



Энергетический анализ производства кислорода



Георги ПАВЛОВ
Georgy M. PAVLOV

Галина ЧЕРНЕВА
Galina P. CHERNEVA



Радка ВАСЕВА
Radka C. VASEVA

Любомир СЕКУЛОВ
Lubomir S. SEKULOV



Чтобы оптимизировать использование кислорода в двигателях внутреннего сгорания, были исследованы разные показатели электролитической ячейки.

В качестве основного показателя эффективности и производительности принята плотность тока, проходящего через электролит. Эксперименты проведены при разных физических условиях, менявшихся давлении, температуре, расстоянии между электродами, а также концентрации электролитного раствора.

Выявлен показатель плотности, при котором достигается максимальный результат. Показано, что при повышении производительности ячейки ее эффективность уменьшается, поэтому при проектировании электролитических ячеек требуется оптимизация их геометрических размеров для соответствия критерию максимальной площади электродов и достижения необходимой плотности тока.

Ключевые слова: кислород, двигатель внутреннего сгорания, электролитическая ячейка, углеводородное топливо, энергетическая эффективность, энергопреобразующий блок, сохранение энергии.

Георги Митков Павлов – Ph.D., доцент кафедры «Электроснабжение и электрооборудование на транспорте» Высшего транспортного училища им. Т. Каблешкова (г. София, Болгария).

Галина Петкова Чернева – Ph.D., доцент кафедры «Электротехника и физика» ВТУ им. Т. Каблешкова.

Радка Кирилова Васева – инженер, аспирант кафедры «Электроснабжение и электрооборудование на транспорте» ВТУ им. Т. Каблешкова.

Любомир Симеонов Секулов – студент специальности «Электроэнергетика и электрооборудование» ВТУ им. Т. Каблешкова.

В последнее время стала актуальной тема использования воды как экологичного источника энергии после ее преобразования электролизом в кислород. Известен целый ряд методов получения водорода, но два из них применяются в основном для его промышленного производства: высокотемпературная переработка природного топлива и получение из воды электролизом. Несмотря на то что на современном этапе водородное производство связано, прежде всего, с первым методом, именно электролиз – технология будущего, поскольку вода практически неисчерпаемый природный источник.

Существующий сегодня принцип применения электрической энергии для раз-

ложения воды на водород и кислород определяет появление двух типов ячеек: топливных и электролитических.

Топливные элементы представляют собой одну из возможностей, которая разрабатывается и исследуется, но пока еще не нашла широкой поддержки. Основные причины этого – высокая себестоимость, более короткий срок эксплуатации и температурная зависимость топливных ячеек.

Электролитические ячейки дают две возможности: соответственно для производства чистого водорода и оксигидрогена. Производство оксигидрогена более доступно и дешево, чем получение чистого водорода. Кроме того, электролитические ячейки не так зависимы от температурных условий, да и срок их эксплуатации больше, чем у топливных элементов.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Применение оксигидрогена в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) осуществляется главным образом в двух направлениях:

- в виде добавки к воздушной смеси;
- в качестве полной замены конвенционального топлива.

Ныне преимущественно разрабатывается первая из этих возможностей из-за наличия многих неисследованных еще вопросов, связанных с заменой нефтяных топлив оксигидрогеном.

Цикл Отто, на котором основываются ДВС, определяет их термодинамическую эффективность. Она зависит от степени компрессии двигателя и коэффициента Пуассона нефтяных топлив и оценивается по формуле:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}}, \% \quad (1)$$

где: $\frac{V_1}{V_2}$ – компрессия;

$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ – коэффициент Пуассона как фактор изотропного расширения, показатель адиабаты;

η_{th} – теоретическая термодинамическая эффективность, %.

Чем больше компрессия и/или коэффициент Пуассона, тем ДВС эффективнее.

Коэффициент Пуассона связан с молекулярной структурой нефтяных топлив. Насколько она проще, настолько коэффициент больше. Для идеальных газов $\gamma = 1,6$, а для водорода и кислорода как двухатомных газов $\gamma = 1,4$, ибо смесь имеет более простую структуру и предполагает более высокую термодинамическую эффективность двигателя. Молекулярная структура топлив сложнее, и поэтому их коэффициент Пуассона ниже ($\gamma = 1,1-1,2$) [3]. Поэтому рассматриваются объемные пропорции кислорода по отношению к воздуху и оксигидрогену.

Возникает вопрос: какое количество энергии необходимо, чтобы получить единицу объема оксигидрогена?

Энергия, требуемая для разложения двух моль воды на оксигидроген при давлении 1 бар и постоянной температуре 298° К, вычисляется как:

$$W = P\Delta V = \frac{3 \times 101,3 \times 22,4 \times 298}{273} = 7430 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1}$$

Поскольку энтальпия определяется зависимостью

$$H = U + PV, \quad (3)$$

то изменение внутренней энергии U:

$$\Delta U = \Delta H - P\Delta V = 571,66 - 7,43 = 564,23 \text{ кДж} \cdot \text{л}^{-1} \quad (4)$$

Изменение внутренней энергии сопровождается расширением полученных газов. Поэтому можно сказать, что изменение энтальпии представляет собой энергию, необходимую для электролиза. Кроме того, необходимо, чтобы энергия полностью была электрической, так как энтропия увеличивается в процессе распада. Энергия TΔS может быть обеспечена за счет окружающей среды при температуре T. Энергия, производимая электроисточником, в сущности, есть изменение свободной энергии Гиббса:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S = 564,23 - 97,4 = 466,83 \text{ кДж} \text{ за два моля воды.} \quad (5)$$

Увеличение энтропии окружающей среды «помогает» процессу электролиза. Свободная энергия Гиббса в этом случае показывает, какое количество энергии в других формах надо получить, чтобы осуществить электролиз [3].

Полученное количество водорода и кислорода теоретически представляет:

– два моля водорода весом 4 г и объемом 44493,88 см³ при давлении 1 бар;



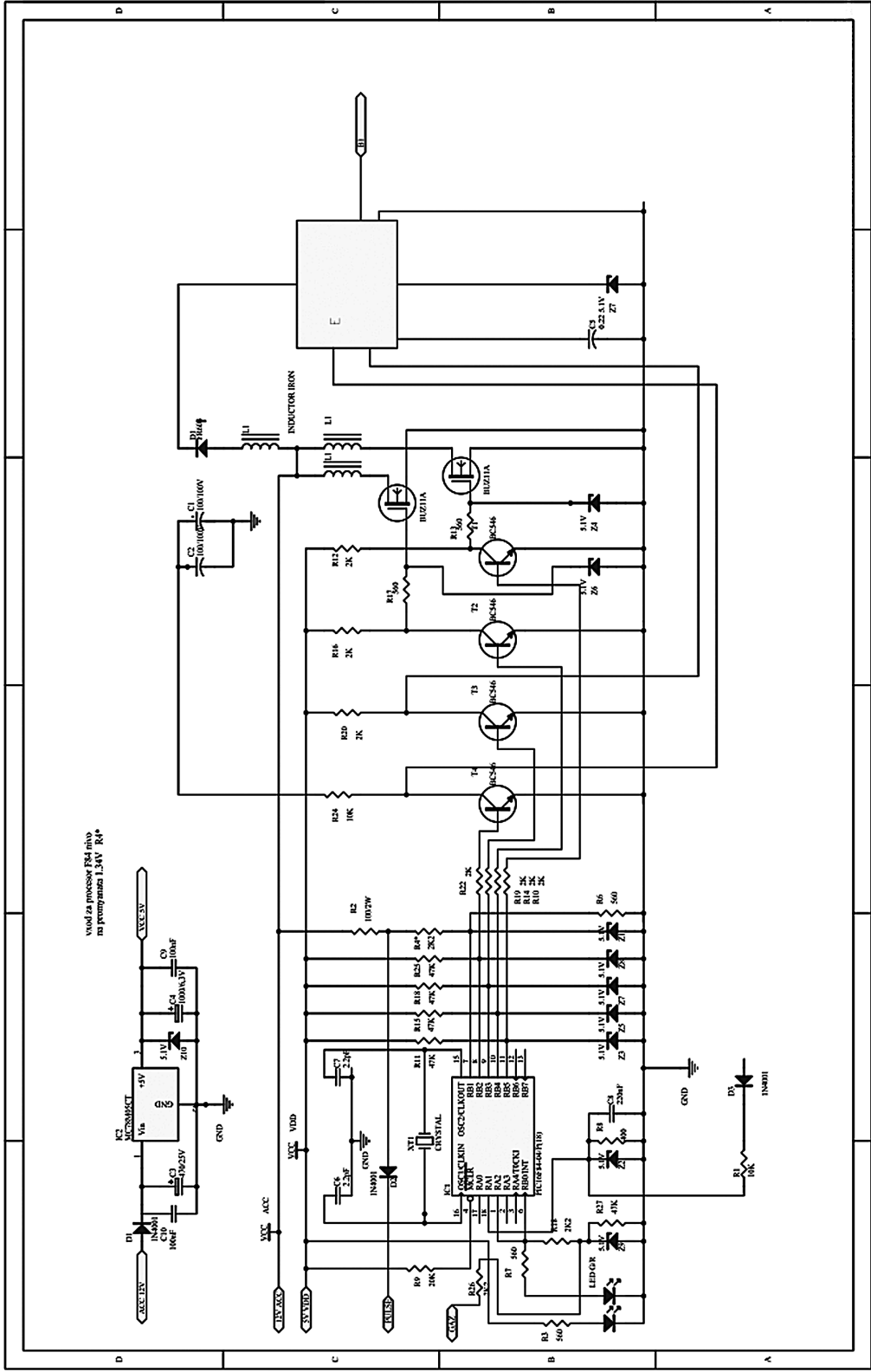


Рис. 1. Принципиальная схема импульсного питания.

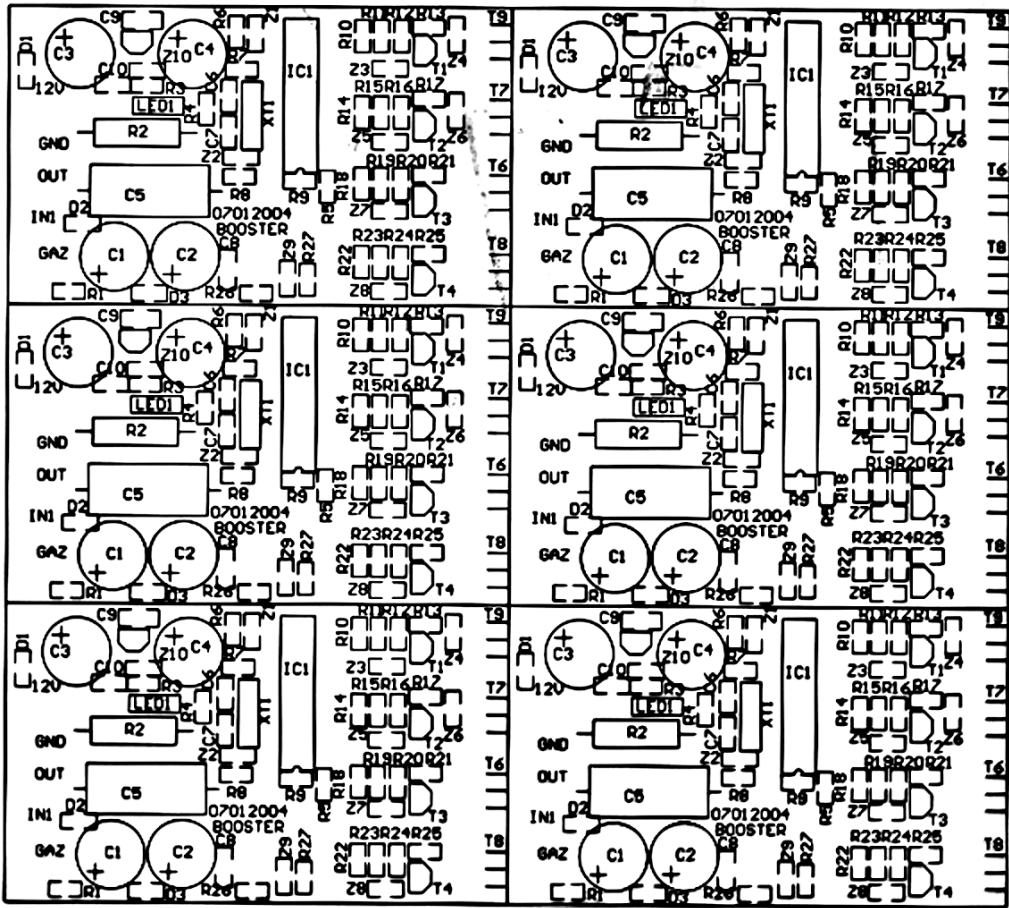


Рис. 2. Местонахождение электронных элементов на печатной плате.

— один моль кислорода весом 32 г и объемом 22387,96 см³ при давлении 1 бар.

Приведенный анализ поднимает следующие вопросы:

а) При каких условиях оксигидроген может замещать воздух как окислитель в ДВС с кривошипно-шатунным механизмом и эффективно ли это?

б) Возможна ли замена нефтяных топлив оксигидрогеном и при каких условиях?

Поскольку в качестве окислителя при ДВС используется воздух, то надо включить в анализ и количество азота, которое содержится в нем. Азот является основным компонентом воздуха (около 78% по объему). Отсюда следует, что 1 моль кислорода содержится в 4,762 моль воздуха.

Эффективный специфический расход конвенционального топлива при ДВС с теплообменником находится в интервале 10–30 cc/МДж. Он зависит от конструк-

тивных параметров двигателя, определяющих для него рабочую характеристику, связанную с цикловой подачей топлива и его минимальным эффективным расходом. В последующих вычислениях будет принято среднее значение 15 cc/МДж при эффективности двигателя 20% [5–7].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При построении опытов и определении условий испытаний использован первый закон Фарадея об электролитических процессах [1, 2]:

$$m = kIt,$$

где m — количество вещества;

$k = \frac{1}{FZ} A$ — коэффициент ($F=9,64867 \cdot 10^4$, С/моль — число Фарадея; A — атомное число; Z — валентность);

I — ток через электролит;

t — время.



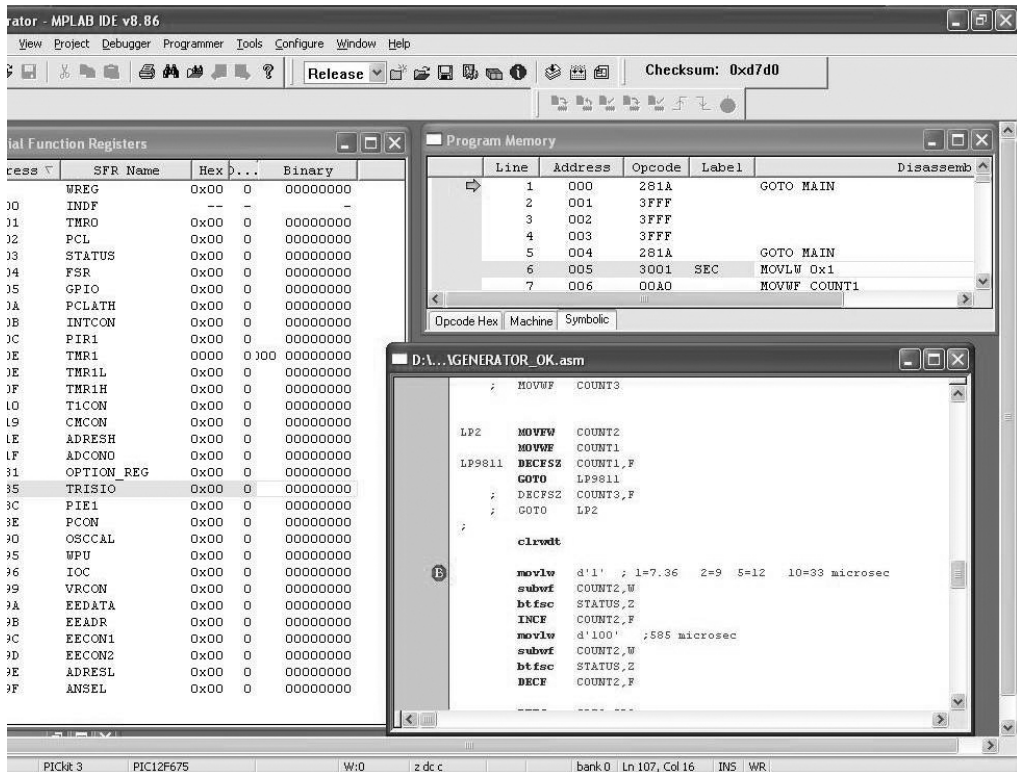


Рис. 3. Фрагмент организации программы.

2.1. Основные компоненты опытной постановки

Для выполнения испытаний спроектирована принципиальная схема импульсного питания, которая содержит: микропроцессор PIC 12F675/12F509, мощные IGBT транзисторы (биполярные транзисторы с изолированным затвором) и драйверы, импульсный трансформатор и мощные диоды Шоттки, а также стабилизированное питание к ним. Сделаны вычисления и разработан импульсный понижающий трансформатор с бифилярными обмотками

(на первичной и вторичной сторонах) и ферритным сердечником для большого выходящего тока в диапазоне частот от 10 до 200 кГц.

Подготовлено программное обеспечение (ПО) для микропроцессора PIC 12F675/12F509, который управляет мощными транзисторами через драйверы и регулирует ток посредством обратной связи, обеспечивая выходным напряжением. Программа обеспечивает работу программируемого микропроцессора как генератора прямоугольных импульсов с двумя выходными сигналами, которые дефазированы на 180 градусов, с коэффициентом заполнения 50%. Частота генератора задана в пределах от 10 до 500 кГц. Кроме того, включены защиты от входящего шума и появления программных неисправностей в целях предупреждения перегрузки транзисторов.

Микропроцессор работает с частотой циклов, обеспеченной внешним кварцевым осциллятором с частотой 4–20 МГц. Так получается плавное изменение показателей в диапазоне 10–300 кГц с шагом 2000 Гц. Программное обеспечение контролирует изменение уровня напряжения

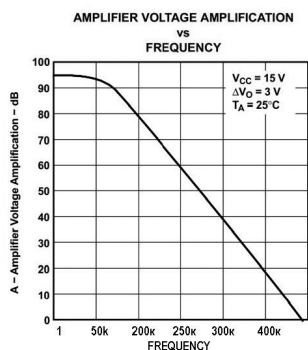


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления по напряжению от частоты.

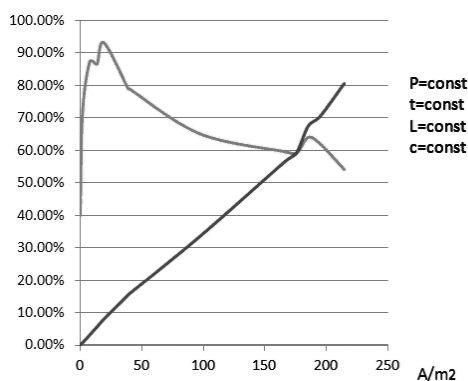


Рис. 5. Электролитическая ячейка (корпус и крышка).

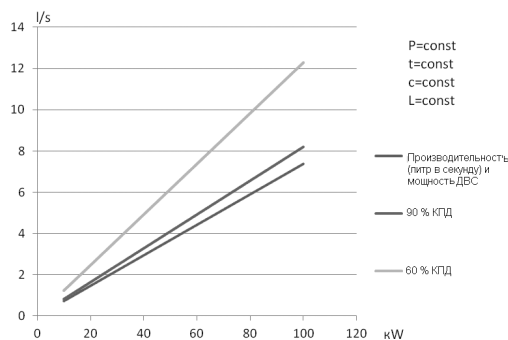


Рис. 6. Плотность тока и давление.

и при необходимости корректирует частоту генератора.

Сердечник трансформатора сделан из феррита типа 2008, причем выбор материала определяется выходным током и частотой.

Принципиальная схема импульсного питания показана на рис. 1.

В целях дальнейшего использования электронных компонентов и разработанного программного обеспечения (ПО) при исследовании разных по мощности электролитических ячеек была спроектирована печатная плата для модуля импульсного питания.

Местонахождение электронных элементов на разработанной плате демонстрирует рис. 2.

Электронная плата имеет размеры 50×100 мм, что делает ее удобной для подключения к другим устройствам.

Созданное ПО используется при программировании микроконтроллеров и соответствует спроектированной плате. На рис. 3 – фрагмент организации программы.

Зависимость коэффициента усиления по напряжению от частоты иллюстрирует рис. 4.

Электролитическая ячейка, спроектированная нами, изготовлена и исследована в заводских условиях. Крышка и корпус ячейки изображены на рис. 5.

2.2. Данные измерений

Измерения сделаны в следующей последовательности.

2.2.1. Плотность тока при изменении рабочего давления в объеме ячейки. Основная цель измерения – определить влияние давления на плотность тока (рис. 6).

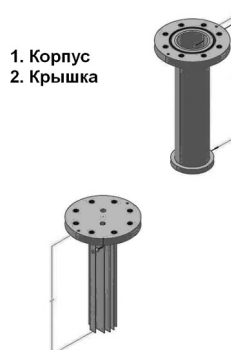


Рис. 7. Эффективность и производительность электролитической ячейки.

2.2.2. Определение эффективности электролитической ячейки при изменении плотности тока через электролит (рис. 7).

2.2.3. Определение необходимой производительности (литр в секунду) электролитической ячейки по отношению к мощности ДВС при постоянной температуре 298°К и давлении 1 бар, концентрации электролита и геометрических размерах клетки (рис. 8).

3. ВЫВОДЫ

Из проведенных исследований и показанных в графическом виде результатов следует:

1. Основной параметр, влияющий на производительность и эффективность ячейки, это плотность тока, проходящего через электролит. Максимальная эффективность достигается при плотности тока 3,5-7 А/м².

2. Объемное и энергетическое распределение при применении водорода (жидкого



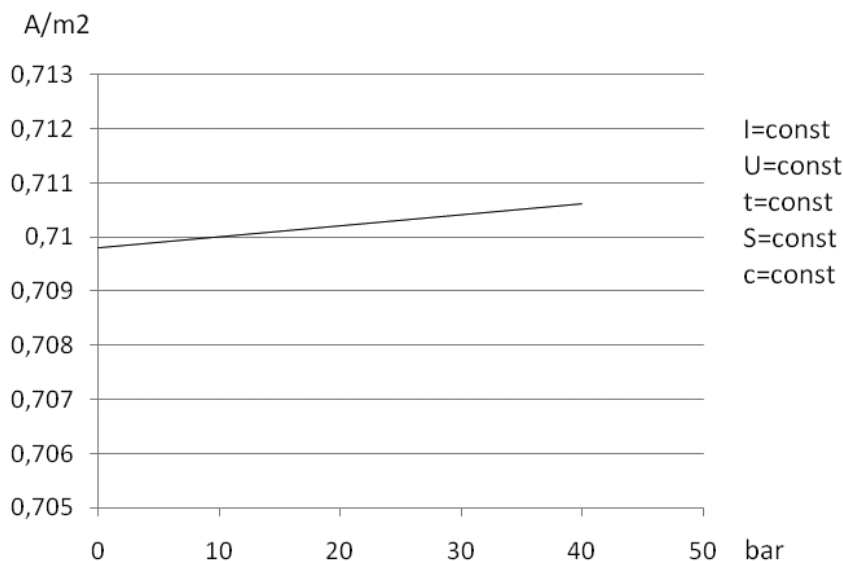


Рис. 8. Необходимая производительность и мощность ДВС.

водорода) в камере сгорания – около 3,7% общего ее объема, почти около 1% – для нефтяных топлив, 22,5% – для оксигидрогена, причем его компрессия максимально близка к критическим значениям. Это показывает, что данный энергетический носитель не может иметь прямого применения в качестве замены нефтяных топлив, он годится только в качестве окислителя при определенных условиях в автомобильных поршневых двигателях внутреннего сгорания с кривошипно-шатунным механизмом.

3. Как видно из показанной на рис. 8 необходимой производительности электролитической ячейки, на нынешнем этапе невозможно использование оксигидрогена в качестве полной замены конвенционального топлива, потому что это связано с большой энергоемкостью процесса производства электролитической ячейки.

4. При повышении производительности ячейки ее эффективность уменьшается (рис. 7). Поэтому при проектировании электролитических ячеек требуется оптимизация их геометрических размеров для соответствия критерию максимальной площади электродов. Таким способом можно достичь необходимой плотности тока.

5. Созданная электролитическая ячейка допускает эксплуатацию при дав-

лении 70 бар. Из сделанных измерений (рис. 6) видно, что производительность ячейки растет с увеличением давления. Отсюда следует, что оптимизация энергетической эффективности производства оксигидрогена должна быть ориентирована в этом направлении.

В ходе исследований и анализа производства оксигидрогена методом электролиза выявлено, что при определенных условиях трансформация электрической энергии относительно энергетической плотности газа могла бы приблизиться к 90%. Это показывает, насколько перспективно искать способы сохранения выделенной энергии и ее последующего применения в инновационных конструкциях двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Краснов К.С., Воробьев Н.К., Годнев И.Н. и др. Электрохимия. Химическая кинетика и катализ: кн.2 в: Физическая химия: Учебник для вузов: в 2 кн. под ред. К. С. Краснова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1995. – 318 с.
2. Пригожин И., Дефей Р. Химическая термодинамика. – Новосибирск: Наука (Сибирское отделение), 1966. – 502 с.
3. Димитров, Александър Василев. Съвременна топлотехника и енергетика. – София: ВТУ Тодор Каблешков, 2011. – 396 с.
4. Robertson, Scott. Compressed Air Power Secrets. 3d ed. 2009.
5. Секулов, Какачев. PCT/BG2011/000005. Метод за съхранение и използване на енергия. 2011 (Patent Cooperation Treaty).

6. Весенгириев М. И. Патент РФ RU2267622. Двигатель внутреннего сгорания, 2005.

7. Mosher, Edward G., Webster, John T. United States Patent 4023545. Energy means for internal combustion engines. 1977 (filed 1975).

8. Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies. Module 1. Hydrogen properties. College of Desert, CA. December 2001. Last retrieved 2013-02-17 at eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm01r0.pdf. ●

ENERGY ANALYSIS OF OXYHYDROGEN PRODUCTION

Pavlov, Georgy Mitkov – Ph.D., associate professor at the department of transport electric power supply and electric equipment of Todor Kableshkov Transport Higher School, Sofia, Bulgaria.

Cherneva, Galina Petkova – Ph.D., associate professor at the department of electrical engineering and physics of Todor Kableshkov Transport Higher School, Sofia, Bulgaria.

Vaseva, Radka Cyrillova – engineer, Ph.D. student at the department of transport electric power supply and electric equipment of Todor Kableshkov Transport Higher School, Sofia, Bulgaria.

Sekulov, Lubomir Simeonov – electric-power engineering student of Todor Kableshkov Transport Higher School, Sofia, Bulgaria.

In order to optimize the use of oxyhydrogen mixtures in internal combustion engines, various indices of the electrolytic cell conditions have been tested with regard to its physical parameters. Density of the current passing through the electrolyte is perceived as key indicator of effectiveness and output capacity. Experiments were staged in a variety of physical settings: under different pressure, temperature, distance between the electrodes, varying electrode square area and strength of the electrolyte solution.

The researches resulted in following main findings:

1. The maximum effectiveness of an electrolyte cell is achieved at 3,5-7 A/m² current density.

2. Volume and energy distribution of hydrogen (liquid hydrogen) in combustion chamber attains about 3,7% of chamber volume, the same rate for petroleum fuel is about 1%, while for oxyhydrogen it equals 22,5% and oxyhydrogen compression nears critical value. The fact shows that this fuel can't directly replace petroleum fuel, but is suitable as an oxidizing agent only under certain conditions

in reciprocating internal combustion engines with crank gear.

3. Actually oxyhydrogen can't be considered as a full substitution for conventional fuel because of high energy-output ratio of electrolyte cell manufacturing.

4. Rise in output capacity of electrolyte cell consequently diminishes its effectiveness. Therefore, engineering of electrolyte cells requires optimization of their dimensions which should conform to the criterion of maximal space of electrodes in order to achieve the required current density.

5. The engineered electrolyte cell allows for operation under 70 bar pressure. The testing proved that the output capacity increases following increase in pressure. This finding is a certain guideline towards optimization of energy-output ratio of oxyhydrogen production.

The testing and the study on oxyhydrogen production by electrolysis have revealed that under certain conditions transformation of electric energy as regards energy density of the gaz could attain 90%. This assumption creates outlook for researches on conservation and further use of the released energy in innovative engines.

Key words: oxyhydrogen, internal combustion engine, electrolyte cell, non-carbon fuel, energy efficiency, energy conversion unit, energy conservation.

REFERENCES

1. Krasnov, K.S., Vorobiev, N.C., Godnev, I.N., et alias. Electrochemistry. Chemical kinetics and catalyze. The 2d vol. In: Physical chemistry. University textbook. Ed. by Krasnov K.S [Elektrohimiya. Himicheskaya kinetika i kataliz. Kn 2 v: Fizicheskaya himiya]. 2d ed., rev. Moscow, Vysshaya Shkola publ., 1995. 318 p.

2. Prigogine, I., Defay, R. Chemical Thermodynamics. [original title; Russian title: Himicheskaya termodinamika]. Novosibirsk, Nauka publ. (Siberian branch), 1966. 502 p.

3. Dimitrov, Alexandre. Modern Heat Engineering [original title in Bulgarian: Димитров, Александър Василев. Съвременна топлотехника и енергетика (Svremenna toplotehnika i energetika)]. Sofia, Todor Kableshkov VTU [Todor Kableshkov Transport Higher School] publ., 2011. 396 p.

4. Robertson, Scott. Compressed Air Power Secrets. 3d ed., 2009.

5. Sekulov, Kakachev. Method of energy conservation and utilization. PCT/BG2011/000005. [original title in Bulgarian under Patent Cooperation Treaty: Метод за съхранение и използване на енергия (Metod za shranenie i izpolzvanе na energiya)]. 2011.

6. Vesengiriev, M.I. Russian Federation Patent RU2267622. Engine of internal combustion [Dvigatel' vnutrennego sgoraniya], 2005.

7. Mosher, Edward G., Webster, John T. United States Patent 4023545. Energy means for internal combustion engines, 1977 (filed 1975).

8. Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies Module 1. Hydrogen properties. College of Desert, CA, December 2001. Last accessed 2013-02-17 at eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm01r0.pdf.

Координаты авторов (contact information): Георги Митков Павлов (Pavlov, Georgy M.) – g_pavlov61@abv.bg, Галина Петкова Чернева (Cherneva, Galina P.) – cherneva@vtu.bg, Радка Кирилова Васева (Vaseva, Radka C.) – do_rada@abv.bg, Любомир Симеонов Секулов (Sekulov, Lubomir S.) – res_start@abv.bg

Статья поступила в редакцию / received 14.12.2012
Принята к публикации / accepted 21.01.2012

