 — модуль крепления плазмотрона; 4 — конденсатосборник; 5 — емкость для рабочей жидкости; 6 — фильтр; 7 — горелка; 8 — баллон защитного газа; 9 — редуктор; 10, 14 — ротаметры; 11 — игольчатый клапан; 12 — выход защитного газа в зону реагирования; 13 — модуль ввода защитного газа; 15 — хроматограф; 16 — интерфейс; 17 — компьютер; 18 — WEB-камера; 19 — вход охлаждающей воды; 20 — выход охлаждающей воды; 21 — вход защитного газа; 22 — отбор проб.

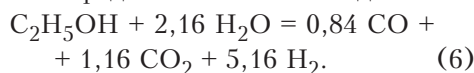
соответствующие уровню концентраций тех или иных полученных газов, выводятся на монитор компьютера. Таким образом, в компьютере фиксируются расход полученного синтез-газа и его состав. После полного использования раствора этанола плазматрон выключается, а зона реагирования замещается защитным газом.

В процессе проведения экспериментальных исследований постепенно изменялась электрическая мощность плазматрона. Исследовалось изменение расхода и состава полученного сухого синтез-газа в зависимости от электрической мощности плазматрона при использовании анодов-сопел с отверстиями диаметром 2,1 и 2,4 мм для прохождения плазменной струи.

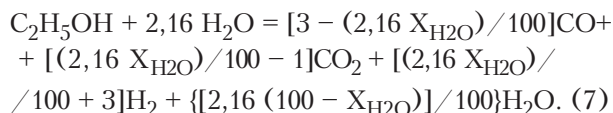
С помощью приведенных ниже методик оценивается степень использования воды раствора этилового спирта в плазматроне, определяется состав влажного синтез-газа на выходе из сопла плазматрона, тепловая мощность установки (по этанолу и полученному синтез-газу), химический КПД конверсии этанола в синтез-газ с учетом электрической мощности плазматрона и расхода электроэнергии для получения 1  $\text{нм}^3$  влажного синтез-газа.

#### Методики оценки полученных данных

При нормальных условиях плотность этанола составляет 0,789  $\text{г}/\text{см}^3$ , дистиллированной воды — 0,998  $\text{г}/\text{см}^3$ . С учетом плотности массовые концентрации этанола и воды в 60 %-м растворе составляют 54,21 и 45,79 % (мас.) соответственно. Молекулярная масса  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  — 46,07  $\text{г}/\text{моль}$ , а  $\text{H}_2\text{O}$  — 18,01  $\text{г}/\text{моль}$ . Следовательно, их мольное соотношение в исходном растворе  $\text{H}_2\text{O} : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 2,16$ . При этом соотношении брутто-процесс конверсии раствора этанола можно представить в таком виде:



В случае неполного использования водяного пара выражение для этой реакции может быть обобщено через степень использования водяного пара, %:



Для дальнейшего определения КПД установки примем, что теплота сгорания этанола в пересчете на концентрацию его раствора 60 % (об.) составляет  $Q_{\text{es}} = 13,64$   $\text{МДж}/\text{кг}$  [21], а теплота сгорания сухого синтез-газа может быть представлена в виде,  $\text{МДж}/\text{нм}^3$ :

$$Q_1^d = (C_{\text{CO}} Q_1^d_{\text{CO}} + C_{\text{H}_2} Q_1^d_{\text{H}_2}) / 100, \quad (8)$$

где  $Q_1^d_{\text{CO}}$ ,  $Q_1^d_{\text{H}_2}$  — низшие теплоты сгорания монооксида углерода и водорода,  $\text{МДж}/\text{нм}^3$ ; коэффициенты  $C$  обозначают их процентное содержание согласно нижним индексам.

Химический КПД конверсии спирта в сухой синтез-газ с учетом электрической мощности плазматрона можно представить в таком виде:

$$H_{\text{ch}} = W_{\text{sg}} / (W_{\text{es}} + W_{\text{pl}}), \quad (9)$$

где  $W_{\text{sg}}$  — тепловая мощность установки по синтез-газу, Вт,  $W_{\text{sg}} = Q_1^d \cdot V_{\text{sg}}$  ( $V_{\text{sg}}$  — расход сухого синтез-газа,  $\text{нм}^3/\text{с}$ );  $W_{\text{es}}$  — тепловая мощность установки по этанолу, Вт;  $W_{\text{es}} = Q_{\text{es}} M_{\text{es}}$  ( $M_{\text{es}}$  — его массовый расход,  $\text{кг}/\text{с}$ );  $W_{\text{pl}}$  — электрическая мощность плазматрона, Вт.

Расчеты для получения равновесного состава продуктов плазменной конверсии раствора этанола проводились с помощью программы «TERRA» [22], предназначенной для расчета произвольных систем с химическими и фазовыми превращениями. Она связана с большой базой данных свойств индивидуальных веществ, что делает ее пригодной для исследования произвольных по химическому составу соединений. В принятых допущениях состояние исследуемой системы определяется лишь содержанием в ней химических элементов и значением двух параметров состояния (например, температуры и давления).

#### Результаты исследований и их обсуждение

Результаты расчетов равновесных концентраций продуктов плазменной конверсии 60 % (об.) раствора этанола в зависимости от температуры, выполненные с помощью программы «TERRA», представлены на рис.2. В дальнейшем они используются для сопоставления с экспериментальными данными.

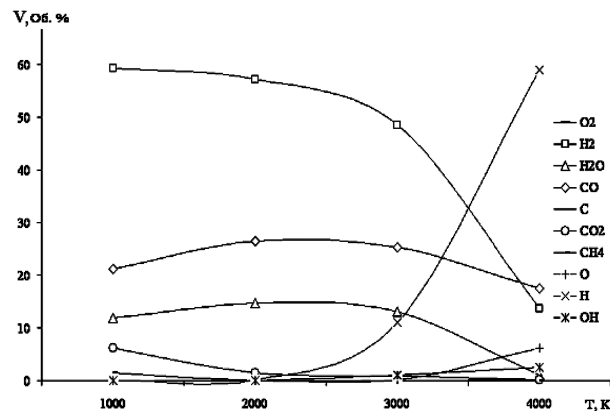


Рис.2. Зависимость равновесных концентраций продуктов плазменной конверсии раствора этанола концентрацией 60 % (об.) от температуры.



Эксперименты проводились в диапазоне электрической мощности плазматрона от 0,48 до 1,3 кВт. С увеличением электрической мощности плазматрона наблюдалось увеличение производительности установки по сухому синтез-газу от 0,25 до 0,41  $\text{м}^3/\text{ч}$  с использованием сопла анода с отверстием диаметром 2,1 мм и от 0,23 до 0,50  $\text{м}^3/\text{ч}$ , если диаметр отверстия был 2,4 мм. Увеличивался также расход раствора этанола: от 0,16 до 0,25  $\text{кг}/\text{ч}$  и от 0,14 до 0,30  $\text{кг}/\text{ч}$  соответственно. Степень использования водяного пара, фигурирующая в формуле (7), изменялась в диапазонах от 47,5 до 60,1 % и от 47,5 до 56,8 % соответственно.

В составе сухого синтез-газа концентрации компонент изменялись в пределах, % (об.):  $\text{H}_2$  — от 66,8 до 68,2,  $\text{CO}$  — от 27,0 до 32,7,  $\text{CO}_2$  — от 0,45 до 4,7. Объемное содержание водяного пара во влажном синтез-газе менялось от 12,0 до 15,8 %.

На рис.3,а показаны зависимость производительности установки по сухому синтез-газу и расход раствора этанола от электрической мощности плазматрона для анода с отверстием диаметром 2,1 мм, а на рис.3,б — аналогичная зависимость тепловой мощности установки относительно синтез-газа и этанола. Из последнего рисунка видно, что благодаря термохимической плазменной газификации раствора этанола в синтез-газ дополнительно переходит 31,4–32,3 % энергии (по отношению к химической энергии этанола). В этом случае состав сухого синтез-газа изменялся в таких пределах, % (об.):  $\text{H}_2$  — 66,8–68,2;  $\text{CO}$  — 27,0–32,7;  $\text{CO}_2$  — 0,45–4,73, а содержание водяного пара в полученном на выходе из плазматрона влажном синтез-газе составляло от 12,0 до 15,8 % (об.). Степень использования водяного пара в целом составила 47,5–60,1 %.

Сопоставляя полученный состав синтез-газа с расчетными данными на рис.2, можно прийти к выводу, что он соответствует области температур 1300–2500 К зависимо от электрической мощности плазматрона. При этом факт частичного наличия водяного пара является принципиально неустранимым, так как пар входит в число равновесных продуктов реакции в отмеченной области температур. Это несколько снижает эффективность установки, учитывая необходимость затрат тепловой энергии на его производство.

Можно предположить, что в начале в канале плазматрона происходит конверсия раствора этанола при характерной для плазмы температуре ~ 7000 К; по мере вытекания струи через сопло и ее захлаживания на первой стадии — при высоких температурах, где константы скоростей элементарных реакций велики — система отслеживает равновесный состав продуктов конверсии (двигаясь из области высоких температур на рис.2 в сторону их уменьшения). Затем по мере охлаждения скорости реакций становятся недостаточными для «отслеживания» фактических значений температур в струе; фиксированный нами состав продуктов конверсии отражает именно эту область температур. Следует специально заметить, что при температуре 2000–2500 К в составе продуктов реакции исчезает также атомарный водород (см. рис.2), имеющий решающее влияние на скорость протекания реакций конверсии этанола в плазменной области параметров [20]. Это обстоятельство также может быть определяющим с точки зрения замедления скорости реакций при упомянутых температурах. Однако количественные оценки роли упомянутых процессов выходят за пределы этой публикации.

На рис.3,в показана зависимость химического КПД конверсии раствора этанола в син-

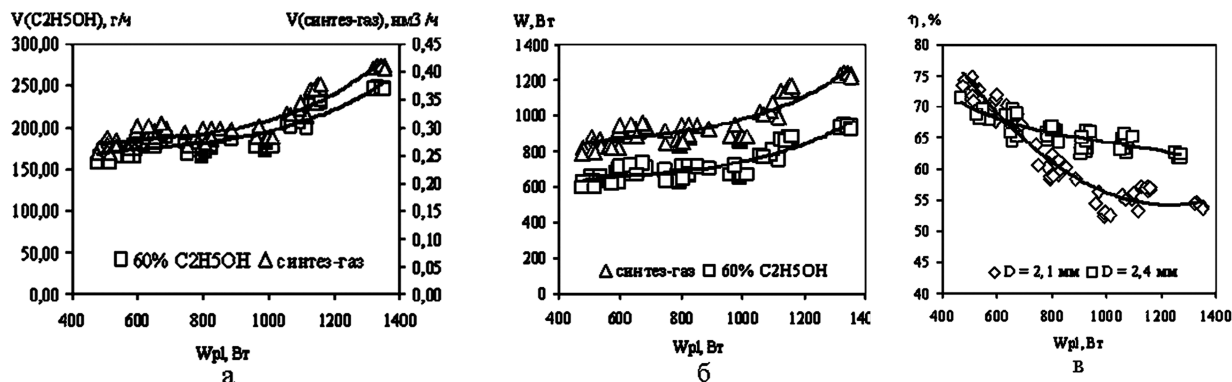


Рис.3. Зависимость показателей производительности и эффективности установки для плазменной конверсии раствора этанола от электрической мощности плазматрона: расхода полученного сухого синтез-газа и расхода 60 %-го раствора спирта (а) и тепловой мощности установки относительно этанола и синтеза-газа (б) для анода с отверстием диаметром 2,1 мм, а также химического КПД установки в случае использования анодов с отверстиями диаметром 2,1 и 2,4 мм (в).

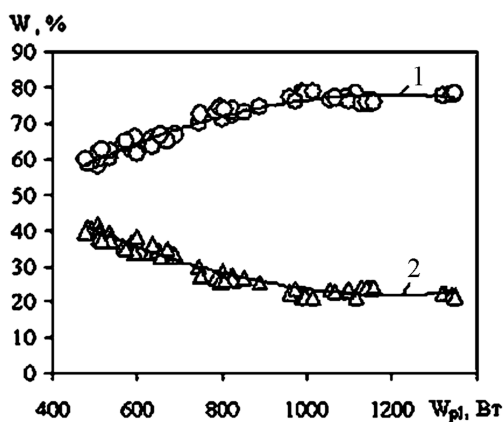


Рис.4. Перераспределение энергии плазменной струи  $W$  на тепловые потери на подогрев воды в охладителях (1) и на термохимическую регенерацию (2) при изменении мощности плазмотрона в процессе конверсии раствора этанола (анод с отверстием диаметром 2,1 мм).

тез-газ с учетом электрической мощности плазмотрона для упомянутого анода. Химический КПД установки изменялся при этом в диапазоне от 52,4 до 74,8 %. Уменьшению КПД при повышении мощности установки соответствует повышение доли затрат электрической энергии, используемой непродуктивно на тепловые потери, и, наоборот, снижению продуктивной ее части, затрачиваемой в процессе конверсии на термохимическую регенерацию (рис.4).

Аналогичный цикл исследований, проведенный с использованием сопла анода с отверстием диаметром 2,4 мм, также позволил определить зависимость химического КПД конверсии раствора спирта, который изменялся в этом случае в пределах от 61,8 % до 71,3 % (см. рис.3,в). При использовании этого анода состав сухого синтез-газа изменялся в процессе экспериментальных исследований в таком диапазоне, % (об.):  $H_2$  – 66,8–67,9;  $CO$  – 28,5–32,7;  $CO_2$  – 0,45–3,65. Содержание водяного пара в полученном на выходе из плазмотрона влажном синтез-газе составляло от 13,0 до 15,8 % (об.). Это соответствует использованию водяного пара на уровне 47,5–56,8 %, а по температурному диапазону реакции конверсии раствора этанола – около 1600–2500 К в зависимости от электрической мощности плазмотрона.

Из сравнения данных, представленных на рис.3,в, видно, что эффективность работы установки в диапазоне электрической мощности плазмотрона от 0,50 до 0,65 кВт является более высокой при использовании сопла с отверстием 2,1 мм, а в диапазоне от 0,65 до 1,30 кВт – при использовании сопла анода с отверстием 2,4 мм. Таким образом, с точки зрения эффективности процесса конверсии раствора этанола

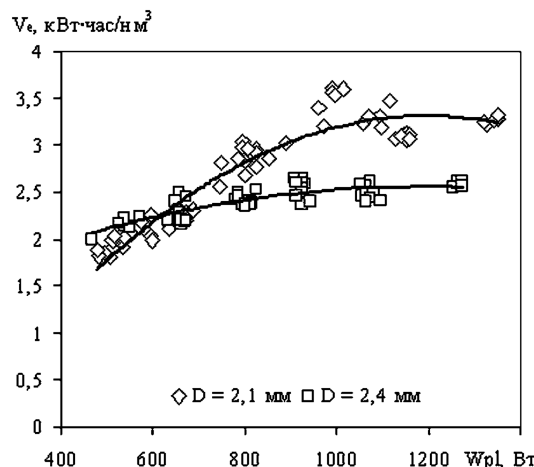


Рис.5. Зависимость расхода электрической энергии на производство 1 нм<sup>3</sup> влажного синтез-газа от электрической мощности плазмотрона в случае использования в плазмотроне анодов с отверстиями диаметром 2,1 и 2,4 мм.

более предпочтительными являются «мягкие» параметры плазмы.

Полученная совокупность данных позволяет также определить удельный расход электрической энергии на производство сухого синтез-газа, кВт·ч/нм<sup>3</sup>:

$$V_e = W_{pl} / (1000 V_{sg}^h), \quad (10)$$

где  $V_{sg}^h$  – расход влажного синтез-газа, нм<sup>3</sup>/ч.

Соответствующая зависимость представлена на рис.5.

Удельный расход электрической энергии зависит от параметров работы плазмотрона и составил 1,8–3,6 кВт·ч/нм<sup>3</sup>. Таким образом, при стоимости биоэтанола 3 грн/л (1 грн ≈ 0,125 долл.) с учетом затрат на электроэнергию из расчета 0,6 грн/кВт·ч затраты на ТЭР для получения водорода на установке составят от 2,7 до 4,7 грн/нм<sup>3</sup>. В таком варианте составляющая затрат на электроэнергию составляет от 31,5 до 48,0 %. Однако гораздо целесообразнее использовать в производственных целях потребление электроэнергии на основе дифференцированных по зонам суток тарифов. Ночной тарифный коэффициент в этом случае для трехзонного тарифа составляет 0,35. Это позволяет снизить затраты на ТЭР при получении водорода до 2,1–3,3 грн/нм<sup>3</sup>, а долю в них затрат на электроэнергию – до 13,8–24,4 %.

### Выводы

Исследован процесс плазменной конверсии раствора этанола. Разработанная экспериментальная установка на основе применения серийного маломощного плазмотрона имеет произво-

дительность по сухому синтез-газу до 0,5 нм<sup>3</sup>/ч при объемном содержании водорода около 68 %. Химический КПД плазменной конверсии спирта в установке составил до 75 %.

В случае комплектации установки дополнительным оборудованием (реакторы водяного сдвига и поглощения СО<sub>2</sub>) на установке можно будет получать водород с производительностью до 0,48 нм<sup>3</sup>/ч. Достоинством плазменной технологии в предлагаемом варианте является простота конструкции, малые габариты реактора и высокая скорость протекания реакций конверсии.

*Выполнение этой работы поддержано Национальной академией наук Украины; проект 20-09 программы научных исследований «Фундаментальные проблемы водородной энергетики».*

### Список литературы

1. Програма державної підтримки розвитку нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії та малої гідро- і теплоенергетики : Схв. Постановою Каб. Міні. України від 31 грудня 1997 р. № 1505.
2. Патон Б.Е., Бондаренко Б.И., Жовтянский В.А. Новый источник возобновляемой энергии — твердые бытовые отходы // Проблемы развития энергетики : Погляд громадськості // Зб. доп. № 6 / Ред. кол. О.С. Дупак., В.В.Афонін, Є.Т.Базеев та ін. — Київ : НТСЕУ, 2009. — С. 249–253.
3. Жовтянский В.А. Электрическая дуга — основа теплотехнических применений плазмы. Ч. 1. Общие свойства электродуговой плазмы и особенности процессов теплопереноса // Пром. теплотехника. — 2007. — Т. 29, № 4. — С. 13–22.
4. Chernets O.V., Korzyk V.M., Marynsky G.S. et al. Electric arc steam plasma conversion of medicine waste and carbon containing materials // XVII Intern. Conf. on Gas Discharges and Their Appl. Intern. Proc. (Cardiff, Wales, 7–12 Sept. 2008). — Cardiff : Cardiff University, 2008. — P. 465–468.
5. Жовтянский В.А., Петров С.В., Коржик В.Н. и др. Установка для конверсии углеродсодержащих материалов // Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. «Энергоэффективность» (Киев, 6–8 окт. 2008 г.). — К. : Ин-т газа НАНУ, 2008. — С. 114–116.
6. Даутов Г.Ю., Дзюба В.Л., Карп И.Н. Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами. — К.: Наук. думка, 1984. — 168 с.
7. Рутберг Ф.Г., Братцев А.Н., Попов В.Е. Плазмохимические методы переработки. Газификация и пиролиз отходов // Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под общ. ред. В.Е.Фортова. — Т. XI-5, серия Б: Прикладная химия плазмы / Под ред. Лебедева Ю.А., Платэ Н.А., Фортова В.Е. — М. : Янус-К, 2006. — С. 7–33.
8. Жовтянский В.А., Дудник А.Н. Плазменно-паровая конверсия высокозольного антрацита Донецкого угольного месторождения Украины // Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna «Efektywność Energetyczna 2009» (Krakow, 21–23 września 2009). — Krakow : Prace Instytutu Nafty i Gasu, 2009. — № 162. — S. 69–74.
9. Лукьянчиков В.С., Стеженский А.И. Получение водородсодержащего газа для топливных элементов (Реферат. обзор). — К. : Наук. думка, 1970. — 40 с.
10. Лукьянчиков В.С., Стеженский А.И. Паровая конверсия метанола. — К. : Наук. думка, 1972. — 40 с.
11. Лукьянчиков В.С. Исследование генерации водородсодержащего газа из метанола для топливных элементов : Автореф. дис.... канд. тех. наук. — Киев, 1973. — 158 с.
12. Базиле А., Галуччи Ф., Юлианелли А. Исследование Института мембранных технологий (Национальный научный центр Италии ITM-CNR) по получению водорода в мембранных технологиях // Мембраны / ВИНТИ: Серия. Критические технологии. — 2007. — № 2(34). — С. 3–21.
13. Лалин Н.В., Вяткин А.Ф., Редькин А.Н., Бежок В.С. Получение водорода каталитическим пиролизом этанола на никелевом катализаторе // Журн. физ. химии. — 2009. — Т. 83, № 11. — С. 2044–2048.
14. Huuhtanen M., Seelam P.K., Turpeinen E. et al. Hydrogen production by bio-ethanol reforming for small-scale fuel cell applications // Energy Research at the University of Oulu. — Oulu : Finland, 2009. — P. 24–27.
15. Valant A.L., Bion N., Epron F., Duprez D. Hydrogen production from raw bioethanol over a Rh/MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> catalyst // Catalysis Today. — 2008. — Vol. 138. — P. 169–174.
16. Song H., Zhang L., Ozkan U.S. Hydrogen production from bio-ethanol steam reforming over co based catalysts // 2009 Annual Merit Review and Peer Evaluation Report (Arlington, USA, may 2009).
17. Llorca J. Hydrogen production from bioethanol over structured reactors // VII Green Chem. Conf. (Barcelona, Spain, Nov. 2007).
18. Frusteri F., Freni S., Chiodo V. et al. Steam reforming of bio-ethanol on alkali doped Ni/MgO catalysts : Hydrogen production for MC Fuel Cell // Appl. catal. A: General. — 2004. — Vol. 270, № 1–2. — P. 1–7.
19. Khacef A., Ouni F., Ahmar E. et al Hydrogen generation from alkanes and alcohol by non-termal steam reforming // XXIX Meeting on Comb. (Pisa, June 14–17, 2007). — P. V12.1–V12.6.
20. Левко Д.С. Плазменная кинетика в электрическом разряде в смеси воздуха с парами этанола и воды : Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Киев, 2009. — 141 с.
21. Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. К.П.Мищенко, А.А.Равделя. — Л. : Химия, 1974. — 200 с.
22. Трусов Б.Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах : Программа для ЭВМ / МГТУ им. Н.Э. Баумана; РосАПО. — ГР. № 920054. — 1992.

Поступила в редакцию 13.04.10

## Bioethanol Plasma Conversion into Dry Synthesis-Gas

*Zhovtyansky V.A.<sup>1</sup>, Dudnyk O.M.<sup>2</sup>, Nevzglyad I.O.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *The Gas Institute of NASU, Kiev*

<sup>2</sup> *Coal Energy Technology Institute of NASU, Kiev*

The laboratory installation for bioethanol plasma conversion into dry synthesis-gas is designed and tested. The synthesis-gas volumetric content of hydrogen is ranged between 66,8 and 68,2 %. The installation conversion chemical efficiency is up to 74,8 %. The installation productivity by dry synthesis-gas is amounted 0,23–0,5 m<sup>3</sup>/h. The method of the process efficiency definition is developed and approved. The installation productivity depending on parameters of plasma torch operation is determined. Power consumption for synthesis-gas and pure hydrogen production as well as economical parameters of the conversion process are determined.

**Key words:** alternative fuels, bioethanol, steam plasma conversion, plasma torch, synthesis-gas, hydrogen.

Received April 13, 2010

УДК 622.612.52:622.612.51

## Методика и программа для расчета температуры горения природного газа

*Крушневич С.П.*

*Институт газа НАН Украины, Киев*

Представлена методика расчета температуры горения газовой смеси при заданных параметрах с учетом влияния диссоциации компонентов продуктов сгорания. На основе представленной методики разработана программа, позволяющая в удобной форме проводить расчеты температур горения, конечной температуры дымовых газов после их смешивания с избыточным воздухом и паром, которые подаются на охлаждение камеры сгорания.

**Ключевые слова:** адиабатическая температура горения, диссоциация, камера сгорания, ГТУ.

Представлено методику розрахунку температури горіння газової суміші при заданих параметрах з урахуванням впливу дисоціації компонентів продуктів згорання. На основі представленої методики розроблено програму, що дає змогу у зручній формі проводити розрахунки температур горіння, кінцевої температури димових газів після їх змішування з надлишковим повітрям та парою, що подаються на охолодження камери згорання.

**Ключові слова:** адіабатична температура горіння, дисоціація, камера згорання, ГТУ.

Анализ программ расчета температуры горения указывает на то, что одни из них обладают широким набором функций, но сложны в освоении, другие просты и доступны, но предназначены для расчета невысоких температур горения, характерных для топков котлов. Учитывая изложенное, автором разработана программа расчета температуры горения для смеси с заданным составом и параметрами, в том числе с учетом особенностей камер сгорания газотурбинных двигателей.

### Методика расчета температуры горения

Расчетное определение температуры горения конкретной смеси является достаточно сложной задачей, так как кроме состава смеси на температуру влияют ее начальное значение и давление. Увеличение температуры и давления исходных компонентов приводит к росту температуры горения. Теплообмен с окружающей средой и реакции диссоциации, наоборот, снижают температуру горения [1].