

УДК 621.43.056

С.И. СЕРБИН, д-р техн. наук; проф. Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев
Е.Ю. КИРЧУК, директор «Плазма-Техника-Консалт», г. Николаев

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННО-ТОПЛИВНЫХ ФОРСУНОК

Розроблені й досліджені ряд конструктивних схем плазово-паливних форсунок, проведені випробування по визначенню їх вольт-амперних характеристик і якості розпилювання. Визначено параметри універсальної плазово-паливної форсунки, що працює на різних видах газоподібних і рідких палив у широкому діапазоні зміни витрат повітря й палива.

A number of plasma-fuel nozzle constructions are developed and tested volt-ampere characteristics and fuel atomization quality are determined. Parameters of the universal plasma-fuel nozzle working on various gaseous and liquid fuels in a wide range of air flow rate and fuel consumptions are defined.

Введение

Известно, что задачи эффективного и экологически чистого использования энергоресурсов, рационального потребления дорогостоящих углеводородных топлив и горюче-смазочных материалов в полной мере относятся к энергетическим установкам различного типа и назначения. Это требует внедрения современных достижений науки и техники в практику проектирования, конструкторских работ и эксплуатации энергетических установок. Важным направлением совершенствования энергетических установок является улучшение характеристик камер сгорания и топочных устройств, которые в значительной степени определяются качеством организации процессов смесеобразования и горения, возможностями систем топливоподготовки, топливоподдачи и воспламенения. Еще более актуальной проблема повышения эффективности энергетических установок становится при использовании тяжелых и низкосортных видов топлив. Наиболее перспективное направление повышения эффективности рабочего процесса в турбинных и дизельных агрегатах, а также других энергетических установках – использование технологий плазмохимического сжигания топлив. Наряду с ионизацией воздуха здесь может быть достигнута высокая степень стабилизации горения.

Формулирование проблемы и анализ последних публикаций

Исследования газотурбинных установок различных типов, проведенные в последнее время во многих странах мира, показывают, что одним из наиболее перспективных методов повышения эффективности рабочего процесса и уменьшения эмиссии токсичных компонентов является интенсификация сжигания углеводородов с помощью низкотемпературной плазмы [1, 2]. Наиболее эффективным и универсальным плазмохимическим элементом является плазмохимический реактор (ПХР) – устройство, обеспечивающее ввод в зоны подготовки и горения высокореакционных частиц, получаемых в результате реагирования топлива с воздушной плазменной струей [3–5]. Воздух в ПХР нагревается до плазменных температур (1000–5000 К) в результате теплообмена с электрической дугой, горящей между катодом и анодом плазменного генератора, в качестве которого используется плазмотрон постоянного тока с газодинамической стабилизацией длины дуги. За счет эжекции в плазменную

струи подмешивается вспомогательное топливо, и в канале выходного сопла происходят плазмохимические реакции, продукты которых с высокой скоростью вносятся в камеру сгорания и улучшают горение основного топлива.

При разработке плазменно-топливных форсунок (ПТФ), которые являются разновидностями плазмохимических реакторов для работы на жидком топливе, остро стоит вопрос о способе и месте подачи топлива в канал плазменного устройства (плазменного пилота) для последующего его воспламенения. Применение плазмотрона в качестве элемента камеры сгорания предъявляет к нему специфические требования, основными из которых являются надежный запуск и устойчивая работа в широком диапазоне изменения тока дуги и расходов плазмообразующего газа и топлива, высокие энергетические показатели и минимальные массы и габариты. Дополнительно предполагается использование плазменного генератора не только в качестве источника воспламенения, но и как устройства сопровождения и стабилизации процессов горения топлив с различным фракционным составом.

В настоящее время вопросы применения плазмохимической технологии достаточно полно изучены применительно к процессам воспламенения топлив в основных камерах сгорания [1–4]. Анализ возможностей этого метода показывает, что область его практического применения в энергетике может быть значительно расширена. Основными целями данного исследования являются: создание на базе плазменного генератора универсального устройства воспламенения и сопровождения горения различных видов топлив для работы на атмосферном и повышенных давлениях; анализ его расходных характеристик с целью оптимизации геометрии каналов, а также расширение диапазона устойчивой работы блока электропитания.

Решение проблемы. Экспериментальные исследования

Теоретические и экспериментальные исследования процессов, протекающих в условиях турбулентных потоков воздуха, топлива, продуктов сгорания и продуктов плазмохимических превращений в плазменно-топливной форсунке, представляют собой достаточно сложную задачу [3, 5]. Форсунки, используемые для распыливания топлив в ГТД, обычно предназначены для работы при высоком давлении, когда скорости движения потоков значительны и смешение осуществляется за достаточно короткий промежуток времени. При работе форсунок при пониженном давлении качество смешения реагентов значительно снижается. В работе рассмотрены несколько схем подачи жидкого топлива в сопло реактора, ряд различных конфигураций каналов анода плазменного генератора, а также способов перемешивания воздуха и топлива.

Для исследования плазменных устройств (плазменных пилотов) проведены испытания по определению их расходных характеристик при работе на воздухе, газе (метан, пропан), воде и дизельном топливе. Определен коэффициент смешения K для разных модификаций ПТФ, определяющий качество распыливания. Отметим, что расходы воздуха и газов определялись по показаниям соответствующих ротаметров и манометров, а расход жидкости находился весовым способом. Погрешность измерений в экспериментах не превышала 7 %.

Первоначально исследован один из самых простых вариантов подачи жидкого топлива – непосредственно в канал анода разработанного ранее плазменного воспламенителя [6]. Топливо подавалось двумя способами: через отверстие диаметром 0,3 мм (рис. 1а) и при помощи распылителя стандартной форсунки Nago 609-11 с углом распыливания 70° и расходом 1,12 г/с (рис. 1б).

В ходе испытаний обоих вариантов проявились: взаимное влияние воздушного и топливного потоков, их низкое качество смешения, ограниченный диапазон регулирования расхода топлива (до 1,2 г/с) и давления (до 0,2 МПа), нестабильная работа блока питания как следствие пульсаций гидродинамических параметров. Для воспламенения топливоздушнoй смеси и стабильной работы этих форсунок требовалась мощность источника питания 600–750 Вт (при напряжении 1,0–1,2 кВ). При меньших значениях мощности форсунки работали нестабильно. Отметим, что повышение потребляемой мощности плазменным генератором за счет увеличения тока электрической дуги приводит к резкому снижению ресурса катодного узла и устройства в целом.

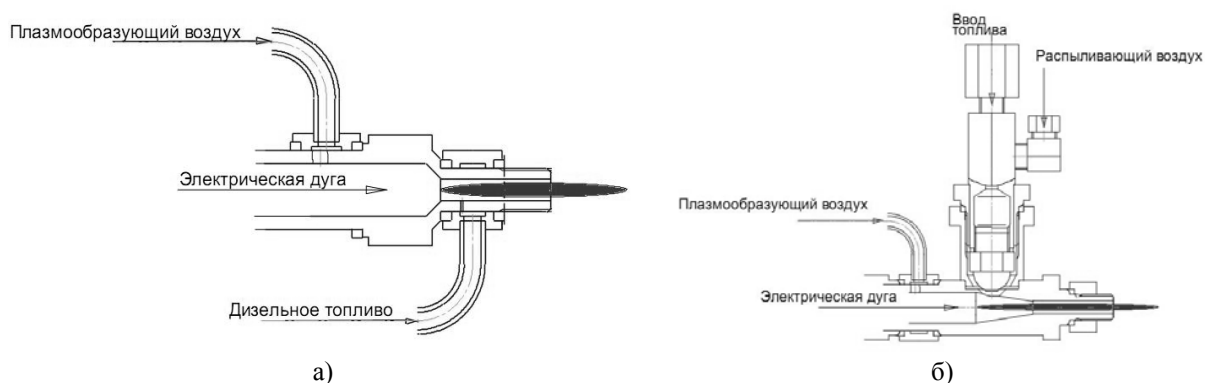


Рис. 1. Различные варианты подвода топлива в ПТФ

На основании полученных результатов были внесены изменения в конструкцию анода (предложен конусный канал) и выбран более эффективный способ подачи жидкого топлива. Благодаря этому обеспечено увеличение напряжение дуги, что позволило получить необходимую мощность генератора при меньшем токе и увеличенном ресурсе катодного узла. Сравнительные вольт-амперные характеристики (ВАХ) при различных расходах плазмообразующего воздуха приведены на рис. 2.

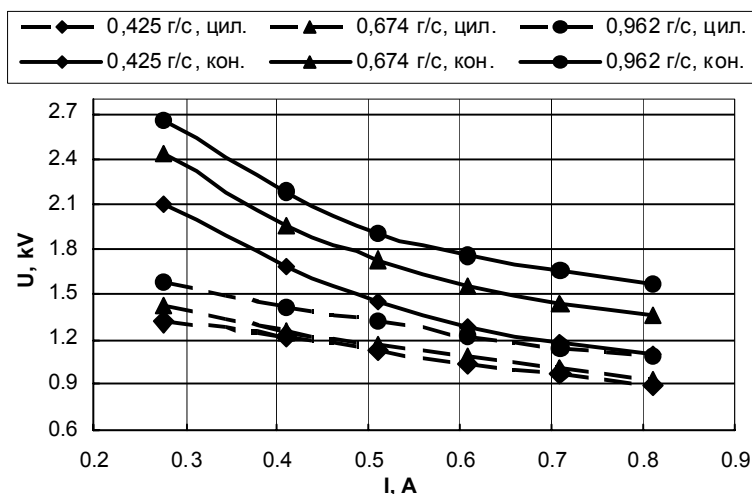


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики форсунок с цилиндрическим и конусным каналом анода

Из графиков видно, что для форсунки с конусным каналом анода характерно более высокое рабочее напряжение. На рис. 3 представлены схемы исследованных способов подачи топлива через распыливающие элементы – с помощью форсунок

Наго, расположенной под определенным углом к оси плазменного пилота, и через пористую вставку из прессованных бронзовых частиц.

В этих конструкциях (диапазон потребляемой электрической мощности от 350 до 850 Вт) удалось ликвидировать взаимное влияние потоков (плазменного и топливного) друг на друга, увеличить диапазон регулирования расходов топлива до 1,5 г/с и распыляющего воздуха до 3,0 г/с.

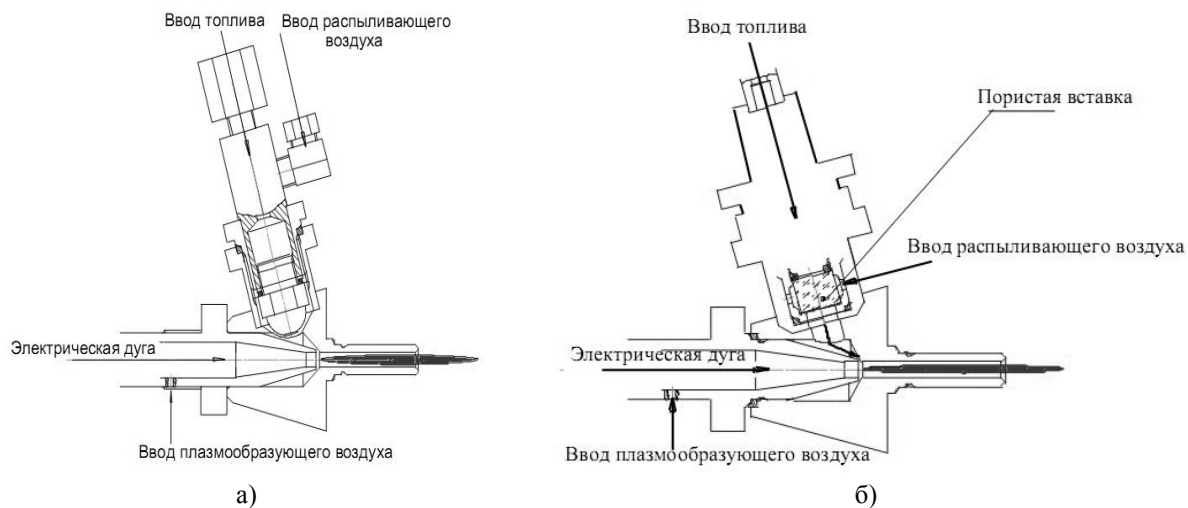


Рис. 3. Подвода топлива при помощи распылителя Наго (а) и через пористую вставку (б)

Рассмотренные варианты оказались целесообразными при работе на газообразном и легком жидком топливах. Для обеспечения эффективного качества распыливания тяжелого вязкого топлива была предложена конструкция плазменно-топливной форсунки с перекрещивающимися каналами [7–9]. Плазмотрон и распыляющее устройство собраны в одном корпусе, как и в предыдущих схемах. Подвод электрического питания осуществляется через высоковольтный кабель и катодный узел, изготовленный на базе автомобильной свечи зажигания. Подача и закрутка плазмообразующего воздуха обеспечивается тангенциальными отверстиями в аноде. Распыливающий воздух и топливо подаются и закручиваются по отдельным, независимым друг от друга, каналам. Необходимая дисперсность распыливания топлива достигается воздействием распыливающего воздуха, благодаря этому увеличиваются поверхность соприкосновения воздуха с топливной пленкой и относительная скорость на границе двух сред. Образование однородной топливоздушной смеси осуществляется в зонах контакта потоков. Качество смешения зависит от протяженности участков пересечений, скоростей и температур потоков, длин подводящих каналов. Образованная таким образом горючая смесь подается в реакционную камеру, в которой скорости сред выравниваются и стабилизируются, и далее направляется в участок генерирования плазмы, где осуществляется процесс воспламенения. Плазмообразующий газ значительно улучшает качество распыливания, практически не влияя на угол топливного конуса, в то время как подвод дополнительного распыливающего воздуха несколько его снижает, а также приводит к уменьшению длины факела [3].

Проведенная на стенде холодная продувка плазменно-топливной форсунки (в качестве жидкости использовалась вода) позволила определить диапазоны регулирования распыливающего воздуха и жидкости, зависимости расходов сред

(G_{air} , G_{fuel}) от давления в магистрали каждого канала, коэффициенты смешения, а также визуально оценить качество распыливания. В ходе исследований выявлен диапазон работоспособности форсунки при малых давлениях в топливном канале и определена зависимость расходов жидкости от давления воздуха. На рис. 4 приведены расходные характеристики плазменно-топливной форсунки. Отметим, что в воздушных каналах давление изменялось в диапазоне от 0,13 до 1,0 МПа.

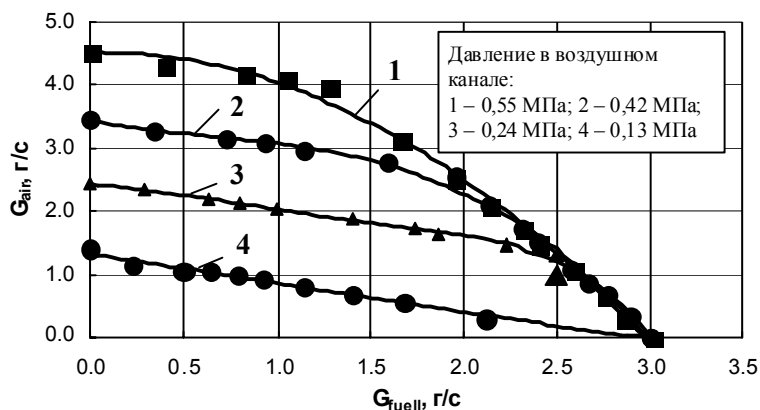


Рис. 4. Расходная характеристика плазменно-топливной форсунки с перекрещивающимися каналами

При увеличении давления воздуха в воздушном канале от 0,13 до 0,6–1,0 МПа возрастает его скорость и сила взаимодействия с частицами топлива, что повышает качество перемешивания двух сред. Диапазон устойчивой работы форсунки с увеличением давления в воздушном канале заметно расширяется. Одним из параметров эффективности работы форсунки является дисперсность распыливания. Дисперсность распыливания топлива зависит от коэффициента смешения K , определяемого как отношение массы распыливающего воздуха к массе жидкости или газа, проходящей через каналы завихрителей форсунки в единицу времени. С увеличением давления воздуха растет его расход через форсунку и уменьшаются диаметры капель топлива, находящегося в составе смеси. Графики зависимости коэффициента смешения от расхода топлива G_{fuel} при различных расходах воздуха G_{air} приведены на рис. 5.

Видно, что диапазон изменения коэффициента K форсунки довольно широк, но для большинства практических режимов $K \leq 3$.

Проведена серия сравнительных испытаний предложенных форсунок, работающих на дизельном топливе, в составе возвратно-вихревой камеры сгорания «Торнадо» [8–10] при атмосферном давлении. Замеры концентраций основных пирогенных загрязнителей производились с помощью газоанализатора Testo-350XL. Сравнительные характеристики выбросов различных токсичных компонентов представлены на рис. 6–8.

Как видно из приведенных графиков, наилучшие экологические показатели в составе возвратно-вихревой камеры сгорания имеет форсунка с перекрещивающимися каналами. По сравнению с подачей топлива через распылитель Nago эмиссия оксидов азота и углерода снизилась на 10–14 % и 5–10 % соответственно. Это связано с более высоким качеством смесеобразования во внутренних полостях форсунки с перекрещивающимися каналами.

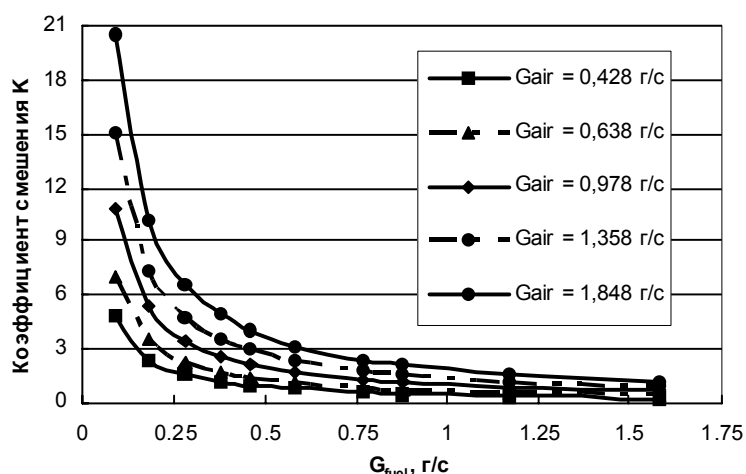


Рис. 5. Зависимость коэффициента смешения от расхода воздуха

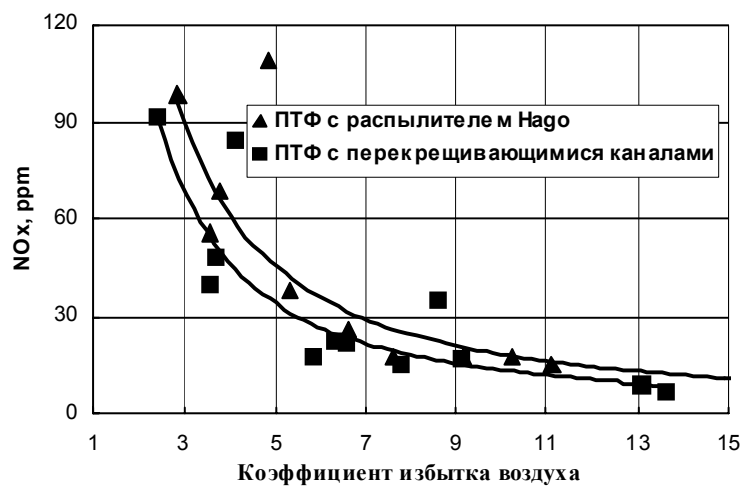


Рис. 6. Зависимость выбросов оксидов азота от коэффициента избытка воздуха в камере

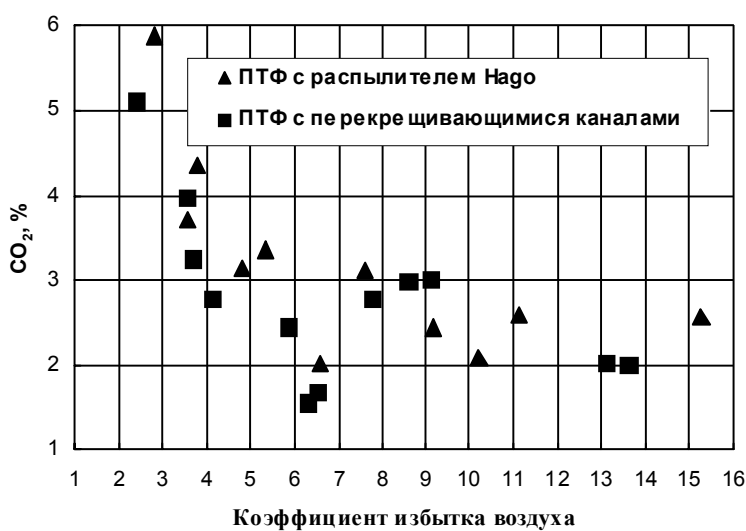


Рис. 7. Зависимость концентрации диоксида углерода от коэффициента избытка воздуха в камере

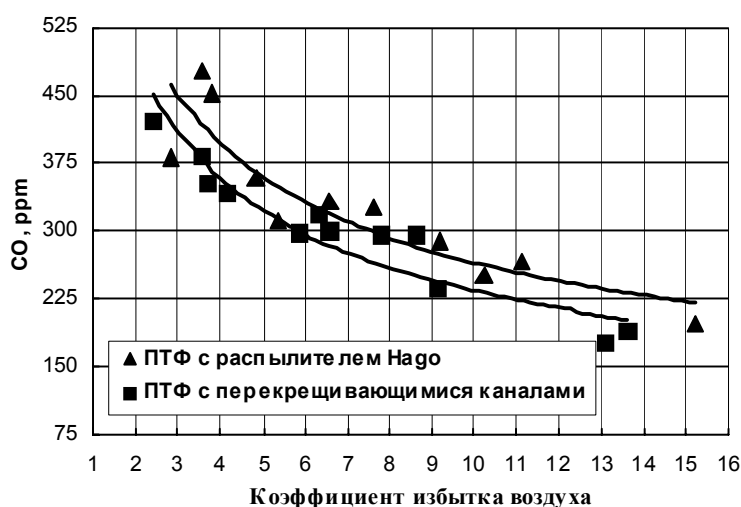


Рис. 8. Зависимость выбросов монооксида углерода от коэффициента избытка воздуха в камере

Вывод

Разработана эффективная плазменно-топливная форсунка, которая обеспечивает воспламенение топлива и сопровождение горения в камерах сгорания различных энергетических установок. Основными преимуществами являются:

- работа при низком давлении топливоподачи (0,15–0,7 МПа);
- малый расход распыливающего воздуха (коэффициент смешения $K \leq 3$);
- возможность работы на газообразных (природный газ, метан, пропан) и жидких топливах с использованием в качестве плазмообразующей среды воздух, кислород, водяной пар;
- малая потребляемая электрическая мощность (до 500 Вт), обеспечивающая устойчивую работу форсунки на жидких топливах;
- низкие выбросы оксидов азота, удовлетворяющие международным нормам.

Список литературы: 1. *Clements R.V.* An Experimental Study of the Injection Mechanism for Typical Plasma Jet Igniter / R.V. Clements, P.R. Smy, J.D. Dale // *Combustion and Flame*. – 1981. – Vol.42. – P. 287–295. 2. *Weinberg F.J.* Plasma Jets in Combustion / F.J. Weinberg // *Int. Conference on Combustion in Engineering*. – Oxford, 1983. – P. 65–72. 3. *Романовский Г.Ф.* Плазмохимические системы судовой энергетики / Г.Ф. Романовский, С.И. Сербин. – Николаев: УГМТУ, 1998. – 246 с. 4. *Romanovsky G.F.* Plasma-chemical systems for ecologically clean marine gas turbines / G.F. Romanovsky, S.I. Serbin // *Explo-Diesel & Gas Turbine '01*. – Poland, 2001. – Vol.1. – P. 267–272. 5. *Serbin S.I.* Modeling and Experimental Study of Operation Process in a Gas Turbine Combustor with a Plasma-Chemical Element / S.I. Serbin // *Combustion Science and Technology*, 1998. – Vol.139. – No.1–6. – P. 137–158. 6. *Matveev I.* Multi-mode Plasma Igniters and Pilots for Aerospace and Industrial Applications / I. Matveev // 2-nd Int. Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion, Falls Church, Virginia, 2006. – 12 p. 7. *Базаров В.Г.* Способ и устройство для сжигания топлив/ В.Г. Базаров // Описание к патенту Российской Федерации № 2002 -112139, дата подачи 06.05.2002. 8. *Matveev I.* Applied Plasma Technologies, U.S. Patent Application for a “Triple Helical Flow Vortex Reactor”/ I. Matveev // 11/309644, filed 2 Sept., 2006. 9. *Matveev I.* Development of cross-flow plasma fuel nozzle / I. Matveev, E. Kirchuk, S. Matveeva // 5-th Int. Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion, Alexandria, Virginia, 2008. – P. 18–20. 10. *Matveev I.* Experimental Investigation of the Hybrid Type Plasma Assisted Combustion and Reforming System / I. Matveev, S. Serbin // 4-th Int. Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion, Falls Church, Virginia, 2008. – P. 61–63.

© Сербин С.И., Кирчук Е.Ю., 2010
Поступила в редколлегию 03.02.10