

УДК 621.43.03: 068.4:533.9.07: 533.527

Использование цифровой измерительной техники для гидравлических испытаний форсунок

Леонтьев С. Н.¹, Новиков А. О.¹,
Ягодников Д. А.^{1,*}

* daj@bmstu.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В настоящей работе приведены предложения по совершенствованию гидравлического стенда для определения характеристик распыления центробежных форсунок, применяемых в жидкостных ракетных двигателях. Рассматривались следующие характеристики распыления: расход жидкости через форсунку, коэффициент неравномерности распределения расхода жидкости по углу конуса распыления, угол конуса распыления. Осуществлена экспериментальная проверка предложенных цифровых средств измерения и регистрации параметров форсунки и показана возможность их применения. Погрешности определения параметров форсунки значительно понижены по сравнению с использованием аналоговых средств измерения на стенде прошлого поколения.

Ключевые слова: форсунка, распыление жидкости, расход жидкости, распределение расхода жидкости по углу конуса распыления, угол распыления жидкости

Введение

Одно из направлений развития современного жидкостного ракетного двигателестроения (ЖРД) заключается в повышении их энергомассовых характеристик, в частности удельного импульса. Это может быть обеспечено как за счет применения новых высокоэнергетичных компонентов топлива, так и при помощи совершенствования рабочего процесса в камере ЖРД [1, 2].

С целью обеспечения высокого удельного импульса камеры ЖРД необходимо оптимально организовать процесс горения компонентов топлива, что может быть обеспечено выбором оптимальной геометрии газодинамического контура камеры сгорания ЖРД, а также совершенствованием процессов распыления и смешения компонентов топлива, например, за счет подбора оптимального типа, характеристик и расположения форсунок на смесительной головке камеры. Создание определённых гидродинамических условий обеспечивает требуемую равномерность распределения компонентов топлива как по соотношению горючего и окислителя по сечению камеры,

так и по расходонапряжённости, а также создаёт условия для быстрого и полного вступления компонентов в реакцию горения, увеличивая при прочих равных условиях полноту сгорания топлива и, соответственно, значение удельного импульса ЖРД.

Именно этими причинами обусловлен интерес к характеристикам форсунок в научном плане, а технологические аспекты определяют необходимость обеспечения контроля заложенных в конструкцию параметров при их изготовлении.

Разные типы форсунок (в ЖРД используют струйные, центробежные, одно- и двухкомпонентные, газовые, жидкостные, с внешним и внутренним смешением и т.д.) обладают различными характеристиками, которые в совокупности обеспечивают оптимальные гидродинамические условия, включая размер получившихся капель, угол при вершине конуса распыливания и др. На конечный результат влияют тип используемых форсунок и способ их размещения на головке в сочетании с дальностью, углом факела распыливания, наличием отражающих поверхностей и пересечением (взаимодействием) струй.

Для получения указанных параметров форсунок проектируются специальные испытательные стенды, которые можно разделить на два типа: для научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, часто не относящиеся к конкретной отрасли техники; и более простые и дешёвые установки - для контроля в процессе производства (при необходимости), а также для настройки, ремонта, очистки и т.д. в отраслях промышленности, где такие работы возможны и целесообразны.

В частности, можно упомянуть следующие стенды. В работе [3] предложены способ испытания и регулировки форсунок и стенд для испытания и регулировки форсунок. Суть данного способа заключается в следующем: факел распыла фотографируется и полученные фотоизображения геометрической формы последнего сравнивают формой факела распыла, обеспечиваемого эталонной форсункой и затем делают вывод о техническом состоянии проверяемой форсунки.

В патенте [4] предлагается способ диагностирования производительности форсунок и устройство для его осуществления. Особенностью данного устройства является косвенное определение расхода рабочего тела при помощи расходомера по расходу воздуха, вытесняемого из замкнутой ёмкости, в которую сливается рабочее тело.

Одной из важных характеристик распыливания является угловое направление струй топлива при истечении из сопловых отверстий распылителя. В работе [5] для измерения угловых направлений струй топлива применены два преобразователя угловых перемещений, оси которых расположены перпендикулярно друг другу в вертикальной и горизонтальной плоскостях и проходят через точку пересечения общей вертикальной оси экрана и распылителя с осью соплового отверстия. Для этого поочерёдно приводятся в касание противоположные края струи и мишени, фиксируются соответствующие значения углов, а искомый угол определяется как среднее арифметическое значение от полученных показаний. Так определяют углы направления струй топлива в плане, так и углы направлений в плоскостях, проходящих через вертикальную ось распылителя.

В работе [6] описан стенд для определения характеристик форсунок, в том числе величины угла при вершине конуса распыливания. Стенд не способен определять

неравномерность распыления по окружности факела, поэтому не может использоваться для контроля центробежных форсунок ЖРД, но интересен тем, что искомый угол контролируется фотографированием. Факел подсвечивается лампой через матовое стекло и угол при вершине конуса определяется либо на мониторе, либо по фотографии.

Таким образом, можно заключить, что существует большое количество экспериментальных стендов и методов для определения параметров форсунок. Однако не все они подходят для определения характеристик форсунок ЖРД. Тем не менее используемые в них методы могут быть применены и в рассматриваемом нами случае. Также характерными признаками является использование аналоговых первичных измерительных преобразователей (ПИП), что обуславливает увеличение сложности и погрешности измерений и, кроме того, затрудняет автоматизацию испытаний.

В связи с изложенным целью данной работы является экспериментальное обоснование использования цифровой измерительной техники и исследование гидравлических характеристик форсунок.

Экспериментальная установка и система измерений

Для определения параметров форсунок наибольшее распространение получили установки с секционными заборниками (рис. 1) [7].

С помощью кольцевого сборника *a* можно определить распределение жидкости по радиусу факела распыла, а при помощи секторного сборника *б* по окружности факела. Возможна комбинация указанных типов сборников в одной конструкции. При этом количество секций должно быть не менее 12 (бывает 24 и 36).

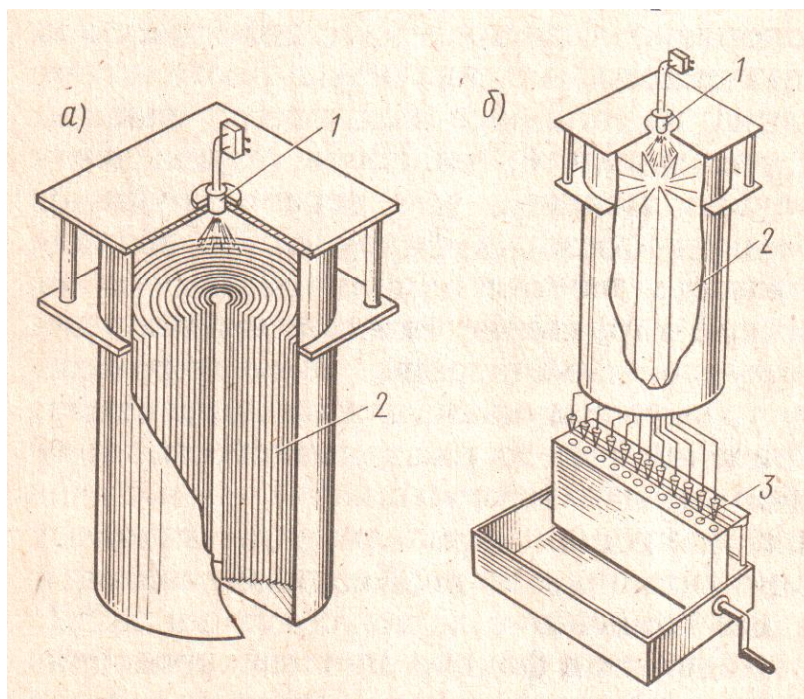


Рис. 1. Схема кольцевого *a* и секционного *б* сборников [7]. 1 – форсунка; 2 – сборник; 3 – мерная ёмкость

Методика контроля параметров форсунки с использованием секционных сборников заключается в распыливании жидкости форсункой при заданном перепаде давления на ней в течение определённого времени (чем дольше, тем выше точность и достоверность результатов) и последующем определении количества жидкости в каждой секции для вычисления искомых параметров форсунки. К достоинствам методики можно отнести её наглядность и простоту, а также возможность механизации и автоматизации процесса испытания.

Основными определяемыми экспериментально гидравлическими характеристиками любого типа форсунок являются: величина коэффициента расхода μ , дисперсность (мелкость) распыливания, характеризующая дифференциальным или интегральным распределением количества капель по размеру, а также их средним или медианным диаметрами, а для центробежных форсунок, кроме того, углом конуса распыливания α и равномерностью распределения жидкости по окружности конуса распыливания. Диаметр капли является расчётной величиной и при технологических испытаниях обычно не контролируется. Перепад давления на форсунке задаётся в конструкторской документации.

Центробежные форсунки отличаются от струйных наличием завихрения потока, которое конструктивно обеспечивается либо организацией тангенциального подвода жидкости в форсунку, либо установкой специального завихрителя (шнека). Благодаря этому на выходе из центробежной форсунки получают конусообразный вращающийся факел распыливаемой жидкости. Меняя конструктивные параметры такой форсунки можно влиять на угол факела распыливания, коэффициент расхода, коэффициент неравномерности распределения жидкости по окружности факела распыливания и размер капель. Как правило, именно эти параметры и контролируются в процессе испытания.

Расход жидкости через форсунку определяется с помощью высокоточных расходомеров FLONET FN2024.1 электромагнитного типа [8], которые обладают весьма высокими метрологическими характеристиками, в частности погрешность определения расхода не превышает 0,5% в диапазоне расходов воды от $Q_{\min} = 0,0028$ л/с до $Q_{\max} = 0,28$ л/с.

Коэффициент неравномерности распыливания K_n определяется с помощью преобразователей дифференциального давления (фактически сигнализаторов уровня) подсоединяемых ко дну каждой секции, в качестве которых использовались датчики перепада давления типа DMD 331-ASLX компании «БД Сенсорс РУС», которые имеют погрешность 0,075% при диапазоне перепада давления 0...5 кПа [9]. Запись, регистрация и обработка всех данных эксперимента осуществлялась измерительным комплексом МИС-200 фирмы «НПП Мера» и программой обработки массивов информации WinPos [10].

В качестве объекта исследований выбрана однокомпонентная центробежная тангенциальная форсунка. В качестве рабочей жидкости использовалась вода техническая по ГОСТ 17.1.1.04-80. Испытания проводились при трёх значениях перепада давления на форсунке: 0,6 МПа, 0,8 МПа, 1,0 МПа, которые фиксировались образцовым манометром с пределом измерения 16 кгс/см² с допускаемой погрешностью 0,096 кгс/см².

Результаты экспериментальных исследований

Методика определения угла при вершине конуса распыливания с использованием видеосъёмка последнего приведена на рис. 2. Для этого необходимо обеспечить уровень контрастности изображения, позволяющий однозначно определить границу раздела двух фаз: воздух-жидкость.

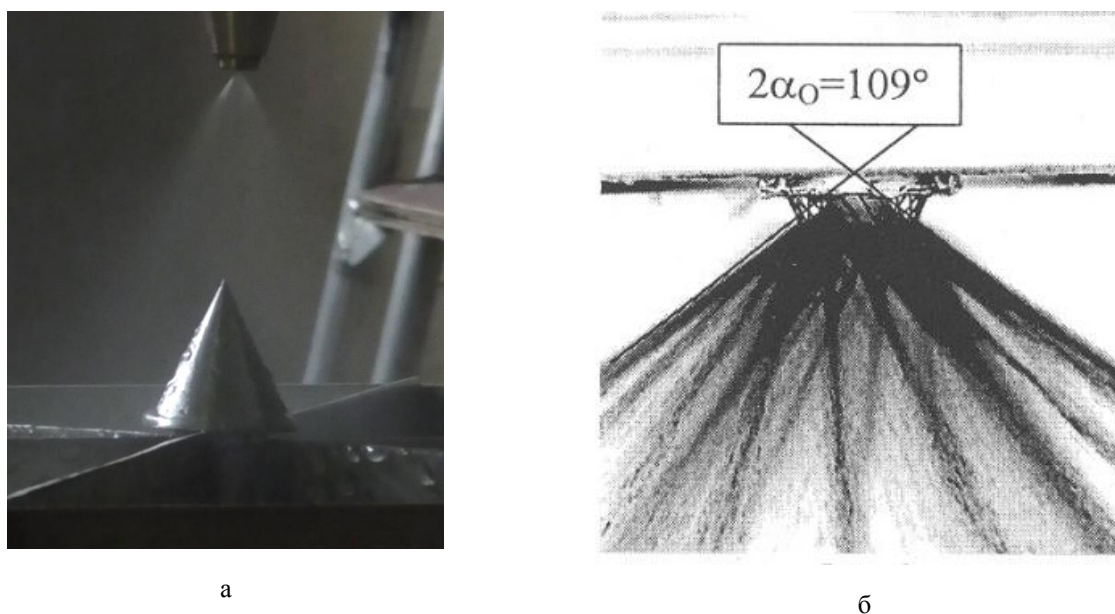


Рис. 2. Изображение процесса распыливания форсункой (а) и пример методики определения угла распыливания по изображению факела (б). Видеосъёмка камерой Panasonic HCV-210

Результаты измерений с использованием цифровых ПИП, представленные на рис. 3 в виде скриншотов с экрана регистратора МПС-200, позволяет сделать заключение о наличии неравномерности распыливания форсункой по секциям сборника. Об этом свидетельствует различная скорость нарастания избыточного (по отношению к атмосферному) давления в каждой секции сборника в зависимости от времени работы форсунки. Таким образом, использование непрерывной регистрации гидростатического давления (уровня) жидкости в каждой секции позволяет определить неравномерность распыливания K_n в данный момент времени, или интегрально за весь период измерения (по тангенсу угла наклона соответствующих кривых).

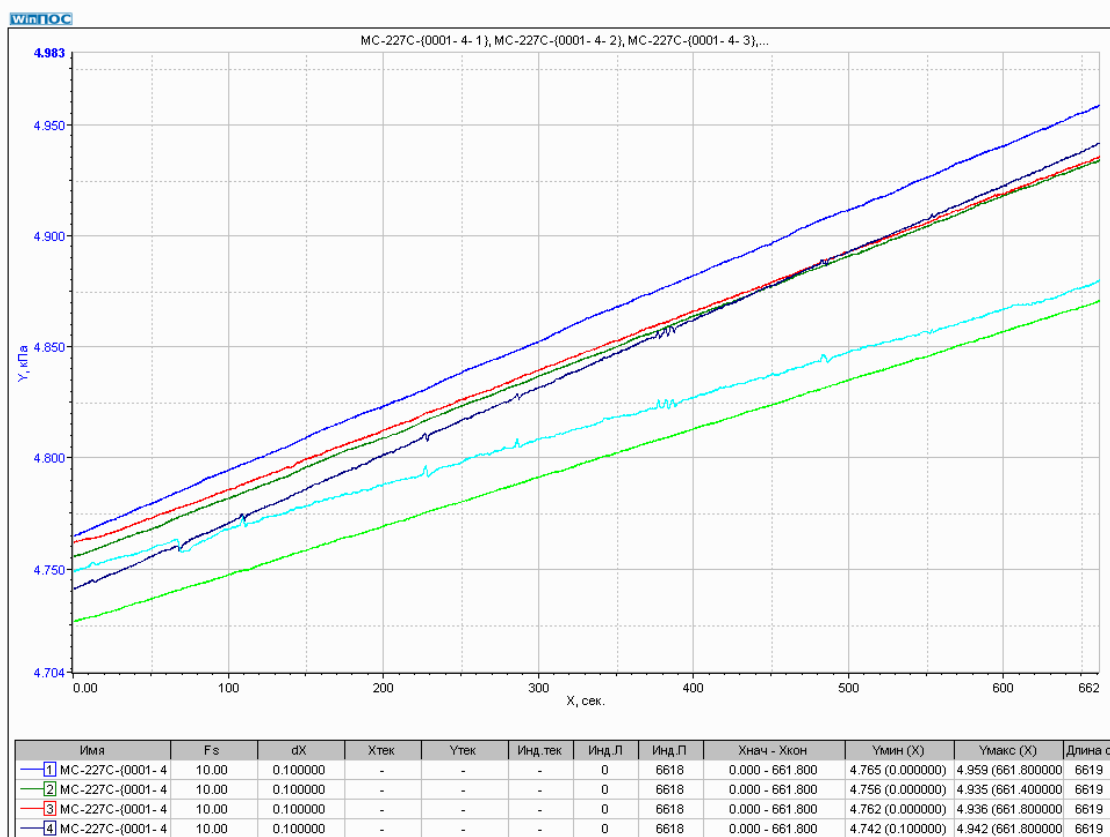


Рис. 3. Распределение давлений в каждой из 6 секций сборника в зависимости от времени

По полученным приращениям гидростатического давления в каждой секции сборника за определённое время может быть рассчитана величина коэффициента неравномерности распыла K , представляющего собой нормированную разницу колебаний значений расходонапряжённости по окружности факела распыливания (см. рис. 3). Величина $K_n = \frac{q_{max} - q_{min}}{q_{cp}} \times 100\%$ (при одинаковых размерах секций значения расходов q можно получить, зная приращения давления за определённый промежуток времени (см. рис. 3)) является характеристикой распределения жидкости по факелу распыливания, может нормироваться в технической документации и являться параметром, по которому принимается заключение о годности форсунки или ее несоответствия требованиям технического задания.

Применение рассмотренной современной измерительной и регистрирующей аппаратуры позволяет сделать шаг вперёд в развитии методов диагностики характеристик форсунок. В частности, не только снижается погрешность определения основных характеристик, но и появляется возможность повысить производительность установки за счёт сокращения времени отдельного испытания. Кроме того, коэффициент неравномерности распыливания можно вычислить с использованием тангенсов угла наклона приращения расхода в каждой секции сборника (см. рис. 3), причём такой метод является новым и не требующим длительного слива рабочего тела (достаточно двух точек для определения

величины тангенса). Коэффициент неравномерности распыла в этом случае можно определить по следующим формулам:

$$K_H = \frac{(\Delta p_{max} - \Delta p_{min})n}{\sum_{i=1}^n \Delta p_i} \times 100\%,$$

или

$$K_H = \frac{(\tan \alpha_{max} - \tan \alpha_{min})n}{\sum_{i=1}^n \tan \alpha_i} \times 100\%,$$

где n – количество секций сборника жидкости.

Выводы

1. За счет использования цифровых первичных измерительных преобразователей повышена точность определения расхода жидкости до 0,5% и погрешности определения коэффициента $K_H \sim 0,5\%$.

2. Впервые на практике предложен и реализован метод определения коэффициента неравномерности распыления по различию скорости нарастания избыточного гидростатического давления жидкости в каждой секции сборника в зависимости от времени работы форсунки.

3. Используя текущее значение градиента нарастания избыточного давления в каждой секции представляется возможным параметры форсунки контролировать непрерывно, что имеет практическое значение в процессе регулирования ЖРД.

Список литературы

1. Каторгин Б.И. Перспективы создания мощных ЖРД // Вестник Российской Академии Наук. 2004. Т. 74, № 6. С. 499-506.
2. Ягодников Д.А. Преемственность и модернизация жидкостных ракетных двигателей космических ракет-носителей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. № 1. С. 121-126.
3. Плетнёв А.И. Способ испытания и регулировки форсунок и стенд для испытания и регулировки форсунок: пат. 2467197 РФ / ГОУВПО Самарский государственный университет путей сообщения. 2012.
4. Пиргалин А.Г., Шаталов М.В. Способ диагностирования производительности форсунок и устройство для его осуществления: пат. 2406989 РФ / ООО «Инжиниринговая компания Технопарк 21». 2010.
5. Бронштейн А.С., Федосеев В.Г. Стенд для измерения угловых направлений струй топлива из сопловых отверстий распылителя: пат. 2226617 РФ / ОАО Ярославский завод дизельной аппаратуры. 2004.
6. Стенд контроля форсунок ПСФ – 06/1: каталог.

7. Васильев А.П., Кудрявцев В.М., Кузнецов В.А. и др. Основы теории и расчёта жидкостных ракетных двигателей. В 2 кн. Кн. 1: учебник для авиационных специальностей вузов / под ред. В.М. Кудрявцева. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1993. 383 с.
8. ООО НПП «Элемер»: официальный сайт предприятия. Режим доступа: www.elemer.ru (дата обращения 01.09.2015).
9. BD Sensors RUS (БД Сенсорс РУС): официальный сайт российской производственной компании. Режим доступа: www.bdsensors.ru (дата обращения 01.09.2015).
10. ООО НПП «Мера»: официальный сайт. Режим доступа: <http://www.nppmera.ru/> (дата обращения 01.09.2015).

Digital Measuring Devices Used for Injector Hydraulic Test

S.N. Leontiev¹, A.O. Novikov¹,
D.M. Yagodnikov^{1,*}

* daj@bmstu.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: injector, liquid spraying, liquid flow rate, liquid flow rate along spraying cone determination, spraying cone angle

To ensure a high specific impulse of the LRE (liquid-propellant engine) chamber it is necessary to have optimally organized combustion of the fuel components. This can be ensured by choosing the optimum geometry of gas-dynamic contour of the LRE combustor, as well as by improving the sputtering processes and mixing the fuel components, for example, by selection of the optimum type, characteristics, and location of injectors on the mixing unit of the chamber.

These particular reasons arise the interest in the injector characteristics in terms of science, and technological aspects determine the need for control of underlying design parameters in their manufacture.

The objective of this work is to give an experimental justification on used digital measurement instrumentation and research the hydraulic characteristics of injectors.

To determine injector parameters most widely were used the units with sectional collectors. A technique to control injector parameters using the sectional collectors involves spraying the liquid by injector at a given pressure drop on it for a certain time (the longer, the higher the accuracy and reliability of the results) and then determining the amount of liquid in each section to calculate the required parameters of injector.

In this work the liquid flow through the injector was determined by high-precision flowmeters FLONET FN2024.1 of electromagnetic type, which have very high metrological characteristics, in particular a flow rate error does not exceed 0.5% in a range of water flow from $Q_{\min}=0.0028$ l/s to $Q_{\max}=0.28$ l/s. To determine the coefficient of uneven spray were used differential pressure sensors DMD 331-ASLX of company "DB Sensors RUS", which have an error of 0.075% with a range of differential pressure 0 ... 5 kPa. Measuring complex MIC-200 of company "NPP Measure" and WinPos software for processing array information provided entry, recording, and processing of all the data of the experiment.

In this paper the following conclusions are drawn:

1. The use of digital sensors enabled increasing accuracy of the flow rate up to 0.5%, and the error in determining the coefficient $K_n \sim 0.5\%$.

2. For the first time in practice we proposed and implemented a method for determining the coefficient of spraying unevenness from the difference in the rate of rise of the excess hydrostatic liquid pressure in each section of collector depending on the collection time of the injector.
3. Using a current value of raising overpressure gradient in each section, it is possible to provide a continuous control of the injector parameters that has practical implication for the study of the LRE control process.

References

1. Katorgin B. I. Prospects for the Development of Powerful Liquid Rocket Jets. *Vestnik Rossiiskoi Akademii Nauk = Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2004, vol. 74, no. 3, pp. 499-506. (in Russian).
2. Yagodnikov D.A. Succession and Modernization of Liquid-Propellant Rocket Engines of Space Launch Vehicles. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 2011, no. 1, pp. 121-126. (in Russian).
3. Pletnev A.I. *Sposob ispytaniya i regulirovki forsunok i stend dlya ispytaniya i regulirovki forsunok* [Method of testing and adjusting nozzles and stand for testing and adjusting adjusting nozzles]. Patent RF, no. 2467197, 2012. (in Russian).
4. Pirgalin A.G., Shatalov M.V. *Sposob diagnostirovaniya proizvoditel'nosti forsunok i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of diagnosing nozzle performance and device for its realization]. Patent RF, no. 2406989, 2010. (in Russian).
5. Bronshtein A.S., Fedoseev V.G. *Stend dlya izmereniya uglovykh napravlenii strui topliva iz soplovykh otverstii raspylitelya* [Stand for measuring the angular direction of the jet of fuel from nozzle apertures of atomizer]. Patent RF, no. 2226617, 2004. (in Russian).
6. *Stend kontrolya forsunok PSF – 06/1: katalog* [Nozzle control stand PSF – 06/1: catalog]. (in Russian, unpublished).
7. Vasil'ev A.P., Kudryavtsev V.M., Kuznetsov V.A., et al. *Osnovy teorii i rascheta zhidkostnykh raketnykh dvigatelei. V 2 kn. Kn. 1* [Fundamentals of Liquid Rocket Engines Theory and Calculation. In 2 books. Book 1]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1993. 383 p. (in Russian).
8. Ltd. “Elemer”: official company website. Available at: www.elemer.ru , accessed 01.09.2015. (in Russian).
9. BD Sensors RUS: official company website. Available at: www.bdsensors.ru , accessed 01.09.2015. (in Russian).
10. Ltd. “Mera”: official company website. Available at: <http://www.nppmera.ru/> , accessed 01.09.2015 . (in Russian).