



ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ИСПЫТАНИЙ КИСЛОРОДНО-ВОДОРОДНЫХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК НА СТЕНДЕ

В.В. Родченко¹, А.Г. Галеев², Б.Б. Попов², А.В. Галеев¹

¹ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт» (национальный исследовательский университет)

РФ 125993, Москва, ГСП-3, А-80, Волоколамское ш., д. 4

тел.: (8-499) 158-91-36; e-mail: galant1992@mail.ru

²ФКП «Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности»

РФ 141320, г. Пересвет, Московская область, ул. Бабушкина, д. 9

e-mail: a.galeev@nic-rkp.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.20.005

Заключение совета рецензентов: 04.09.15 Заключение совета экспертов: 11.09.15 Принято к публикации: 18.09.15

Принятая технология позволяет проводить испытания двигательных установок (ДУ) на стенде с заправкой в топливный бак до 2 700 кг водорода с выполнением специальных мер безопасности и использованием систем аварийной защиты (САЗ), охватывающих до 60 % нештатных ситуаций.

В статье рассмотрены дополнительные меры безопасности, обеспечивающие испытания ДУ верхних ступеней ракет-носителей (РН) с увеличенными дозами заправки (до 7 000 кг), которые основаны на сохранении иерархического принципа построения программ испытаний. Ключевым фактором в повышении эффективности систем пожаро- и взрывопредупреждения (СПВП), САЗ и коэффициента охвата аварийных (нештатных) ситуаций (до 0,8–0,9) являются исследования систем более раннего обнаружения утечек водорода и применения ингибиторов с флегматизатором-азотом для предотвращения взрыва смесей водорода с воздухом (или кислородом).

Представлены результаты исследований систем раннего обнаружения утечек водорода и внедрения в эксплуатацию установок для сравнительных испытаний на быстрдействие, ресурс и селективность датчиков контроля опасных концентраций водорода.

Ключевые слова: двигательная установка, ракета-носитель, безопасность, система аварийной защиты, нештатная ситуация, утечка водорода, ингибитор.

STUDY OF SECURITY SYSTEMS OF OXYGEN-HYDROGEN PROPULSION PLANT TEST ON THE STAND

V.V. Rodchenko¹, A.G. Galeev², B.B. Popov², A.V. Galeev¹

¹Moscow Aviation Institute (National Research University)

4 Volokolamskoe drive, GSP-3, A-80, Moscow, 125993 Russian Federation

ph.: (8-499) 158-91-36; e-mail: galant1992@mail.ru

²Research and Testing Center of Rocket and Space Industry

9 Babushkin str., Peresvet, Moscow region, 141320 Russian Federation

e-mail: a.galeev@nic-rkp.ru

Adopted technology allows engineers to test of propulsion plant (PP) on the stand with filling the fuel tank up to 2700 kg of hydrogen with implementation of special security measures and the use of systems emergency safety (SES), covering up to 60% of emergency situations.

The paper considers the additional security measures ensuring the test for the rocket propulsion plant upper stages with increased doses of refueling (up to 7000 kg), based on the principle of preserving the hierarchical construction of test programs. A key factor to improve the efficiency of systems alert fire and explosion, SES and coefficient enrollment of emergency situations (0.8–0.9) is the research on systems of the earlier hydrogen leak detection and the use of inhibitors with nitrogen-deterrent to prevent an explosion of hydrogen and air (or oxygen) mixtures.

The paper demonstrates the research results of the earlier hydrogen leak detection systems and implementation of plants for comparative testing for sensors for hydrogen dangerous concentration monitoring.

Keywords: propulsion plant, rocket, security, emergency safety systems, emergency situation, a leak of hydrogen, inhibitors.



Родченко Владимир
Викторович
Vladimir V. Rodchenko

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, почетный работник высшей школы, действительный член Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, заместитель заведующего кафедрой «Управление эксплуатацией РКС» Московского авиационного института (национального исследовательского университета); научно-педагогический стаж более 40 лет.

Был руководителем и участвовал в выполнении ряда хозяйственных работ по заказам промышленности, в том числе по программам: «Энергия-Буран», «Магистраль», «Синева» и др.

Образование: Московский авиационный институт.

Область научных интересов: теория и практика создания реактивных устройств, способных двигаться в грунтах с высокими скоростями; отработка сложных технических систем.

Публикации: более 180, в том числе 7 монографий, 9 учебных пособий, 4 авторских свидетельства и патента на изобретения.

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, лауреат премии Совета Министров СССР в области науки и техники, действительный член Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, главный научный сотрудник ФКП «НИЦ РКП», профессор кафедры «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» Московского авиационного института (национального исследовательского университета); научно-педагогический стаж 40 лет.

Участвовал в отработке ряда систем по ракетно-космическим программам «Космос-1», «Космос-3», «Н1Л3», «Энергия-Буран», «GSLV», «Ангара» и др.

Образование: Казанский авиационный институт.

Область научных интересов: теория и практика наземных испытаний ракетных двигателей и двигательных установок, гидро- и газодинамика процессов в энергоустановках, исследования в области водородной технологии.

Публикации: более 180, в том числе 6 монографий, 6 учебных пособий, 44 авторских свидетельства и патента на изобретения.

Information about the author: DSc (engineering), professor, Honorary Worker of Higher School, member of the K.E. Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics, the deputy head of the "Management of operation of RSS" department of Moscow Aviation Institute (National Research University); scientific and pedagogical experience more than 40 years. He was a leader and participated in the implementation of a number of contractual works on the orders of the industry, including the following programs: "Energia-Buran", "Magistral", "Sineva", etc.

Education: Moscow Aviation Institute.

Research area: theory and practice of jet devices that can move in the ground at high speeds; testing for complex technical systems.

Publications: more than 180, including 7 monographs, 9 textbooks, 4 patents for inventions.

Information about the author: DSc (engineering), professor, Laureate of Council of Ministers (USSR) in the field of science and technology, member of the K.E. Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics, chief researcher of the PCF "SIC RSI", professor of "Management of operation of rocket and space systems" of Moscow Aviation Institute (National Research University); scientific and pedagogical experience of 40 years. He participated in working out a number of systems for missile and space programs "Space-1", "Space-3", "N1L3", "Energia-Buran", "GSLV", "Angara" and others.

Education: Kazan Aviation Institute.

Research area: theory and practice ground tests for rocket engines and moving-enforcement units, hydro and gas dynamics processes in power plants, research in the field of water-native technology.

Publications: more than 180, including 6 monographs, 6 textbooks, 44 patents for inventions.



Попов Борис
Борисович
Boris B. Popov

Сведения об авторе: канд. техн. наук, начальник сектора ФКП «НИЦ РКП», участвовал в отработке ряда систем по ракетно-космическим программам «Н1Л3», «Энергия-Буран», «GSLV», «Ангара» и др.

Образование: Московский авиационный институт.

Область научных интересов: теория и практика наземных испытаний агрегатов РКС, технология контроля герметичности криогенных агрегатов.

Публикации: более 50, в том числе более 25 авторских свидетельств и патентов.

Information about the author: PhD (engineering), Head of department of the PCF "SIC RSP", participated in working out a number of systems for missile and space programs "N1L3", "Energia-Buran", "GSLV", "Angara" and others.

Education: Moscow Aviation Institute.

Research area: ensuring the reliability of the rocket and space technology, technology of leakproofness control of cryogenic aggregates.

Publications: more than 50, including more than 25 patents.



Галеев Антон
Валерьевич
Anton V. Galeev

Сведения об авторе: аспирант кафедры «Управление эксплуатацией РКС» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Образование: Московский авиационный институт.

Область научных интересов: теория и практика наземных испытаний ракетных двигателей и двигательных установок.

Публикации: 4.

Information about the author: post-graduate of Management of RSS operation department Moscow Aviation Institute (National Research University).

Education: Moscow Aviation Institute.

Research area: theory and practice ground tests for rocket engines and propulsion systems.

Publications: 4.

Введение

Проведение испытаний ДУ на стенде требует соблюдения определенных экологических правил, которые определяются:

- расположением испытательного комплекса относительно промышленных и жилых массивов, розой ветров для данной местности;
- технологией, характером и интенсивностью экспериментальных работ и применяемым испытательным оборудованием и системами;
- компонентами ракетного топлива (КРТ), схемой двигателя и совершенством процессов в них.

Большинство проводимых экспериментальных работ, в частности огневые испытания двигателей и ДУ, приравняются к взрывным работам, поэтому к

испытательным объектам и технологии испытаний предъявляются требования Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».

Как известно, при испытаниях двигателя и ДУ возможны выбросы водорода в процессе запуска или при разгерметизации систем питания, и смеси водорода с воздухом (кислородом) могут взрываться при наличии источников инициирования. При этом опасность взрыва усугубляется тем, что пределы детонации находятся внутри области воспламенения. Так, водород и метан в смесях с кислородом и воздухом в широком диапазоне концентраций взрыво- и пожароопасны (нижние и верхние концентрационные пределы воспламенения и детонации приведены в табл. 1).

Пределы воспламенения и детонации топливных пар

Limits of ignition and detonation of fuel vapor

Таблица 1

Table 1

Топливные пары	Нижний предел, % H ₂ по объему		Верхний предел, % H ₂ по объему	
	Воспламенение	Детонация	Воспламенение	Детонация
H ₂ – O ₂	4,6	15	94	90
H ₂ – воздух	4,1	18,3	74,2	59
Метан – O ₂	5,6	15,0	60	61
Метан – воздух	5	6,3	13	15

В стендовых условиях выбросы водорода очень опасны и могут взрываться в смесях с кислородом (воздухом), так как на стенде всегда есть источники инициирования (струя двигателя, источники высокого давления, источники электропитания и др.).

Безопасность испытаний обеспечивается различными методами, основанными на повышенных требованиях к герметичности систем, контроле опасных накоплений водорода, исключении контакта водорода с воздухом и кислородом в коммуникациях изделия и стенда, применении систем контроля и дожигания водородных выбросов, систем аварийной защиты [1].

В связи с вышеизложенным, повышение эффективности и безопасности испытаний ДУ на стенде требует проведения исследований систем более раннего обнаружения утечек водорода и применения ингибиторов с флегматизатором – азотом – для предотвращения взрыва смесей водорода с воздухом (или кислородом).

Исследования безопасности ДУ на стенде

Наиболее опасными являются стендовые испытания ДУ, так как в случае разгерметизации топливной системы работающий двигатель (выхлопная струя) может явиться инициатором взрыва смесей выброса (пролива) водорода с воздухом (или кислородом) при одновременном или раздельном разрушении топливных баков.

Безопасность испытания ДУ на стенде определяется количеством заправляемого водорода в топливный бак ДУ. При оценке безопасности применяется гипотеза мгновенного разрушения топливных баков окислителя и горючего, пролива и взрыва образуемых смесей водорода с воздухом (кислородом) с учетом тротиловых эквивалентов и коэффициента участия водорода во взрыве ($z = 0,05 \dots 0,42$).

Применительно к стендовой отработке кислородно-водородных ракетных блоков, имеющих в топливных баках от 1 до 10 т жидкого водорода, в соответствии с моделью мгновенного развития событий проведены расчеты опасных зон. Давление во фронте ударной волны при взрыве на поверхности земли может быть оценено по формуле М.А. Садовского:

$$\Delta p_{взр} = \left(\frac{1,06}{R} + \frac{4,3 \cdot \sqrt[3]{B}}{R^2} + \frac{14 \cdot \sqrt[3]{B^2}}{R^3} \right) \cdot \sqrt[3]{B}, \quad (1)$$

где $\Delta p_{взр}$ – давление во фронте ударной волны на расстоянии $\sim R$ (м) от центра взрыва, бар; B – масса заряда тротила, определяемая соотношением $B = z \cdot C_0 \cdot m_{H_2}$ (кг); z – коэффициент участия водорода во взрыве для случая истечения и смешения с $Re \gg Re_{кр}$; Re – критерий Рейнольдса; $C_0 = 10,4$ и $13,3$ кг ТНТ/кг H_2 – тротиловый эквивалент водородно-воздушной и водородно-кислородной смесей в стехиометрическом соотношении соответственно; m_{H_2} – масса выброшенного водорода при аварийной ситуации (кг) [2].

Формула (1) справедлива для значений приведенного расстояния от центра взрыва:

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{B}} = 1 \dots 15. \quad (2)$$

При этих расчетах на ограниченном расстоянии от стенда (1 100 м) допускалось избыточное давление во фронте ударной волны, равное 2 кПа, при котором реализуется вторая степень безопасности и возможно частичное повреждение (менее 10 %) элементов остекления зданий и сооружений.

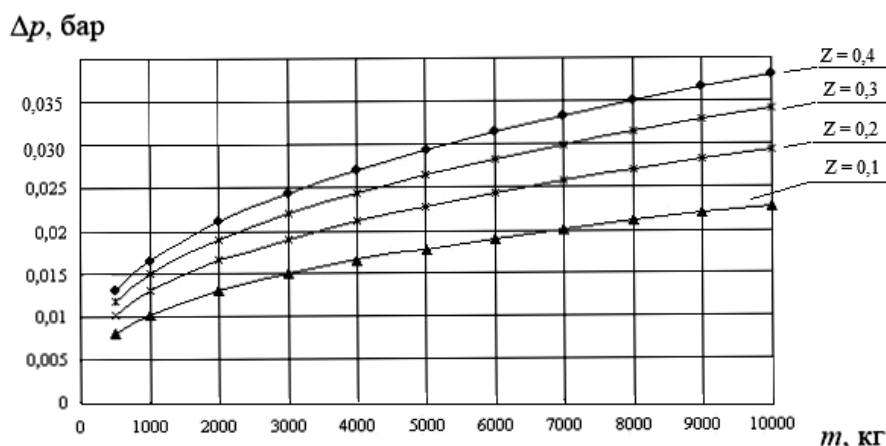


Рис. 1. Результаты расчета избыточного давления Δp во фронте ударной волны в зависимости от массы выброса водорода m_{H_2} и коэффициента участия его во взрыве z при расстоянии до жилого массива $R = 1100$ м (водородно-кислородная смесь)

Fig. 1. The results of the calculation of excess pressure Δp in the shock front as a function of the hydrogen emissions mass m_{H_2} and its participation rate in an explosion at a distance z to the residential area $R = 1100$ m (hydrogen-oxygen mixture)

Результаты расчетов для водородно-кислородной смеси с использованием соотношений (1) и (2) показаны на рис. 1 для разомкнутого (полностью открытого) рабочего объема стенда при коэффициенте использования водорода во взрыве $z = 0,02 \dots 0,1$ и для замкнутого рабочего объема при $z = 0,2 \dots 0,42$.

На основании проведенных расчетов межотраслевой экспертной комиссией по безопасности испытаний в 1991 г было принято решение о возможности проведения холодных и огневых испытаний ДУ разгонных блоков на стенде НИЦ РКП с заправкой топливного бака ДУ жидким водородом в количестве 2 700 кг с риском 10^{-4} (одна авария на 10 000 испытаний). В расчетах экспертами было принято значение $z = 0,3$. Указанные испытания должны проводиться при выполнении специальных мероприятий по безопасности и требований к системам ДУ, стенда и проведению испытаний [1, 2].

Требования к испытаниям и ДУ:

- для первых испытаний ДУ выполняется с упороченными баками, при этом в баках ДУ должны быть установлены разделительные клапаны по магистралям питания окислителя и горючего, клапаны аварийного слива компонентов из баков, дополнительные дренажно-предохранительные клапаны, системы дополнительного наддува баков;
- двигатель должен иметь коэффициент надежности не ниже 0,98, подтвержденный при автономных испытаниях до начала испытаний в составе ДУ; на время испытаний двигатель отделяется от баков защитным устройством (бронеплитой);
- агрегаты и системы ДУ должны быть испытаны автономно на натурных компонентах;
- огневые испытания должны предшествовать холодным испытаниям ДУ для проверки совместного функционирования систем;
- должно быть предусмотрено применение в ДУ систем пожаро- и взрывопредупреждения (СПВП) и аварийной защиты (САЗ).

Требования к системам стенда:

- обеспечение контроля опасных концентраций водорода и кислорода в отсеках стенда и ДУ газоаналитическими датчиками с инерционностью не более 2...4 секунд;
- обеспечение воспламенения и дожигания выбросов водорода из сопла двигателя;
- отвод дренлируемого водорода на стендовый дожигатель;
- подача азота и воды в отсеки и огневой бокс стенда при аварийных ситуациях;
- максимальное раскрытие проемов в стенах и крыше стенда;
- контроль параметров и парирование нештатных ситуаций (НшС);
- блоки информационно-управляющих систем (ИУС) должны быть в искрозащищенном исполнении.

Требования к организации испытаний:

- обеспечение дистанционного проведения заправочных операций и испытания; укрытие персонала, участвующего в проведении испытания, в бункере; полного удаления людей из опасной зоны в радиусе $R_{\text{без}}$; готовности служб пожарной охраны к спасательным работам по ликвидации последствий аварийных ситуаций;
- принятие мер по ограничению продолжительности первого испытания и количества заправляемого в бак ДУ водорода, которое определяется исходя из расположения испытательного стенда (расстояния до жилой зоны) и размерностью испытуемого двигателя.

Следует обратить внимание на то, что указанные выше расчеты проводились с использованием гипотетической модели развития аварийной ситуации, которые не учитывают динамику и кинетику процессов от начала разгерметизации системы до взрыва, а также уменьшение тротилового эквивалента при неполучении стехиометрической смеси. Вместе с тем статистика аварий, произошедших по причине выброса водорода, показывает, что процессы разгерметизации системы, смещения компонентов и взрыв происходят во времени и парирование аварийной ситуации возможно при достаточном быстродействии систем контроля утечек, а коэффициент участия водорода во взрыве z в большинстве случаев не превышает 0,1 [2].

Это позволяет рассматривать вопрос о проведении испытаний на стенде НИЦ РКП ДУ с заправкой блока второй ступени РН водородом (до 7 000 кг) при выполнении дополнительного комплекса мер обеспечения безопасности и парировании нештатных ситуаций, предусматривающих:

- сохранение иерархического принципа построения программ испытаний с постепенным их усложнением;
- внедрение диагностических методов контроля технического состояния двигателя после испытания для оценки остаточного ресурса его систем;
- оснащение САЗ двигателя высокочувствительными первичными преобразователями (датчиками), основанными, например, на оптоволоконной или изотопной технике и обеспечивающими контроль наиболее напряженных параметров криогенного двигателя (износа беговых дорожек узлов качения (подшипников) ТНА, температуры лопаток турбины и др.);
- оснащение САЗ двигателя каналами контроля виброперегрузок в наиболее теплонапряженных системах ДУ (ТНА и камера сгорания);
- внедрение датчиков контроля утечек водорода с инерционностью не более 2 с;
- применение активных средств флегматизации опасных смесей с добавками ингибиторов взрыва-



опасных смесей водорода с воздухом и кислородом в отсеках ДУ и стенда.

В частности, в работах ИСМАН [3] были предложены высокоэффективные составы ингибиторов, которые позволяют регулировать параметры горения и взрыва водородно-воздушных смесей: скорость горения, критические условия воспламенения, переход горения в детонацию. Чл.-корр. РАН В.В. Азатяном было показано [3, 4], что в отличие от сложившихся представлений о чисто тепловой природе горения, лавинообразное размножение активных промежуточных частиц (атомов и радикалов) в ходе их реакций является основным фактором горения и взрыва газов не только при экзотически низких давлениях, но также при атмосферном и повышенном давлении при любом режиме саморазогрева. Поэтому даже в развившемся горении при искусственном прекращении разветвления цепей процесс горения немедленно прекращается, т.е. регулирование параметров горения и взрыва водородно-воздушных смесей достигается обрывом цепного характера воспламенения. В качестве ингибиторов были предложены и испытаны олефиновые соединения, в частности пропилен. Было установлено, что для предотвращения детонации водородно-воздушных смесей достаточная концентрация ингибитора составляет ~ 3 % объемных, а для прекращения процесса горения требуется несколько большее количество ингибитора (до 4 % по объему).

При этом вопросы более раннего обнаружения утечек водорода и применения ингибиторов для предотвращения взрыва смесей водорода с воздухом (или кислородом) являются ключевыми для повышения эффективности современных САЗ в обеспечении своевременного выключения ЖРД [2].

Результаты исследования систем контроля опасных накоплений взрывоопасных газов

Из работ [1, 2] известно, что главными причинами аварийных ситуаций при стендовых испытаниях ЖРД и ДУ, использующих в качестве компонентов топлива жидкие водород и кислород, являются:

- конденсация и накопление твердых кристаллов воздуха или кислорода в жидком водороде, приводящие к последующему образованию пожаро- и взрывоопасных смесей кислорода в водороде при газификации продукта;

- образование пожаро- и взрывоопасных смесей при утечках или выбросах водорода в окружающем пространстве испытательного стенда, в отсеках стенда или объектах испытания (или коммуникациях изделия).

Аварийная ситуация в первом случае возникает, как правило, при многократном использовании системы с водородом, в результате чего происходит накопление твердого осадка кислорода, например в емкостях стендовых хранилищ, а во втором – она чаще происходит при стендовых испытаниях кислородно-водородных ЖРД и ДУ. В условиях испытательных стендов, насыщенных электрическими системами, системами высокого давления и дожигания, вероятность воспламенения или детонации (взрыва) водородно-воздушных смесей очень велика, поэтому важно оснащать ДУ ракетных блоков СПВП. В свою очередь основным элементом СПВП является подсистема контроля опасных накоплений (СКОН) взрывоопасных газов (водорода и кислорода). Следует при этом отметить, что основным недостатком большинства применяемых датчиков (сигнализаторов) СКОН является большая инерционность и недостаточная селективность (могут реагировать на присутствие других газов, например, промышленные водородные полупроводниковые сигнализаторы типа ГА реагируют не только на водород, но и на присутствие кислорода и гелия, и обладают значительной инерционностью (до 30 с) [2, 5].

Проблема быстрого действия и селективности сигнализаторов СКОН, контролирующих концентрации водорода в двигательном отсеке (ДО) блока 12КРБ при проведении стендовых испытаний, была решена в 2000 г посредством:

- основной системы с полупроводниковыми датчиками ИПКВ1 контроля опасных концентраций водорода (разработка МИФИ);

- дублирующей системы контроля температуры в ДО.

При возникновении нештатной ситуации в процессе испытания блока 12КРБ на стенде НИЦ РКП (на 721,3 с от команды «Старт») основная система с датчиком ИПКВ1 зафиксировала появление водорода в ДО с инерционностью 6 с (рис. 2) и дублирующая система контроля температуры – с инерционностью до 1 с (рис. 3) без количественной оценки концентраций водорода [1].



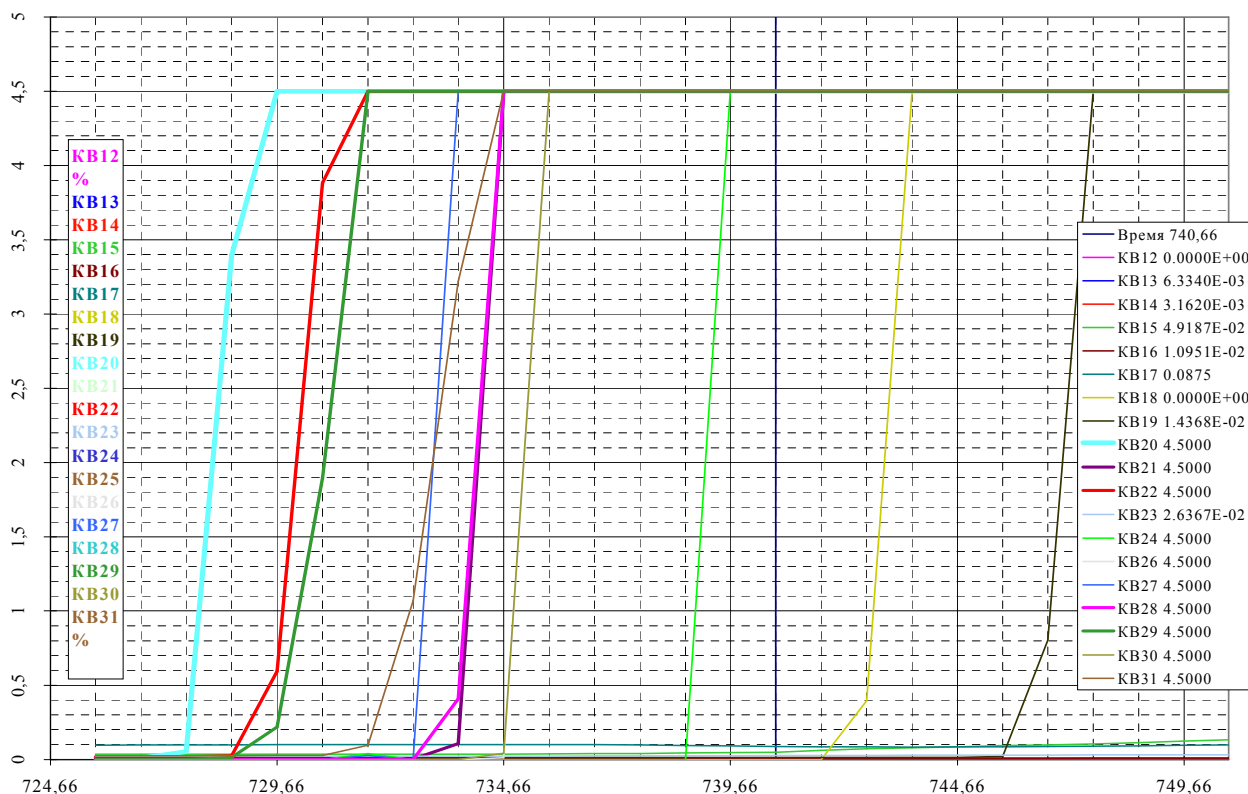


Рис. 2. Значения концентрации водорода в ДО блока и боксе стенда (при разгерметизации полости двигателя на 721,3 с)
Fig. 2. Concentrations of hydrogen in the engine bay and stand (depressurization cavity engine 721.3 c)

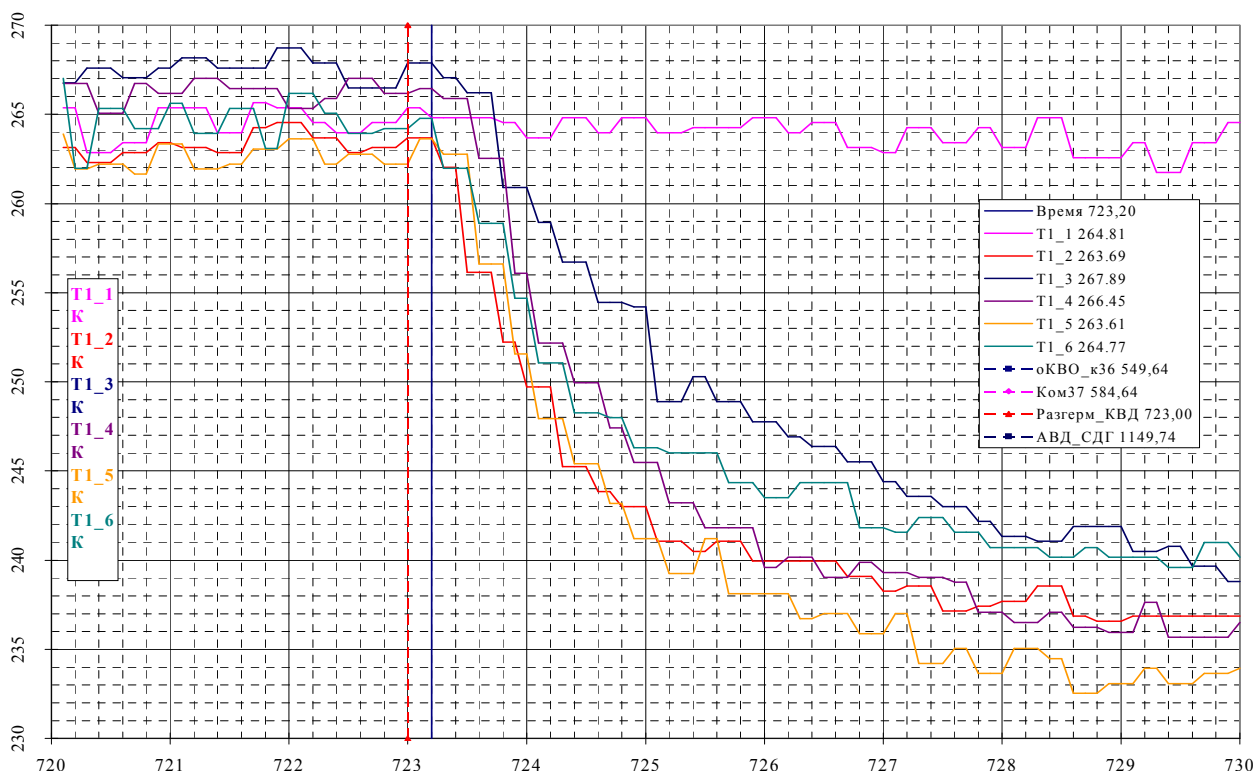


Рис. 3. Температура газовой среды в нише ДО при разгерметизации двигателя КВД1
Fig. 3. Temperature of the gaseous medium in the recess of the engine bay during depressurization KVD1

С учётом обобщения опыта отработки ЖРД и ДУ, функционирующих на жидких водороде и кислороде, были сформулированы главные требования к перспективному газоаналитическим датчикам водорода и кислорода, которые являются основным элементом СКОН, реализующей контроль утечек водорода и кислорода.

Таковыми требованиями являются: широкий диапазон измерения концентраций водорода в воздушной среде – от микропримесей до 100 % объемных; сохранение метрологических характеристик при нахождении чувствительного элемента ГА в стопроцентной водородной среде в течение определенного времени; быстрый возврат в рабочее состояние; нечувствительность к электромагнитным помехам, селективность к целевому компоненту – водороду в смесях с технологическими газами, в первую очередь с гелием.

Одно из главных требований – максимальное быстродействие (инерционность до 2 с), так как СКОН является составной частью СПВП, которая должна оперативно и эффективно реагировать на аварийный выброс в атмосферу помещения испытательного стенда (ИС) или отсеки изделия водорода и воздействовать на этот выброс таким образом, чтобы исключить или снизить вероятность взрыва водородно-воздушной смеси.

Для проведения сравнительных испытаний датчиков СКОН на быстродействие и селективность в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации, на стенде ФКП «НИЦ РКП» смонтирована и внедрена установка УСИД1 (рис. 4). Установка реализует способ испытаний газоаналитических датчиков, описанный в работах [6, 7].

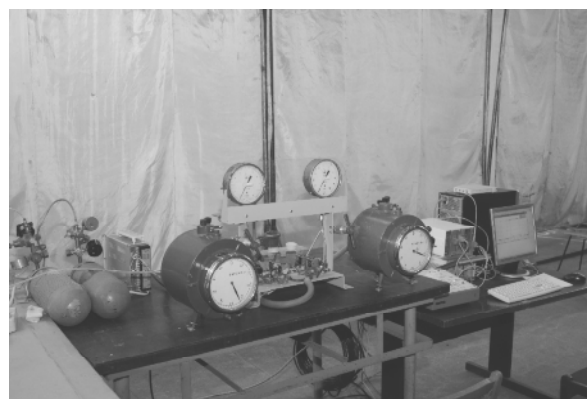
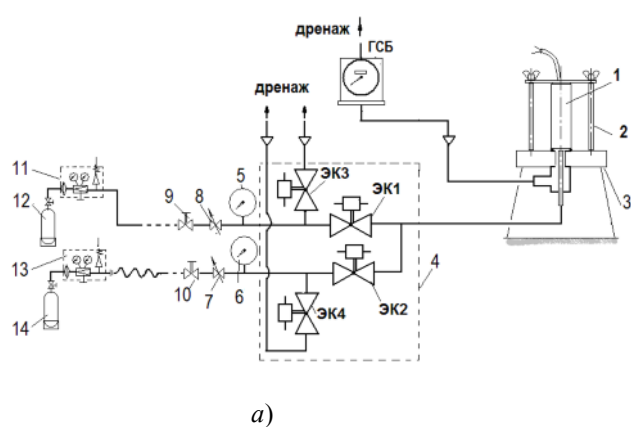


Рис. 4. Пневмогидравлическая схема (а) и общий вид испытательной установки УСИД1 (б):

1 – испытуемый датчик ГА; 2 – traversa для крепления и герметизации датчика; 3 – рабочий стол УСИД1; 4 – счетчик газа типа ГСБ-400; 5, 6 – манометры; 7, 8 – дроссели настройки расхода; 9, 10 – вентили запорные; 11, 13 – редукторы баллонные; 12 – баллон с контрольной смесью; 14 – баллон инертного газа-разбавителя; ЭК1, ЭК2, ЭК3, ЭК4 – электроклапаны запорные

Fig. 4. Pneumohydraulic scheme (a) and a general view of the test set USID1 (b):

1 – test sensor GA; 2 – crossmember for fixing and sealing the sensor; 3 – USID1 device; 4 – the type of gas meter GSB-400; 5, 6 – pressure gauges; 7, 8 – throttles flow setting; 9, 10 – shut-off valves; 11, 13 – balloon reducer; 12 – cylinder control mixture; 14 – inert diluent gas balloon; EK1, EK2, EK3, EK4 – locking solenoid

В установке УСИД1 были проведены сравнительные испытания ряда газоаналитических датчиков на быстродействие и селективность, результаты представлены в табл. 2 [7].

Результаты сравнительных испытаний газоаналитических датчиков

Таблица 2

Table 2

Results of comparative tests of gas analytical sensors

Датчик	Разработчик и изготовитель	Быстродействие, с	Селективность
Датчик на основе диода Шоттки полупроводника n -InP	ФТИ им. А.Ф. Иофе совместно с ООО «АИБИ», г. Санкт-Петербург	3–4 с	Не реагирует на другие газы (гелий, кислород)
Полупроводниковый датчик ИПКВ1	МИФИ	6–8 с	– “ –
Полупроводниковый датчик с чувствительным элементом на основе МДП-структур	ЗАО «ЛЭКИС», г. Москва	6–8 с	– “ –
Термохимический сигнализатор СТМ-10	Завод аналитических приборов, г. Смоленск	8 с	– “ –

Анализ проведенных испытаний показал:

– опытный образец установки УСИД1 обеспечивает проведение сравнительных испытаний на функционирование и быстродействие в пределах 1...30 с газоаналитических датчиков концентрации водорода в воздухе и в инертных газах типа азота;

– оптоэлектронный датчик водорода на основе диода Шоттки полупроводника n -InP имеет время стабилизации выходного сигнала датчика при возрастающей концентрации водорода в воздушной атмосфере в диапазоне 3...4 с;

– инерционность газоаналитических датчиков на основе МДП-структур [8] и датчиков ИПКВ1 разработки ЗАО «ЛЭКИС» и МИФИ, а также сигнализатора СТМ-10 термохимического принципа действия составляет 6...8 с.

Рассмотренные в работе [5, 8] варианты отечественных и зарубежных систем контроля опасных накоплений применяются в энергетике, нефтехимии, телекоммуникации и характеризуются в первую очередь низким быстродействием за счёт циклического опроса измерительных каналов и недостаточного быстродействия собственно датчиков системы.

Кроме того, указанные промышленно выпускаемые системы контроля опасных накоплений обладают низкой помехозащищённостью, не позволяющей применять их в составе стендовых ИУС, поэтому целесообразно использовать гибридную технологию построения быстродействующих высоконадёжных оптоэлектронных стендовых систем контроля опасных накоплений.

В основе гибридной технологии лежит использование микроэлектронных датчиков с оптоволоконными линиями связи, которые заменяют кабельные интерфейсы RS 485, применяющиеся в промышленных СКОН [9]. Технология оптоволоконных линий связи хорошо отработана, их промышленный выпуск

налажен четверть века назад. Преимущества оптических волокон в качестве среды передачи состоят в том, что они нечувствительны к электромагнитным помехам, что позволяет осуществлять помехоустойчивую передачу данных на большие расстояния.

Кроме того, само оптическое волокно не является источником электромагнитных помех, что позволяет с успехом применять его в средах, характеризующихся сложной электромагнитной обстановкой. Так как оптические волокна создаются на основе диэлектрических материалов (синтетический кварц или полимер), их применение позволяет осуществить полную гальваническую развязку между зоной измерения и операторской зоной, а также они обеспечивают измерения в загазованных зонах и установках высоких электрических напряжений. Наконец, при соблюдении определённых ограничений, оптические волокна, в отличие от проводных соединений, не могут быть источником воспламенения или взрыва, поскольку возникновение искры при эксплуатации оптических волокон исключено.

В свою очередь, применение в зоне измерений элементов микроэлектроники, включая разнообразные датчики, также обладает рядом преимуществ. Промышленностью выпускаются газоанализаторы (ГА), обладающие приемлемыми характеристиками по точности, чувствительности, селективности. Гибридные системы позволяют применять последние достижения современной электроники, благодаря чему технология измерений может быть исключительно гибкой.

Сочетание преимуществ оптических волокон и элементов микроэлектроники в составе гибридных оптоволоконных датчиков позволяет им успешно конкурировать с чисто волоконными датчиками [9, 10].

Принципиальная схема такого датчика изображена на рис. 5.

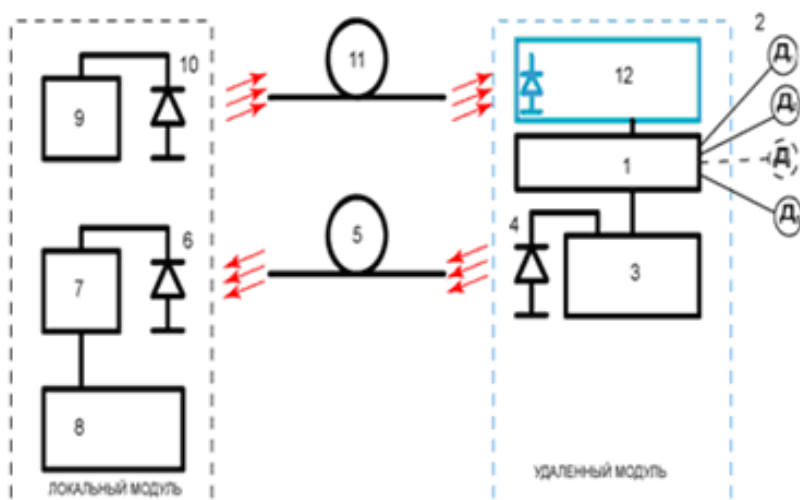


Рис. 5. Принципиальная схема гибридного оптоволоконного датчика:
1 – измерительный блок; 2 – датчики физических величин; 3 – блок кодирования и передачи измерительной информации;

4 – полупроводниковый лазер;

5 – оптическое волокно; 6 – фотодиод;

7 – декодер; 8 – блок отображения;

9 – блок управления

полупроводникового лазера;

10 – мощный полупроводниковый лазер;

11 – оптическое волокно;

12 – блок фотоэлектрического преобразователя

Fig. 5. A schematic diagram of a hybrid fiber-optic sensor:

1 – measuring unit; 2 – sensors of physical quantities; 3 – coding block and signal transmission;

4 – semiconductor laser;

5 – optical fiber; 6 – photodiode;

7 – decoder; 8 – display unit;

9 – the control unit of a semiconductor laser;

10 – high-power semiconductor laser;

12 – unit photovoltaic converter

В датчике удаленный модуль принимает сигналы от измерительных блоков, представляющих собой традиционные чувствительные элементы. В измерительном блоке 1 эти сигналы подвергаются предварительной обработке и направляются в блок кодирования и передачи измерительной информации 3, где она кодируется в специальный формат. Далее в этом формате осуществляется модуляция тока накачки полупроводникового лазера 4, согласованного с оптическим волокном. Затем измерительная информация в световом формате передается по оптическому волокну 5 в локальный блок, находящийся в операторской зоне, где осуществляется обратное преобразование формата передачи информации и последующее отображение и/или использование данных измерений.

В Институте радиотехники и электроники РАН имени В.А. Котельникова совместно с ФКП «НИЦ РКП» разработана физическая модель оптоэлектронного датчика для контроля взрывоопасных газов (например, водорода или метана) по гибридной технологии на основе инфракрасного светодиода с длиной волны излучения в области 3,3 мкм [9].

Результаты проведенных лабораторных исследований физической модели оптоволоконных датчиков показали возможность разработки обоснованного ТЗ на проведение НИОКР по созданию быстродействующей волоконно-оптической СКОН взрывоопасных газов повышенной надежности, ориентированной на их применение в системах аварийной защиты при стендовых испытаниях кислородно-водородного ЖРД РД0146Д и разгонного блока КВТК на стендах ФКП «НИЦ РКП».

Выводы

1. Проведенные исследования показывают, что эффективность систем обеспечения безопасности испытаний ДУ определяется в основном быстродействием средств контроля взрывоопасных газов.

2. Проблема быстродействия и селективности сигнализаторов СКОН, контролирующих концентрации водорода в отсеках ДУ при проведении стендовых испытаний блока 12КРБ, была решена с помощью:

- основной системы с полупроводниковым датчиком контроля опасных концентраций водорода, которая зафиксировала опасные концентрации водорода в газах ДО с инерционностью 6 с;

- дублирующей системы контроля температуры в двигателем отсеке, которая зафиксировала появление водорода с инерционностью до 1 с (без количественной оценки концентраций водорода).

3. Применение в современных СКОН газоаналитических датчиков на основе МДП-структур с дублированием контроля температуры совместно с гибридными оптоволоконными датчиками, обладающими малой инерционностью (до 3...4 с), позволяет повысить эффективность САЗ и коэффициент охвата аварийных ситуаций.

4. Систему контроля опасных накоплений взрывоопасных газов с оптоволоконным датчиком рекомендуется использовать в системах аварийной защиты при стендовых испытаниях кислородно-водородного ЖРД РД0146Д и разгонного блока КВТК на стендах ФКП «НИЦ РКП».

Целесообразно продолжать испытания оптоволоконных и электронных датчиков (разработки ООО «АИБИ» и Института радиотехники и электроники РАН имени В.А. Котельникова) в ФКП «НИЦ РКП» с целью отработки конструктивных решений и обеспечения быстродействия до 2 с.

Для проведения сравнительных испытаний перспективных датчиков СКОН и получения их характеристик в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации, целесообразно использовать экспериментальную установку УСИД1, внедренную в эксплуатацию на стенде ФКП «НИЦ РКП».

Список литературы

1. Галеев А.Г. Об опыте отработки ракетных двигателей и энергетических установок на водородном топливе и проблемы обеспечения их безопасности // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAE). 2007. № 7. С. 8–14.
2. Галеев А.Г., Денисов К.П., Ищенко В.И., Лисейкин В.А., Сайдов Г.Г., Черкашин А.Ю. Испытательные комплексы и экспериментальная отработка жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение / Машиностроение-Полет, 2012.
3. Азатян В.В., Мержанов А.Г. Разветвлено-цепная природа горения водорода при атмосферном давлении // Хим. Физика. 2008. Т. 27, № 11. С. 93–96.
4. Азатян В.В., Галеев А.Г. Эффективные методы химического управления воспламенением и детонацией газовых смесей водорода с воздухом и кислородом // Сборник тезисов докладов Российской научно-технической конференции «Ракетно-космическая техника и технология 2011». г. Самара, СГАУ. 2011. С. 124–127.
5. Попов Б.Б. Контроль концентраций водорода на стендах ракетно-космических систем // Полет. 2009. Специальный выпуск. С. 18–24.
6. Патент 89708 РФ МКИ J01N27/02. Установка для сравнительных испытаний газоаналитических датчиков с имитацией натуральных условий / Галеев А.Г., Попов Б.Б. // Изобретения. 2009. № 3.
7. Патент 2542604. РФ МКИ J01N27/02. Способ испытаний на быстродействие газоаналитических датчиков с временем отклика менее 4 секунд / Бережной В.Н., Городецкий А.П., Попов Б.Б., Ермолин А.Н. // Открытия. Изобретения. 2015. № 5.
8. Сравнительные испытания газоаналитических датчиков СКОН водорода. Технический отчет. ФКП «НИЦ РКП», инв. № ТО.106.ЛАИ.164.13, 2013.



9. Емелин Е.В., Николаев И.Н. Чувствительность МДП-сенсоров к концентрациям различных газов в воздухе // Датчики и системы. 2005. № 10. С. 37.

10. Задворнов С.А., Соколовский А.А. О пожаровзрывобезопасности волоконно-оптических гибридных измерительных систем // Датчики и системы. 2007. № 3. С. 11–13.

11. Сайдов Г.Г., Поляхов А.Д., Катенин А.В. Повышение качества наземной обработки изделий ракетно-космической техники // Конференция «Вопросы образования и науки: теоретический и методический аспекты». Тамбов, 2014.

References

1. Galeev A.G. Ob opyte otrabotki raketnyh dvigatelej i energetičeskikh ustanovok na vodorodnom toplive i problemy obespečeniâ ih bezopasnosti. *International Scientific Journal «Alternativnââ energetika i ekologiâ» (ISJAE)*, 2007, no. 7, pp. 8–14 (in Russ.).

2. Galeev A.G., Denisov K.P., Ischenko V.I., Liseikin V.A., Saidov G.G., Cherkashin A.Yu. Ispytatel'nye komplekсы i eksperimental'nââ otrabotka židkostnyh raketnyh dvigatelej. Moscow: Mašinostroenie / Mašinostroenie-Polet Publ., 2012 (in Russ.).

3. Azatyan V.V., Merzhanov A.G. Razvetvleno-cepnaâ priroda gorenîâ vodoroda pri atmosfernom davlenii. *Him. Fizika*, 2008, vol. 27, no. 11, pp. 93–96 (in Russ.).

4. Azatyan V.V., Galeev A.G. Èffektivnye metody himičeskogo upravlenîâ vosplameneniem i detonaciej gazovyh smesej vodoroda s vozduhom i kislorodom.

Sbornik tezisev dokladov Rossijskoj naučno-tehničeskoi konferencii “Raketno-kosmičeskââ tehnika i tehnologiâ 2011”. Samara, SGAU, 2011, pp. 124–127 (in Russ.).

5. Popov B.B. Kontrol' koncentracij vodoroda na stendah raketno-kosmičeskikh sistem. *Polet*, 2009, special issue, pp. 18–24 (in Russ.).

6. Galeev A.G., Popov B.B. Patent 89708 RF MKI J01N27/02. Ustanovka dlâ sravnitel'nyh ispytaniy gazoanalitičeskikh datčikov s imitaciej naturnyh uslovij. *Izobretenîâ*, 2009, no. 3 (in Russ.).

7. Berezhnoy V.N., Gorodecky A.P., Popov B.B., Ermolin A.N. Patent 2542604. RF MKI J01N27/02. Sposob ispytaniy na bystrodejstvie gazoanalitičeskikh datčikov s vremenem otklika menee 4 sekund. *Otkrytiâ. Izobretenîâ*, 2015, no. 5 (in Russ.).

8. Sravnitel'nye ispytaniâ gazoanalitičeskikh datčikov SKON vodoroda. Tehničeskij očet. FKP «NIC RKP», inv. No. TO.106.LAI.164.13, 2013 (in Russ.).

9. Emelin E.V., Nikolaev I.N. Čuvstvitel'nost' MDP-sensorov k koncentraciâm različnyh gazov v vozduhe. *Datčiki i sistemy*, 2005, no. 10, pp. 37 (in Russ.).

10. Zadvornov S.A., Sokolovsky A.A. O požarovzryvobezopasnosti volokonno-optičeskikh gibridnyh izmeritel'nyh sistem. *Datčiki i sistemy*, 2007, no. 3, pp. 11–13 (in Russ.).

11. Saidov G.G., Polyahov A.D., Katenin A.V. Povyšenie kačestva nazemnoj otrabotki izdelij raketno-kosmičeskoi tehniki. *Conference of “Voprosy obrazovaniâ i nauki: teoretičeskij i metodičeskij aspekty”*, Tambov, 2014 (in Russ.).

Транслитерация по ISO 9:1995



Содержание Международного научного журнала «Космонавтика» № 1, 2011 (в рамках акции «Архивные номера»)

Коротеев А.С.

Ядерная энергетика способна обеспечить качественный скачок в развитии космонавтики

Домашенко А.М.

Безопасные технологии обращения с водородом при его ожижении, хранении и транспортировании

Bolonkin A.

Converting matter to nuclear energy by ab-generator and its application for aerospace

Krinker M.

Review of new concepts, ideas and innovations in space towers

Nechaev Y.S.

High-density hydrogen within carbonaceous nanostructures: the very powerful vehicle and rocket fuel

Дмитриев В.С., Нестеренко Т.Г., Плотников И.В.

Экономические аспекты и перспективы развития космонавтики