

УДК 629.7.036.54

ОБЗОР РАЗРАБОТОК ПО ИСПЫТАНИЮ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ВОДОРОДНОМ ТОПЛИВЕ И ПРОБЛЕМАМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ БЕЗОПАСНОСТИ

А.Г. Галеев

ФКП «Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности»
РФ 141320, Московская область, г. Пересвет, ул. Бабушкина, д. 9
тел.: (8-496) 546-34-75; e-mail: a.galeev@nic-rkp.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.12.002

Заключение совета рецензентов: 25.06.15 Заключение совета экспертов: 02.07.15 Принято к публикации: 09.07.15

В настоящем обзоре представлены работы автора по особенностям экспериментальной отработки (ЭО) кислородно-водородных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) 11Д56, 11Д57, РД0120, КВД1 и ряда двигательных и энергетических установок, а также сравнение их отработки с зарубежными данными. Показана роль модельных исследований, автономных испытаний агрегатов, систем и двигателя, в том числе с имитацией полетных условий эксплуатации, и комплексных испытаний при ЭО перспективных двигателей и двигательных установок (ДУ) разгонных блоков. Приведены способы и устройства для обеспечения безопасности наземных испытаний ракетных двигателей и энергетических установок с применением эффективных систем диагностики и аварийной защиты испытаний.

Ключевые слова: ракетный двигатель, энергетическая установка, испытание, безопасность, имитация, водород, диагностика, аварийная защита испытаний.

REVIEW OF DEVELOPMENT ON TESTING ROCKET ENGINES AND POWER PLANTS ON HYDROGEN FUEL AND THE PROBLEM OF ENSURING THEIR SAFETY

A.G. Galeev

FCP Research and Testing Center of Rocket and Space Industry
9 Babushkin Str., Peresvet, Moscow region, 141320 Russian Federation
ph.: (8-496) 546-34-75; e-mail: a.galeev@nic-rkp.ru

Referred 25 June 2015 Received in revised form 2 July 2015 Accepted 9 July 2015

The review presents the author's works on features of experimental testing of oxygen-hydrogen liquid rocket engines (LRE) 11D56, 11D57, RD0120, KVD1, RD0146D and a number of propulsion units and power plants, as well as comparison of their testing with foreign data. Moreover this review shows the role of model studies, autonomous testing of units, systems and engine, including the simulation of flight conditions, and complex tests with experimental testing of advanced engines and propulsion systems (PS) of control boosters. There are ways and devices for the safety of ground tests of rocket engines and power plants with the use of effective diagnostic systems and emergency protection tests.

Keywords: rocket engines, power plants, testing, safety, simulation, hydrogen, diagnostic, emergency protection tests.



Галеев Айвенго
Гадыевич
Aivengo G. Galeev

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 более 40 лет.

Участвовал в отработке ряда систем по ракетно-космическим программам «Космос-1», «Космос-3», «Н1Л3», «Энергия-Буря», «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 190, в том числе 7 монографий, 6 учебных пособий, 44 авторских свидетельства и патента на изобретения.

Information about the author: DSc (engineering), professor, Laureate of USSR Council of Ministers in the field of science and technology, a 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 of 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 190, including 7 monographs, 6 textbooks, 44 patents for inventions.

Введение

К проблемным вопросам при создании ракетных двигателей на водородном топливе относятся: определение характеристик наиболее напряженных узлов и агрегатов ЖРД, разработка эффективных каналов аварийной защиты и методов диагностирования технического состояния двигателя, имитация полетных условий эксплуатации и обеспечение безопасности испытаний.

1. Отработка кислородно-водородных двигателей 11Д56 и их модификаций, 11Д57, РД0120, КВД1 и РД0146Д

Первые ракетные двигатели RL-10 (тяга 68 кН) и J-2 (тяга 1 020 кН) с использованием кислородно-водородного топлива были созданы в США в 60-х годах XX века. При этом следует отметить, что исследования по применению водорода в качестве ракетного топлива были начаты в США по инициативе Министерства энергетики еще в 1944 г.

В нашей стране применение кислородно-водородного топлива на верхних ступенях ракеты «Н1-Л3» стали рассматривать в 60-х годах XX века. Соответствующие разработки кислородно-водородных ЖРД 11Д56 тягой 73,5 кН и 11Д57 тягой 392 кН были начаты в ОКБ А.М. Исаева и ОКБ А.М. Льюльки в 1962 г., применение которых планировалось на втором этапе при последующей модернизации ракетного комплекса.

Для отработки указанных двигателей в НИИХМ был создан комплекс кислородно-водородных стендов, предусматривающий системный подход в отработке двигателей и их агрегатов на натурных компонентах топлива (стенды В1, В2, В3, В4 и В5). В течение 1962–1967 годов на стендах В1а и В1б были проведены эксперименты по отработке: камер сгорания (КС), газогенераторов (ГГ), турбонасосных агрегатов (ТНА) и двигателей 11Д56 и 11Д57 по замкнутой схеме при кратковременных испытаниях.

С 1964 г. автор данного обзора принимал участие в наземной отработке двигателей 11Д56 и 11Д57 и их модификаций при проведении модельных испытаний элементов, агрегатов и систем, автономных испытательных агрегатов, систем и двигателя в должности начальника стенда В1. На основе этих исследований и разработок в 1974 г. автором была защищена кандидатская диссертация [1].

Комплексные испытания двигателей на первом этапе, как правило, проводятся без имитации условий эксплуатации на входе в двигатель по магистралям окислителя и горючего, а также высотных условий в выходном сечении сопла двигателя. На заключительном этапе условия эксплуатации имитировались специальными устройствами: пусковыми баками в системе питания стенда и выхлопными диффузорами с откачивающими установками в выхлопном тракте двигателя (рис. 1), которые использовались при стендовой отработке двигателей 11Д56, 11Д57 и их модификаций [2].



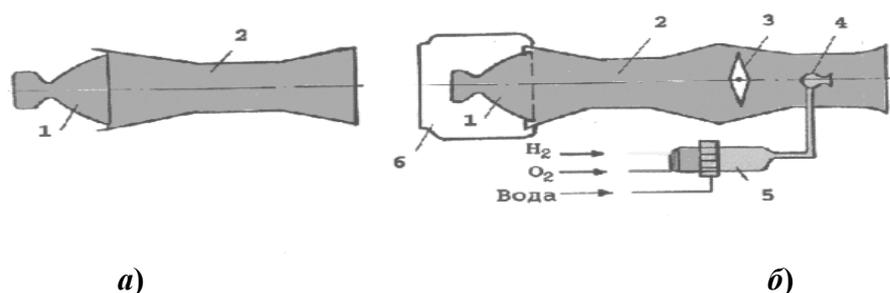


Рис. 1. Схема имитации высотных условий при испытании двигателя:
 а) – с выхлопным диффузором; б) – с барокамерой и парожеткаторной установкой;
 1 – двигатель; 2 – выхлопной диффузор; 3 – клапан-заслонка; 4 – эжектор; 5 – парогенератор;
 6 – барокамера

Fig. 1. Diagram of the simulation of high-altitude conditions during the test engine:
 а) – an exhaust diffuser; б) – with the pressure chamber and steam jet setting;
 1 – the engine; 2 – exhaust diffuser; 3 – throttle valve; 4 – ejector; 5 – steam generator;
 6 – pressure chamber

Комплексным огневым испытаниям двигателя в составе ДУ обычно предшествуют холодные испытания ДУ с целью отработки и проверки режимов заправки, наддува, слива и вытеснения компонентов топлива из баков ракеты, систем теплоизоляции баков, поддержания и регулирования расхода и соотношения компонентов топлива, захлаживания магистралей питания двигателя [3].

В последующем на указанных стендах с участием автора отрабатывались системы ядерного ракетного двигателя 11Д410, ЖРД РД0120 (РН «Энергия»), ЖРД КВД1 (РН GSLV по контракту с Индией), системы ДУ блоков «Р», 12КРБ и «Ц» РН «GSLV» и «Энергия» [4–12], системы МГД-генератора на кислородно-водородном топливе с ионизирующей добавкой калиево-натриевой эвтектики [13–14], теплозащитные композиционные углерод-углеродные материалы для скоростных блоков летательных аппаратов (ЛА) в высокоскоростной струе ЖРД [15, 16].

Автономная отработка агрегатов и систем двигателя РД0120 (КС, ТНА, ГГ) по большей части была проведена на стенде В2 при огневых испытаниях двигателя (74 испытания).

Ввиду отсутствия полноразмерного стенда комплексные испытания двигателя РД0120 с целью отработки конструкции проводились на первом этапе с последовательным увеличением уровня тяги (20 %, 50 %, 75 % и 100 %), что несколько увеличило сроки отработки и общее количество двигателей для этапа доводочных испытаний. На втором этапе на стендах В2 НИИХМ были проведены доводочные и контрольно-технологические испытания (ДИ и КТИ), на стендах 201 и 301 НИИмаш – завершающие доводочные (ЗДИ), ресурсные и контрольно-выборочные испытания (КВИ) двигателя РД0120 и на универсальном комплексе стенд-старт (УКСС) – испытания двигателя РД0120 в составе ДУ блока «Ц» [8, 9], которые позволили успешно провести летные испытания РКК «Энергия».

Следует отметить, что выбор тех или иных видов модельных и автономных испытаний в процессе отработки двигателя зависит от его параметров и схемного исполнения, возможностей стендового комплекса и оборудования, а также опыта и конструктивного задела разработчика по системам двигателя.

В практике создания двигателей известны два метода стендовой доводки, которые можно кратко охарактеризовать как последовательный и параллельный методы.

Основное отличие заключается в том, что в случае *последовательного метода* доводки при выявлении дефекта двигателя испытания *прекращаются* до разработки и внедрения на двигателях и агрегатах мероприятий по устранению этого дефекта, а в случае *параллельного метода* доводочные испытания *не прерываются*, и мероприятия по устранению дефекта разрабатываются и внедряются в процессе продолжения ДИ двигателя.

Так, при создании кислородно-керосинового двигателя F-1 (тяга 6 770 кН) и кислородно-водородного двигателя J-2 (тяга 1 020 кН), предназначенных для ступеней РН «Сатурн-5», и двигателей 11Д56, 11Д57, РД0120 в основном был применен параллельный метод доводки, а при создании двигателя многократного применения SSME (тяга 2 090 кН, $p_k = 23$ МПа) – последовательный метод.

Для доводки двигателей J-2 и F-1 было затрачено 43 и 59 двигателей при суммарной наработке 127 000 и 153 200 с соответственно. На доводку двигателя SSME было затрачено 13 двигателей (по другим источникам 20) и 20 комплектов ТНА для замены дефектных. Такое малое количество двигателей, затраченных на доводку SSME, можно объяснить:

- накопленным опытом при отработке экспериментального кислородно-водородного двигателя с тягой 2 090 кН;

- последовательным методом доводки двигателя и наличием испытательных стендов для испытаний



двигателя и ДУ на номинальной тяге;

– повышенным значением средней наработки одиночного двигателя (8 000 с), полученным к 1-му полету и обеспечиваемым ремонтпригодностью, восстанавливаемостью конструкции и применением эффективных систем диагностики и аварийной защиты (САЗ).

Для испытаний высотных двигателей с $f_a = 100 \dots 114$, как правило, используется схема имитации (см. рис. 1а), обеспечивающая безотрывное истечение газов из сопла после запуска диффузора на маршевом режиме. По этой схеме тестировались двигатели первого поколения 11Д58М, 11Д49, 11Д56, 11Д57 и КВД1 разгонных блоков РН «Зенит»,

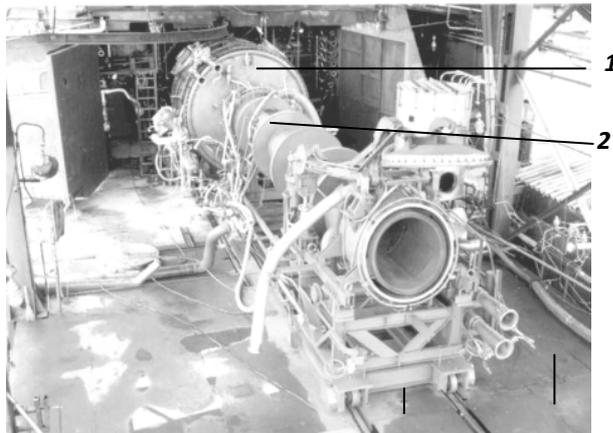


Рис. 2. Система имитации высотных условий для отработки двигателя КВД1 на стенде НИЦ РКП:

1 – барокамера; 2 – диффузор

Fig. 2. The system of high-altitude simulation environment for testing the engine on the stand SIC RCP:

1 – pressure chamber; 2 – diffuser

Двигатели, предназначенные для вышеуказанных РБ, характеризуются следующими особенностями:

– безгазогенераторной схемой с подачей водорода, подогретого в тракте охлаждения камеры до температуры 400 К, в качестве рабочего тела для привода турбин турбонасосных агрегатов (ТНА);

– оснащением камеры сгорания неохлаждаемыми сопловыми насадками и электроплазменным зажиганием;

– отдельными турбонасосными агрегатами ТНА «О» и ТНА «Г» и последовательной подачей рабочего тела на турбины ТНА окислителя и горючего.

Безгазогенераторная схема обладает более высокой надежностью и лучшими эксплуатационными характеристиками при простоте конструкции. В схеме отсутствует газогенератор как один из самых нагруженных агрегатов и соответственно отпадает не-

«Космос-3М» и GSLV, в которых функционирование двигателя при отрывном течении газов из сопла (на запуске) обеспечивалось устройствами для местного охлаждения и раскрепления сопла [2]. На рис. 2 показана система имитации высотных условий стенда НИЦ РКП с барокамерой 1 и диффузором 2, применявшаяся для отработки двигателя КВД1 РН GSLV.

В создаваемом разгонном блоке КВТК предусматривается использование перспективного двигателя РД0146Д (тяга 75 кН, $f_a = 475$), снабженного неохлаждаемым сопловым насадком (НСН) с большой степенью расширения сопла и выполненного из углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ) (рис. 3) [17].

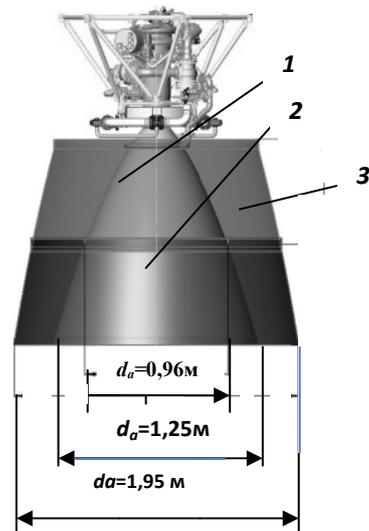


Рис. 3. Двигатель РД0146Д, снабженный:

1 – охлаждаемым соплом с $d_a = 0,96$ м;

2 – стационарным НСН с $f_a = 170$ ($d_a = 1,25$ м);

3 – выдвижным НСН с $f_a = 475$ ($d_a = 1,95$ м)

Fig. 3. Engine RD0146D equipped with:

1 – a cooled nozzle $d_a = 0,96$ м;

2 – stationary NSN with $f_a = 170$ ($d_a = 1,25$ м);

3 – retractable NSN with $f_a = 475$ ($d_a = 1,95$ м)

обходимость отработки устойчивости его работы, снижения забросов температур при запуске и выключении. Упрощается система воспламенения компонентов, что особенно важно для двигателей с высотным запуском. Исключаются проблемы, связанные с удалением воды, которая остается после предыдущего включения в полостях двигателя с газогенератором. Применение двигателя безгазогенераторной схемы при его надлежущей отработке снижает риски испытаний, исключая опасности, связанные с разгерметизацией высокотемпературного тракта генераторного газа.

При наземной отработке двигателя РД0146 на стенде НИЦ РКП предполагается использовать два варианта исполнения укороченного сопла. В первом варианте на двигателе устанавливается камера сгорания с охлаждаемым соплом 1 (см. рис. 3) с $f_a = 114$



(диаметр выходного сечения сопла $d_a = 0,96$ м) и расчётным давлением на срезе сопла 0,025 бар на основном режиме и 0,012 бар на режиме конечной ступени тяги. Во втором случае на двигателе устанавливается НСН 2 с $f_a = 170$ ($d_a = 1,25$ м) с расчётным давлением на срезе сопла 0,014 бар на основном режиме.

Для отработки вариантов двигателей с соплами $f_a = 114$ и $f_a = 170$ предусматривается использование системы имитации высотных условий (см. рис. 1а и 1б соответственно).

При этом можно выделить основные задачи испытаний:

- отработка двигателя РД0146Д на ресурс продолжительностью до 1 400 с и проверка режимов настройки двигателя;

- отработка режимов захолаживания, многократного запуска и остановки с экспериментальным подтверждением функционирования двигателя с НСН и удельных характеристик двигателя.

При этом следует отметить, что нормальное функционирование двигателя с НСН, выполненного из композиционного материала, в процессе запуска обеспечивается исключением отрывного течения газов в сопловом насадке за счет применения системы имитации с парожеткаторной установкой и смесителем-конденсатором 7 (см. рис. 1б).

Для оптимизации режимов работы и настройки систем имитации высотных условий очень важно создать адекватную математическую имитационную 3D модель выхлопного газодинамического тракта на стенде для определения параметров течения (давление запуска диффузора $p_{\text{кзав}}$) и обеспечения наземной экспериментальной отработки двигателя РД0146Д [2, 17].

2. Проблемы обеспечения безопасности испытаний на водородном топливе

Аварийные ситуации при испытаниях на водородном топливе могут быть вызваны:

- конденсацией и накоплением кристаллов воздуха или кислорода в жидком водороде;

- образованием взрыво- или пожароопасных смесей при утечках или выбросах водорода в окружающее пространство.

Аварийная ситуация в первом случае возникает, как правило, при многократном использовании системы с водородом, а во втором случае – при одновременном разрушении водородного и кислородного баков и выбросах компонентов при испытаниях.

Безопасность испытаний обеспечивается различными методами, основанными на повышенных требованиях к герметичности систем, контроле опасных накоплений водорода, исключении контакта водорода с воздухом в коммуникациях стенда и изделия и применении систем воспламенения и дожигания водородных выбросов.

Разработки методов и средств обеспечения безопасных условий испытаний и обобщения опыта от-

работки кислородно-водородных ДУ и ЭУ были представлены в докторской диссертации автора [18].

Анализ статистики отказов при испытаниях ЖРД показывает, что ~ 60 % приходится на ТНА и камеру сгорания, и связаны они в основном с возгоранием, прогаром и износом вращающихся узлов (узлы качения и уплотнения), на которые параметры рабочего процесса реагируют слабо либо с большим запаздыванием [1]. Поэтому для повышения эффективности САЗ наибольший интерес представляет проблема диагностики технического состояния двигателя на основе методов раннего обнаружения отказов с использованием быстродействующей аппаратуры, эффективных средств контроля и диагностики, рассмотренных автором в ряде работ [19–43].

Внедрение в САЗ контроля вибросостояния двигателя и средств контроля, например, износа беговых дорожек узлов качения, теплового состояния лопаток турбины ТНА и утечек водорода из систем двигателя с инерционностью не более 1 с и аппаратуры в САЗ с инерционностью до 0,02 с позволит значительно увеличить коэффициент охвата и предотвращения аварийных ситуаций в процессе испытаний.

В обычных условиях смеси водорода с воздухом и кислородом являются смесями квазиравновесного состава, для воспламенения которых необходим внешний источник энергии. Минимальная энергия и температура тела, приводящие к самовоспламенению смеси и определенные экспериментально, составляют 0,02 мДж и 700 К соответственно [1, 4]. Более опасной по своим последствиям является детонация (взрыв) водородных смесей, для возникновения которой, помимо наличия горючей смеси, необходим соответствующий источник инициирования.

В начальной стадии работ с водородом не было единого мнения о целесообразности дожигания выбросов водорода. В процессе испытаний, как правило, дожигаются выбросы водорода с расходами более 0,5 кг/с, при меньших расходах водород выбрасывается в атмосферу с балластировкой инертным газом – азотом.

Исследования распределения концентраций водорода в затопленной сверхзвуковой струе, истекающей из сопла, показали, что для воспламенения выбросов водорода за соплом двигателя необходим источник с длиной факела не менее 0,3 м [1].

Воспламенение выбросов водорода – которое во многом зависит от протекания переходных режимов в системе подачи водорода – за соплом камеры может происходить с взрывом в процессе запуска. Так, при нерегулируемом запуске процесс смесеобразования водорода с воздухом происходит с колебаниями, и наблюдаются задержки воспламенения до $\tau_3 = 0,5 \dots 0,9$ с, что приводит к участию большого объема смеси водорода с воздухом и, как следствие, к повышенной величине ударной волны ($\Delta P = 40 \dots 60$ кПа).

При регулируемом запуске обеспечивалось устойчивое воспламенение выбросов водорода за соплом с $\tau_3 = 0,12 \dots 0,25$ ($\Delta P = 5 \dots 20$ кПа).



Кроме того, было выявлено, что с увеличением градиента нарастания расхода (q) задержка воспламенения выбросов уменьшается. Экспериментальные зависимости $\Delta P = f(m_0)$ и $\tau_s = f\left(\frac{dm}{d\tau}\right)$ приведены на рис. 4 и 5, последняя из которых аппроксимируется уравнением

$$\tau_s = \frac{0,77}{q} - 0,075, \text{ где } q = \frac{dm}{d\tau} \cdot 10^{-1} \frac{\text{кг/с}}{\text{с}}.$$

На основании исследований для класса двигателей с расходом водорода до 14 кг/с было уста-

новлено, что оптимальным режимом выхода редуктора подачи является градиент нарастания расхода $\frac{dm}{d\tau} = 20 \dots 40 \frac{\text{кг/с}}{\text{с}}$.

Предложенная схема запуска с регулируемым выводом редуктора подачи горючего на режим была реализована при испытаниях камеры двигателя 11Д57 и позволила уменьшить величину ударной волны в процессе воспламенения выбросов водорода за сопловым устройством на 30...40% [1, 8 и 9].

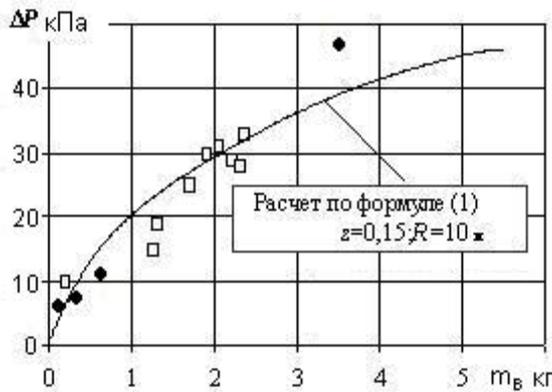


Рис. 4. Зависимость $\Delta P = f(m_0)$

- регулируемый запуск;
- нерегулируемый запуск

Fig. 4. Dependence $\Delta P = f(m_0)$

- adjustable startup;
- nonadjustable startup

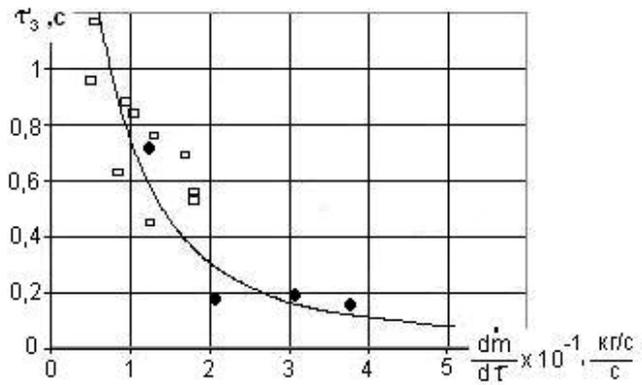


Рис. 5. Зависимость $\tau_s = f\left(\frac{dm}{d\tau}\right)$

Fig. 5. Dependence $\tau_s = f\left(\frac{dm}{d\tau}\right)$

3. Обеспечение безопасности испытаний ДУ на стенде

Наиболее опасны испытания ДУ на водородном топливе, так как возможна разгерметизация топливной системы при отказе двигателя и взрыв проливов водорода и кислорода. Поэтому огневое испытание ДУ проводится с выполнением специальных мероприятий по безопасности:

- первые испытания ДУ выполняются с более упрочненными баками;
- до начала испытаний ДУ двигатель должен иметь коэффициент надежности не ниже 0,985, подтвержденный автономными испытаниями;
- агрегаты и системы ДУ должны быть испытаны автономно на натуральных компонентах топлива.

Огневые испытания должны предшествовать холодным испытаниям ДУ для проверки совместного функционирования систем. В баках ДУ должны быть установлены системы аварийного слива компонентов и дополнительного наддува баков. ДУ должна быть оснащена системами пожаровзрывопреупреждения (СПВП) и САЗ, которые обеспечивают контроль определенных параметров двигателя, ДУ и систем стенда и прекращение испытания при их отклонениях от заданных величин. Планируется при этом ис-

пользовать постепенное усложнение программ испытаний. На рис. 6 представлена схема установки криогенного разгонного блока (КРБ) на стенде НИЦ РКП для проведения комплексных холодных и огневых испытаний.



Рис. 6. Ракетный блок на стенде
Fig. 6. Rocket block on the stand



Момент аварии носит случайный характер, а процесс ее развития практически неуправляем. Поэтому при испытаниях рассматривают предельную модель с мгновенным разрушением баков, испарением и смешением всей массы пролитого топлива и взрывом облака стехиометрической горючей смеси.

Для расчетов опасных зон были использованы значения коэффициента участия во взрыве массы выброшенного водорода $z = 0,3 \dots 0,5$. В нормативных требованиях по взрывобезопасности химических и металлургических производств рекомендованы значения $z = 0,1 \dots 0,3$, а в методиках МЧС $z = 0,02 \dots 0,1$. В то же время статистика аварий показывает, что

события, предшествующие взрыву, происходят достаточно медленно. Это позволяет парировать развитие аварийной ситуации, а коэффициент использования водорода во взрыве в большинстве случаев не превышает значения $z = 0,1$.

С учетом вышеизложенного, можно принять $z = 0,02 \dots 0,1$ для открытых стендов и $z = 0,3 \dots 0,5$ для закрытых стендов.

В соответствии с моделью мгновенного развития событий проведены расчеты опасных зон для испытаний ракетных блоков, имеющих в топливных баках от 1 000 до 10 000 кг жидкого водорода, результаты которых приведены на рис. 7.

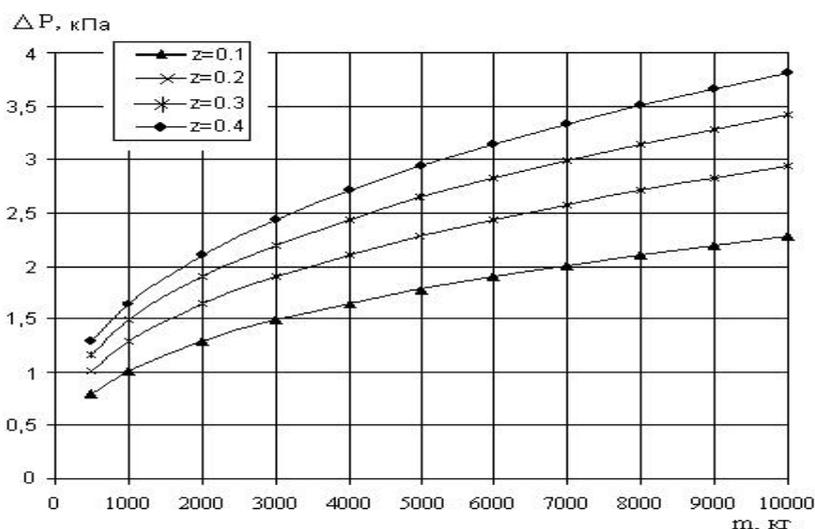


Рис. 7. Зависимость ударной волны ΔP от взрыва выброса водорода (m_b) при различных z

Fig. 7. Dependence of the shock wave ΔP on the explosion of hydrogen emission (m_b) for different z

Принимая во внимание внедрение разработанных мер безопасности по стенду и ДУ и проведенные расчеты в 1991 г., межотраслевая экспертная комиссия по безопасности приняла решение о возможности проведения холодных и огневых испытаний ДУ ракетных блоков на стенде НИИХМ с заправкой топливного бака ДУ жидким водородом в количестве 2 700 кг. При этом обеспечивалась 2-я степень безопасности на расстоянии 1 100 м от стенда со степенью риска, равной 10^{-4} (1 отказ на 10 000 испытаний) [6].

Итак, на практике коэффициент использования водорода во взрыве в большинстве случаев не превышает значения $z = 0,1$. Это позволяет рассматривать вопрос о проведении испытаний на вышеуказанном стенде ДУ перспективных ракетных блоков с заправкой топливного бака водородом (до 7 000 кг) при выполнении дополнительных мер безопасности и парировании нештатных ситуаций [5, 6], предусматривающих:

- обеспечение максимально открытого исполнения испытательного бокса для исключения накопления взрывоопасных смесей в процессе испытания;
- сохранение иерархического принципа построения

программ испытаний с их постепенным усложнением;

- внедрение диагностических методов и средств контроля технического состояния двигателя после испытания для оценки остаточного ресурса его систем;
- внедрение датчиков контроля утечек водорода с инерционностью не более 1...2 с;
- оснащение САЗ двигателя высокочувствительными первичными преобразователями (датчиками), обеспечивающими контроль наиболее напряженных параметров криогенного двигателя, например, износа беговых дорожек узлов качения (подшипников) ТНА, температуры лопаток турбины и др., а также каналами контроля виброперегрузок в наиболее теплонапряженных системах ДУ (ТНА и камера сгорания);
- применение активных средств флегматизации с добавками ингибиторов для предотвращения воспламенения и детонации взрывоопасных смесей водорода с воздухом и кислородом в отсеках ДУ и стенда и др. [33].

В частности, в работах Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (ИСМАН) были предложены высокоэффективные



составы ингибиторов, которые позволяют регулировать закономерности горения и взрыва водородно-воздушных смесей: скорость горения, критические условия воспламенения, переход горения в детонацию. В качестве эффективных ингибиторов применительно к горению смесей водорода в воздухе (и кислороде), содержащих более 10 % водорода, были предложены и испытаны олефиновые соединения, например пропилен. Для предотвращения детонации водородно-воздушных смесей, реально встречающихся на практике составов, достаточная концентрация предлагаемого ингибитора составляет ~ 3 %, а для прекращения процесса горения требуется несколько большее количество ингибитора (до 4 %).

Внедрение указанных дополнительных мер безопасности должно обеспечить увеличение коэффициента охвата аварийных ситуаций до 0,8, характеризующего способность современных САЗ гарантировать выключение ЖРД до момента, когда двигатель начнет разрушаться [33, 34].

4. Перспективы использования водородной базы НИЦ РКП для решения задач ЭО РКТ и внедрения водородных технологий в отрасли народного хозяйства

Уникальность водородной базы НИЦ РКП состоит в том, что:

- стенды и водородное производство (с годовой производительностью до 1 000 т жидкого водорода) расположены на одной площадке, что позволяет уменьшить потери компонентов при хранении, транспортировке и использовании;

- испытательные стенды обеспечивают комплексную обработку изделий РКТ и их систем с имитацией различных воздействующих факторов (высотность, гидродинамика, положение объекта испытания и др.).

Кроме того, на водородном комплексе созданы системы утилизации паров компонентов из емкостей хранилища и возврата остатков компонентов из стендовых емкостей в резервуары хранилища. Все это позволяет за счет оптимизации процессов захлаживания, заправки и испытаний объектов РКТ довести коэффициент использования жидкого водорода при эксплуатации систем с 0,2–0,3 до 0,6–0,7.

На водородной экспериментальной базе НИЦ РКП выполнен целый ряд научно-исследовательских работ, направленных на создание водородных технологий, по:

- испытаниям ЖРД и ДУ, обеспечению безопасности испытаний с водородом;
- процессам переохладения жидкого водорода в крупноразмерных системах, внедренных в технологию заправки РКК «Энергия-Буран» на УКСС и стартовом комплексе (СК);
- получению шугообразного водорода в системе, бездренажному хранению и транспортировке жидкого водорода по трубопроводам и в транспортных резервуарах;
- испытаниям образцов турбодетандера в систе-

мах ожижения водорода;

- заправке автомобилей газообразным водородом [28].

Необходимо отметить, что в создании уникальной экспериментальной базы и технологии водородных испытаний активно участвовали многие специалисты организаций ракетно-космической и смежных отраслей: НИЦ РКП, ОАО «Криогенмаш», РНЦ «Прикладная химия», ИХФ АН РАН, ИЦ Келдыша, ЦНИИмаш, ИПМП, КБХМ им. А.М. Исаева, НТЦ Люльки ОАО «Сатурн», КБХА, ГИАП, РКК «Энергия» им. С.П. Королева, ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, ВИАМ, ЦКБА, ВНИИПО, НПО «Техномаш», НПО ИТ, НИИмаш, ПО «Красмаш», МАИ и др. [29].

С учетом перспектив применения водорода в ракетно-космической технике предусматриваются:

- дальнейшее совершенствование и развитие водородной экспериментальной базы НИЦ РКП для выполнения Федеральной космической программы России до 2025 г;

- проведение реконструкции стендов для обеспечения экспериментальных работ по созданию двигателя РД0146Д и разгонного блока РБ КВТК и его систем;

- модернизация водородного производства с внедрением более совершенных электролизеров и систем ожижения водорода;

- отработка и внедрение технологии обеспечения жидким водородом космодромов Плесецк и Байконур с использованием железнодорожных цистерн типа ЖВЦ-100 и др.

Научно-технический и производственный потенциал НИЦ РКП наряду с выполнением задач по отработке ракетно-космической техники с использованием водородного топлива позволяет решать задачи по исследованию водородных технологий в энергетике и транспорте [28, 29].

Исследования и разработки автора по вопросам экологической безопасности применения водорода в технике, обобщения опыта испытаний и методам экспериментальной отработки ЖРД и ДУ были рассмотрены и представлены в монографиях, учебных пособиях и отраслевых руководящих материалах [36–43].

Заключение

1. Наземная отработка ракетных двигателей на криогенных компонентах топлива может быть построена на проведении модельных и автономных испытаний агрегатов и систем, а также комплексных испытаний двигателя с учетом схемных особенностей и параметров двигателя и стендового испытательного оборудования.

2. Определение характеристик двигателя по условиям на входе в двигатель и на выходе из сопла камеры требует применения специальных имитирующих установок: пусковых баков по магистралям питания окислителя и горючего и выхлопных диффузо-



ров с откачивающими средствами в выхлопном тракте стэнда.

3. Системы диагностики и аварийной защиты двигателя с применением усовершенствованных методов и средств контроля вибросостояния двигателя, степени износа трущихся пар в ТНА, температуры на входе в турбину ТНА, утечек водорода из систем двигателя и стэнда и аппаратуры САЗ позволят увеличить коэффициент охвата и предотвращения аварийных (нештатных) ситуаций в процессе испытаний до 80...90 %.

6. Внедрение метода уменьшения риска испытаний двигательной установки обеспечило безопасное проведение комплексной стэндовой отработки ракетных блоков КРБ и «Ц» ракет-носителей «GSLV» и «Энергия».

7. Рассмотренные принципы, методы и устройства обеспечения безопасности испытаний могут быть использованы при создании и отработке энергетических установок и внедрении водородных технологий в отраслях народного хозяйства.

Список литературы

1. Галеев А.Г. Исследование безопасных условий воспламенения и дожига выбросов водорода при испытаниях ЖРД. Кандидатская диссертация. МАИ. НИИХМ. М.: МАИ. 1974.

2. Галеев А.Г. Проектирование систем и оборудования стэндов для испытаний двигательных установок летательных аппаратов. Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ. 1990.

3. Барсуков В.С., Бершадский В.А., Галеев А.Г. Экспериментальные установки и системы стэндов для испытаний пневмогидросистем ДУ ЛА на криогенных компонентах. М.: Изд-во МАИ. 1992.

4. Бублик А.Д., Галеев А.Г., Попов Б.Б., Писарев А.П. Транспортирование криогенных продуктов в системах заправки энергоустановок // Сборник докладов Международной конференции «Криогеника-91». Москва, 1991.

5. Бершадский В.А., Галеев А.Г. К вопросу об определении пожаро- и взрывобезопасной массы водорода при дренировании емкости с жидким водородом // Сборник докладов XI Всесоюзной конференции «Проблемы предотвращения и тушения пожаров на объектах». Москва, 1992.

6. Бершадский В.А., Галеев А.Г. Обеспечение безопасности при испытании криогенных двигателей // Сборник докладов Семинара по проблеме применения криогенных топлив в авиации. М.: ВВИА им. Жуковского, 1994.

7. Galeev A.G. On Safety Assurance in Captive Testing of Oxygen-Hydrogen of Aerospace Systems // Proceedings of Third China-Russia-Ukraine Symposium on Astronautical Science and Technology. Xian, China, 1994.

8. Галеев А.Г. Исследование проблем обеспечения безопасности испытаний кислородно-водородных двигателей и ДУ // Научно-технический

сборник ЦНТИ «Поиск». 1994. Сер. IV, вып. 1.

9. Галеев А.Г. К вопросу наземной отработки кислородно-водородных двигателей замкнутых схем // Научно-технический сборник ЦНТИ «Поиск». 1994. Сер. IV, вып. 1.

10. Галеев А.Г., Санатуллоев Р.С., Сухов. В.Н. Исследование режимов заправки и захолаживания стэндовых систем подачи водорода // Сборник докладов семинара по «Системам питания двигателей». М.: ИЦ им. Келдыша, 1996.

11. Галеев А.Г. Обеспечение безопасности запуска двигателей и энергетических установок на кислородно-водородном топливе // X Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред». Москва, 2004.

12. Галеев А.Г. Методы повышения безопасности испытаний ракетных двигателей, связанные с выбросами водорода // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAE). 2005. № 2 (22). С. 9 – 14.

13. Велихов Е.П., Галеев А.Г., Дегтев Ю.Г., Панченко В.П., Селезнев Е.П. Исследования электрофизических свойств продуктов сгорания водорода в кислороде с присадками щелочных металлов // Теплофизика высоких температур: Доклады РАН. 2004. Т. 397, № 6. С. 1–5.

14. Велихов Е.П., Галеев А.Г., Дегтев Ю.Г., Панченко В.П., Селезнев Е.П. Экспериментальное и численное исследования электрофизических свойств продуктов сгорания водорода в кислороде с присадками щелочных металлов // Теплофизика высоких температур: Доклады РАН. 2005. Т. 403, № 7. С. 1–5.

15. Галеев А.Г., Киллих В.Е., Полежаев Ю.В. Промышленная установка на базе кислородно-водородной камеры для отработки материалов и конструкций в высокотемпературной струе газа // Научно-технический сборник ЦНТИ «Поиск». 1996. Сер. II, Вып. 1.

16. Галеев А.Г. Установка стэнда В1а для исследований теплозащитных материалов возвращаемых космических аппаратов в высокотемпературном потоке газа ЖРД // Семинар по аэротермодинамике входа в атмосферу, W1, «Roscosmos-ES». г. Королев, 18–20.02.2009.

17. Галеев А.Г. К проблеме стэндовой отработки кислородно-водородных двигателей разгонных блоков с имитацией условий эксплуатации // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 70-летию основания кафедры ракетных двигателей Казанского авиационного института. Казань, 2015.

18. Галеев А.Г. Разработка методов и средств обеспечения безопасных условий испытаний кислородно-водородных ДУ и ЭУ. Докторская диссертация. Загорск: НИИХМ, 1989.

19. Галеев А.Г. К вопросу наземной отработки кислородно-водородных ЖРД и двигательных установок // Международная конференция «Космос без



оружия – арена мирного сотрудничества в XXI веке». Москва, 2001.

20. Galeev A.G., Makarov A.A. On Experience in Development Testing of Current Cryogenic-Propellant Engines // 4-th International Conference on Launcher Technology "Space Launcher Liquid Propulsion". Liege, 2002.

21. Галеев А.Г. Обеспечение экологической безопасности при испытаниях ракетных двигательных установок на криогенных компонентах топлива // Международная конференция и выставка «Авиация и космонавтика–2003». Москва, 2003.

22. Галеев А.Г., Афанасьев, Н.А., Макаров А.А. Развитие испытательной базы для отработки ракетных двигателей, ступеней ракет и энергетических установок с использованием водородного топлива // Международный форум «Водородные технологии для производства энергии». Москва, 2006.

23. Галеев А.Г. Проблемы обеспечения безопасности стеновых испытаний двигательных и энергетических установок на водородном топливе / I Всемирный конгресс «Альтернативная энергетика и экология»: WCAEE-2006, Волга, 2006 // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEЕ). 2006. № 5. С. 55 – 57.

24. 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» (ISJAEЕ). 2007. № 7. С. 8–14.

25. Галеев А.Г. К проблеме безопасности стеновых испытаний двигательных и энергетических установок на водородном топливе // Научно-технический журнал Тяжелое машиностроение. 2007. № 7.

26. Галеев А.Г. Создание в НИИХМ комплекса испытательных стендов для отработки ракетно-космической техники с использованием водородного топлива // I форум татарских ученых. Казань, АН Республики Татарстан, 2007.

27. Галеев А.Г. Отработка ракетных двигателей и энергетических установок на водородном топливе и проблемы обеспечения их безопасности // Журнал «Вестник МАИ». 2008. Т. 15, № 1.

28. Галеев А.Г., Афанасьев Н.А., Сайдов Г.Г. Развитие испытательной базы для отработки двигательных и энергетических установок транспортных и энергетических систем на водородном топливе и проблемы обеспечения безопасности // II Международный Форум «Водородные технологии для развивающегося мира». Москва, 2008.

29. Галеев А.Г., Кучкин В.Н., Сайдов Г.Г. Развитие испытательной базы ФКП «НИЦ РКП» для отработки двигательных и энергетических установок ракетно-космической техники на водородном топливе и проблемы обеспечения безопасности // IX Международный Форум «Высокие технологии XXI века». Москва, 2008.

30. Бершадский В.А., Галеев А.Г., Денисов К.П.

Интенсивность тепломассообмена в баке системы питания энергоустановки с криогенным компонентом топлива // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEЕ). 2008. № 11. С. 17–24.

31. Галеев А.Г. О проблемах отработки и обеспечения безопасности ракетных двигательных и энергетических установок на водородном топливе // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». 2009. Спецвыпуск. С. 7–13.

32. Галеев А.Г. К вопросу обеспечения отработки и безопасности испытаний ракетных двигательных установок на водородном топливе // Сборник докладов Международной научно-технической конференции «Человек-Космос-Земля», посвященной 50-летию полета Ю.А. Гагарина в космос. Калуга, 2011. С. 34–39.

33. Азатын 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». Самара: СГАУ, 2011. С. 124–127.

34. Галеев А.Г. К вопросу обеспечения безопасности отработки и эксплуатации двигательных установок РКС на криогенных компонентах топлива // М.: электронный журнал Труды МАИ. 2013. № 1. С. 1–12.

35. Галеев А.Г., Золотов А.А., Родченко В.В., Оделевский В.К. Методы мониторинга сложных технических систем // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEЕ). 2014. № 4. С. 46–50.

36. Галеев А.Г. Экологическая безопасность при испытаниях и отработке ракетных двигателей. Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ, 2006.

37. Галеев А.Г., Золотов А.А., Перминов А.Н., Родченко В.В. Эксплуатация испытательных комплексов ракетно-космических систем. М.: Изд-во МАИ, 2007.

38. Галеев А.Г. Эксплуатация стендов для испытаний ракетных двигательных установок. Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ, 2008.

39. Галеев А.Г. Основы устройства испытательных стендов для отработки жидкостных ракетных двигателей и двигательных установок. Пересвет, Московской обл.: Изд-во ФКП «НИЦ РКП», 2010. 178 с.

40. Галеев А.Г., Денисов К.П., Ищенко В.И., Лисейкин В.А., Сайдов Г.Г., Черкашин Ю.А. Испытательные комплексы и экспериментальная отработка жидкостных ракетных двигателей. М.: Изд-во Машиностроение, 2012. 368 с.

41. Афанасьев Н.А., Галеев А.Г., Домашенко А.М., Сайдов Г.Г. и др. Свод правил. Требования безопасности при производстве, хранении, транспортировании и использовании жидкого водорода. Отраслевой руководящий материал. СП 162.1330610. ФКП «НИЦ РКП». 2014.

42. Галеев А.Г., Иванов В.Н., Катенин А.В., Ли-



сейкин В.А., Пикалов В.П., Поляхов А.Д., Сайдов Г.Г., Шибанов А.А. Методология экспериментальной отработки ЖРД и ДУ, основы проведения испытаний и устройства испытательных стендов: монография [Электронная монография]. Киров: МЦНИП, 2015. 436 с. [http://: nic-rkp.ru-metodologiya-pdv](http://nic-rkp.ru-metodologiya-pdv)

References

1. Galeev A.G. Issledovanie bezopasnyh uslovij vosplamneniâ i dožiganiâ vybrosov vodoroda pri ispytaniâh ŽRD. PhD Thesis. MAI. NIHM. Moscow: MAI, 1974 (in Russ.).

2. Galeev A.G. Proektirovanie sistem i oborudovaniâ stendov dlâ ispytaniy dvigatel'nyh ustanovok letatel'nyh apparatov. Textbook. Moscow: Izd-vo MAI Publ., 1990 (in Russ.).

3. Barsukov V.S., Bershadsky V.A., Galeev A.G. Èksperimental'nye ustanovki i sistemy stendov dlâ ispytaniy pnevmogidrosistem DU LA na kriogennyh komponentah. Moscow: Izd-vo MAI Publ., 1992 (in Russ.).

4. Bublik A.D., Galeev A.G., Popov B.B., Pisarev A.P. Transportirovanie kriogennyh produktov v sistemah zapravki ènergoustanovok. *The collections of reports of International conference "Kriogenika-91"*, Moscow, 1991 (in Russ.).

5. Bershadsky V.A., Galeev A.G. K voprosu ob opredelenii požaro- i vzryvobezopasnoj massy vodoroda pri drenirovanii emkosti s židkim vodorodom. *The collections of reports of XIth All-Union conference "Problemy predotvrašeniâ i tušeniâ požarov na ob'ektah"*, Moscow, 1992 (in Russ.).

6. Bershadsky V.A., Galeev A.G. Obespečenie bezopasnosti pri ispytanii kriogennyh dvigatelej. *The collections of reports of Seminar po probleme primeneniâ kriogennyh topliv v aviacii*. Moscow: VVIA Žukovskogo, 1994 (in Russ.).

7. Galeev A.G. On Safety Assurance in Captive Testing of Oxygen-Hydrogen of Aerospace Systems // Proceedings of Third China-Russia-Ukraine Symposium on Astronautical Science and Technology. Xian, China, 1994 (in Eng.).

8. Galeev A.G. Issledovanie problem obespečeniâ bezopasnosti ispytaniy kislородно-водородных двигателей i DU. *Naučno-tehničeskij sbornik CNTI «Poisk»*, 1994, ser. IY, issue. 1 (in Russ.).

9. Galeev A.G. K voprosu nazemnoj otrabotki kislородно-водородных двигателей zamknutyh shem. *Naučno-tehničeskij sbornik CNTI «Poisk»*, 1994, ser. IY, issue. 1 (in Russ.).

10. Galeev A.G., Sanatullof R.S., Suhov. V.N. Issledovanie režimov zapravki i zaholaživaniâ stendovyh sistem podači vodoroda. *The collections of reports of Seminar «Sistemam pitaniâ dvigatelej»*, Moscow: Keldysh Research Centre, 1996 (in Russ.).

11. Galeev A.G. Obespečenie bezopasnosti zapuska dvigatelej i ènergetičeskikh ustanovok na kislородно-водородном toplive. *Xth International symposium «Dinamičeskie i tehnologičeskie problemy mehaniki*

konstrukcij i splošnyh sred», Moscow, 2004 (in Russ.).

12. Galeev A.G. Metody povyšeniâ bezopasnosti ispytaniy raketnyh dvigatelej, svâzan-nye s vybrosami vodoroda. *International Scientific Journal «Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ» (ISJAE)*, 2005, no. 2 (22), pp. 9 – 14 (in Russ.).

13. Velihov E.P., Galeev A.G., Degtev Yu.G., Panchenko V.P., Seleznev E.P. Issledovaniâ èlektrofizičeskikh svojstv produktov sgoraniâ vodoroda v kislорode s prisadkami šeločnyh metallov. *Teplofizika vysokih temperatur: the RAN reports*, 2004, vol. 397, no. 6, pp. 1–5 (in Russ.).

14. Velihov E.P., Galeev A.G., Degtev Yu.G., Panchenko V.P., Seleznev E.P. Èksperimental'noe i čislennoe issledovaniâ èlektrofizičeskikh svojstv produktov sgoraniâ vodoroda v kislорode s prisadkami šeločnyh metallov. *Teplofizika vysokih temperatur: the RAN reports*, 2005, vol. 403, no. 7, pp. 1–5 (in Russ.).

15. Galeev A.G., Killih V.E., Polezhaev Yu.V. Promyšlennaâ ustanovka na baze kislородно-водородной kamery dlâ otrabotki materialov i konstrukcij v vysokotemperaturnoj strue gaza. *Naučno-tehničeskij sbornik CNTI «Poisk»*, 1996, ser. II, issue 1 (in Russ.).

16. Galeev A.G. Ustanovka stenda V1a dlâ issledovaniy teplozašitnyh materialov vozvrašae-myh kosmičeskikh apparatov v vysokotemperaturnom potoke gaza ŽRD. *Seminar po aèrotermodinamike vhoda v atmosferu, W1, «Roscosmos-EC»*, Korolev, 18-20.02.2009 (in Russ.).

17. Galeev A.G. K probleme stendovoj otrabotki kislородно-водородных двигателей razgonnyh blokov s imitaciej uslovij èkspluatatsii. *Tezisy dokladov Vserossijskoj naučno-tehničeskoy konferencii, posvâšennoj 70-letiu osnovaniâ kafedry raketnyh dvigatelej Kazanskogo aviacionnogo instituta*, Kazan, 2015 (in Russ.).

18. Galeev A.G. Razrabotka metodov i sredstv obespečeniâ bezopasnyh uslovij ispytaniy kislородно-водородных DU i ÈU. DSc Thesis. Zagorsk: NIHM, 1989 (in Russ.).

19. Galeev A.G. K voprosu nazemnoj otrabotki kislородно-водородных ŽRD i dvigatel'nyh ustanovok. *International conference «Kosmos bez oružia – arena mirnogo sotrudničestva v XXI veke»*, Moscow, 2001 (in Russ.).

20. Galeev A.G., Makarov A.A. On Experience in Development Testing of Current Cryogenic-Propellant Engines. *4-th International Conference on Launcher Technology "Space Launcher Liquid Propulsion"*, Liege, 2002 (in Eng.).

21. Galeev A.G. Obespečenie èkologičeskoy bezopasnosti pri ispytaniâh raketnyh dvigatel'nyh ustanovok na kriogennyh komponentah topliva. *International Conference and exhibition «Aviaciâ i kosmonavtika–2003»*, Moscow, 2003 (in Russ.).

22. Galeev A.G., Afanasev, N.A., Makarov A.A. Razvitie ispytatel'noj bazy dlâ otrabotki raketnyh dvigatelej, stupenej raket i ènergetičeskikh ustanovok s ispol'zovaniem vodorodnogo topliva. *International Forum «Vodorodnye tehnologii dlâ proizvodstva ènergii»*, Mos-



cow, 2006 (in Russ.).

23. Galeev A.G. Problemy obespečeniâ bezopasnosti stendovyh ispytaniy dvigatel'nyh i ènergetičeskikh ustanovok na vodorodnom toplive / Ith World Congress «Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ»: WCAEE-2006, Volga, 2006. *International Scientific Journal «Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ» (ISJAE)*, 2006, no. 5, pp. 55 – 57 (in Russ.).

24. Galeev A.G. Ob opyte otrabotki raketnyh dvigatelej i ènergetičeskikh ustanovok na vodorodnom toplive i problemy obespečeniâ ih bezopasnosti. *International Scientific Journal «Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ» (ISJAE)*, 2007, no. 7, pp. 8–14 (in Russ.).

25. Galeev A.G. K probleme bezopasnosti stendovyh ispytaniy dvigatel'nyh i ènergetičeskikh ustanovok na vodorodnom toplive. *Naučno-tehničeskij žurnal Tâželoe mašinstroenie*, 2007, no. 7 (in Russ.).

26. Galeev A.G. Sozdanie v NIIHM kompleksa ispytatel'nyh stendov dlâ otrabotki raketno-kosmičeskoj tehniki s ispol'zovaniem vodorodnogo topliva. Ith forum tatarskih učenyh, Kazan, Academy of Sciences of the Tatarstan Republic, 2007 (in Russ.).

27. Galeev A.G. Otrabotka raketnyh dvigatelej i ènergetičeskikh ustanovok na vodorodnom toplive i problemy obespečeniâ ih bezopasnosti. *Žurnal «Vestnik MAI»*, 2008, vol. 15, no. 1 (in Russ.).

28. Galeev A.G., Afanasev N.A., Saidov G.G. Razvitie ispytatel'noj bazy dlâ otrabotki dvigatel'nyh i ènergetičeskikh ustanovok transportnyh i ènergetičeskikh sistem na vodorodnom toplive i problemy obespečeniâ bezopasnosti. IIth International Forum «Vodorodnye tehnologii dlâ razvivaišegosa mira», Moscow, 2008 (in Russ.).

29. Galeev A.G., Kuchkin V.N., Saidov G.G. Razvitie ispytatel'noj bazy FKP «NIC RKP» dlâ otrabotki dvigatel'nyh i ènergetičeskikh ustanovok raketno-kosmičeskoj tehniki na vodorodnom toplive i problemy obespečeniâ bezopasnosti. IXth International Forum «Vysokie tehnologii XXI veka», Moscow 2008 (in Russ.).

30. Bershadsky V.A., Galeev A.G., Denisov K.P. Intensivnost' teplomassoobmena v bake sistemy pitaniâ ènergoustanovki s kriogennym komponentom topliva. *International Scientific Journal «Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ» (ISJAE)*, 2008, no. 11, pp. 17–24 (in Russ.).

31. Galeev A.G. O problemah otrabotki i obespečeniâ bezopasnosti raketnyh dvigatel'nyh i ènergetičeskikh ustanovok na vodorodnom toplive. *Obšerossijskij naučno-tehničeskij žurnal «Polet»*, 2009, special issue, pp. 7–13 (in Russ.).

32. Galeev A.G. K voprosu obespečeniâ otrabotki i bezopasnosti ispytaniy raketnyh dvigatel'nyh ustanovok na vodorodnom toplive. *The Collection of Reports of Meždunarodnoj naučno-tehničeskoj konferencii «Čelovek-Kosmos-Zemlja», posvášennoj 50-letiu poleta Yu.A. Gagarina v kosmos*. Kaluga, 2011, pp. 34–39 (in Russ.).

33. Azatyan V.V., Galeev A.G. Èffektivnye metody himičeskogo upravleniâ vosplamneniem i detonaciej gazovyh smesej vodoroda s vozduhom i kislorodom. *The Collection of Report Abstracts of Russian Scientific and Technical Conference «Raketno-kosmičeskaâ tehnika i tehnologiâ 2011»*, Samara: SGAU, 2011, pp. 124–127 (in Russ.).

34. Galeev A.G. K voprosu obespečeniâ bezopasnosti otrabotki i èkspluatacii dvigatel'nyh ustanovok RKS na kriogennyh komponentah topliva. *Moscow: «Trudy MAI»*, 2013, no. 1, pp. 1–12 (in Russ.).

35. Galeev A.G., Zolotov A.A., Rodchenko V.V., Odelevsky V.K. Metody monitoringa složnyh tehničeskikh sistem. *International Scientific Journal «Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ» (ISJAE)*, 2014, no. 4, pp. 46–50 (in Russ.).

36. Galeev A.G. Èkologičeskaâ bezopasnost' pri ispytaniâh i otrabotke raketnyh dvigatelej. Textbook. Moscow: Izd-vo MAI Publ., 2006 (in Russ.).

37. Galeev A.G., Zolotov A.A., Perminov A.N., Rodchenko V.V. Èkspluataciâ ispytatel'nyh kompleksov raketno-kosmičeskikh sistem. Moscow: Izd-vo MAI Publ., 2007 (in Russ.).

38. Galeev A.G. Èkspluataciâ stendov dlâ ispytaniy raketnyh dvigatel'nyh ustanovok. Textbook. Moscow: Izd-vo MAI Publ., 2008 (in Russ.).

39. Galeev A.G. Osnovy ustrojstva ispytatel'nyh stendov dlâ otrabotki židkostnyh raketnyh dvigatelej i dvigatel'nyh ustanovok. Peresvet, Moscow reg.: Izd-vo FKP «NIC RKP» Publ., 2010, 178 p. (in Russ.).

40. Galeev A.G., Denisov K.P., Ishchenko V.I., Liseikin V.A., Saidov G.G., Cherkashin Yu.A. Ispytatel'nye komplekсы i èksperimental'naâ otrabotka židkostnyh raketnyh dvigatelej. Moscow: Izd-vo Mašinstroenie Publ., 2012. 368 p. (in Russ.).

41. Afanasev N.A., Galeev A.G., Domashenko A.M., Saidov G.G. et al. Svod pravil. Trebovaniâ bezopasnosti pri proizvodstve, hranenii, transportirovanii i ispol'zovanii židkogo vodoroda. Otrasevoj rukovodâšij material. SP 162.1330610. FKP «NIC RKP», 2014 (in Russ.).

42. Galeev A.G., Ivanov V.N., Katenin A.V., Liseikin V.A., Pikalov V.P., Polyahov A.D., Saidov G.G., Shibanov A.A. Metodologiâ èksperimental'noj otrabotki ŽRD i DU, osnovy provedeniâ ispytaniy i ustrojstva ispytatel'nyh stendov: monograph [Èlektronnaâ monografiâ]. Kirov: MCNIP, 2015, 436 p. Available at: <http://nic-rkp.ru-metodologiya-pdv> (in Russ.).

Транслитерация по ISO 9:1995

