

КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ



Главный редактор

академик РАН Микрин Е.А.

Заместители главного редактора

член-корр. РАН Соловьев В.А.,
дтн, профессор Синявский В.В.

Редакционная коллегия

Дфмн Алексеев А.К., член-корр. РАН Алифанов О.М., дтн, профессор Беляев М.Ю., дтн, профессор Борzych С.В., академик РАН Зеленый Л.М., дтн, профессор Зубов Н.Е., академик РАН Коротеев А.А., член-корр. РАН Кудрявцев Н.Н., дтн Михайлов М.В., дтн Мухамедиева Л.Н., академик РАН Пешехонов В.Г., дтн Платонов В.Н., академик РАН Попов Г.А., дтн, профессор Рачук В.С., дтн, профессор Салмин В.В., дтн, профессор Сапожников С.Б., дтн, профессор Соколов Б.А., дтн Сорокин И.В., дтн Улыбышев Ю.П., академик РАН Федоров И.Б., дтн, профессор Филин В.М., дтн, профессор Чванов В.К., дтн, профессор Ярыгин В.И.

СОДЕРЖАНИЕ

05.07.10. ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Липаев А.М., Зобнин А.В., Усачев А.Д., Молотков В.И., Жуховицкий Д.И., Наумкин В.Н., Петров О.Ф., Фортвов В.Е., Пустыльник М.Ю., Носенко В., Хагль Т., Томас Х.М., Тома М.Х., Зориг Р., Штетнер А., Алямовская В.А., Орт А., Лавренко Е.Г. Научная аппаратура «Плазменный кристалл-4» для исследования комплексной (пылевой) плазмы на борту Международной космической станции 5

05.07.02. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Гузенберг А.С., Телегин А.А., Юргин А.В. Расходные характеристики систем очистки атмосферы от диоксида углерода в условиях гермообъема космической станции 23

05.07.05. ТЕПЛОВЫЕ, ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Носкин Г.В., Харагезов Е.И., Хаванов Е.С., Бесчастный Р.А. Первичные химические источники тока в электроснабжении возвращаемых космических аппаратов 34

Белоглазов А.П., Еремин А.Г., Немыкин С.А., Журавлев А.Ю. Оценка возможности использования углеродного материала в конструкции холодильника-излучателя космического аппарата 42

05.07.06 НАЗЕМНЫЕ КОМПЛЕКСЫ, СТАРТОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Спирин А.И., Николаева О.А. Методические подходы к парированию аварийных ситуаций на Международной космической станции 48

05.07.07 КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ИХ СИСТЕМ

Хамиц И.И., Поздняков С.С., Филиппов И.М., Бурьлов Л.С., Плетнев И.В., Медведев Н.Г., Фалин К.А., Чернецова А.А., Зарубин В.С., Горбунов Ю.В. Испытания макета трансформируемого модуля космических и планетных станций 60

Галеев А.Г., Егоров Ф.А., Поляхов А.Д., Потапов В.Т., Сизяков Н.П., Соколовский А.А. Системы обеспечения безопасности стендовых испытаний кислородно-водородных двигательных установок	71
---	----

**05.07.09 ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА,
УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Брагазин А.Ф., Усков А.В. Перелеты со встречей продолжительностью от одного до двух витков между околокруговыми компланарными орбитами	85
--	----

Богданов К.А., Тимаков С.Н., Зыков А.В., Субботин А.В. Релейная автономная система управления группировкой спутников, базирующейся на низкой околоземной орбите	98
---	----

Гунченко М.Ю., Улыбышев Ю.П. Критерий точности и анализ многоспутниковых систем непрерывного наблюдения Земли	111
---	-----

**05.13.01 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ,
УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)**

Белоголов О.Б. Методы многомерной сплайн-интерполяции-экстраполяции для аппроксимации гидравлических характеристик элементов рулевых машин ракетных блоков	119
--	-----

Некрасов В.В. Построение с помощью графов математической модели микроконтроллерной системы управления двигателя-маховика в режиме заданной скорости для высокодинамичных космических аппаратов	126
---	-----

**Журнал является
рецензируемым изданием**

- мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей
- журнал не содержит рекламы
- рукописи не возвращаются
- при перепечатке материалов ссылка на журнал «КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ» обязательна
- плата с авторов за публикацию статей не взимается

Учредитель

ПАО «Ракетно-космическая корпорация “Энергия” имени С.П. Королёва»
Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС 77-71922 от 13 декабря 2017 г.
© ПАО «Ракетно-космическая корпорация “Энергия” имени С.П. Королёва»
Журнал «Космическая техника и технологии» включен в РИНЦ согласно договору с НЭБ № 315-05/2014 от 20.05.2014 г.

Журнал «Космическая техника и технологии» с 29.05.2017 г. входит в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК Минобрнауки РФ.

Электронную версию журнала «Космическая техника и технологии» можно найти на сайте <http://www.energia.ru/ktt/index.html>

УДК 629.7.018.3.036.5

СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ КИСЛОРОДНО-ВОДОРОДНЫХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

© 2020 г. Галеев А.Г.¹, Егоров Ф.А.², Поляхов А.Д.¹, Потапов В.Т.²,

Сизяков Н.П.¹, Соколовский А.А.²

¹ФКП «Научно-испытательный центр
ракетно-космической промышленности» (ФКП «НИЦ РКП»)
Ул. Бабушкина, 9, г. Пересвет, Московская обл., Российская Федерация, 141320,
e-mail: mail@nic-rkp.ru

²Фрязинский филиал ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН (ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)
Пл. Введенского, 1, г. Фрязино, Московская обл., Российская Федерация, 141190,
e-mail: fire@ms.ire.rssi.ru

Испытания кислородно-водородных двигательных установок на стенде с заправкой в топливный бак до 2 700 кг водорода проводятся с выполнением специальных мер безопасности и использованием систем аварийной защиты испытаний, охватывающих до 60% нештатных ситуаций. Испытания двигательных установок с увеличенными дозами заправки водорода (до 7 000 кг) требуют применения дополнительных мер безопасности, основанных на повышении эффективности систем пожаровзрывопредупреждения, аварийной защиты и коэффициента охвата аварийных (нестатных) ситуаций. Ключевыми факторами в повышении коэффициента охвата нештатных ситуаций при испытаниях являются исследования систем более раннего обнаружения утечек водорода и применения ингибиторов с флегматизатором-азотом для предотвращения взрыва смесей водорода с воздухом (кислородом).

Представлены результаты исследований систем раннего обнаружения утечек водорода и построения средств контроля на основе волоконно-оптической техники и микрорезонаторных структур, обладающих более высокими быстродействием, селективностью, помехозащищенностью и надежностью.

Ключевые слова: *двигательная установка, безопасность, система аварийной защиты, нештатная ситуация, утечка водорода, волоконно-оптическая техника.*

DOI 10.33950/spacetechn-2308-7625-2020-1-71-84

SYSTEMS FOR ASSURING SAFETY OF STATIC FIRING TESTS OF OXYGEN/HYDROGEN PROPULSION UNITS

Galeev A.G.¹, Egorov F.A.², Polyakhov A.D.¹, Potapov V.T.²,

Sizyakov N.P.¹, Sokolovskiy A.A.²

¹Federal Treasury Enterprise «Research and Testing Center
of the Rocket and Space Industry» (FTE «RTC RSI»)
9 Babushkina str., Peresvet, Moscow region, 141320, Russian Federation,
e-mail: mail@nic-rkp.ru

²*Fryazinsky branch of the Institute of Radio Engineering and Electronics
named after V.A. Kotelnikov of the Russian Academy of Sciences (FIRE RAS)
1 Voedenskiy square, Fryazino, Moscow region, 141190, Russian Federation,
e-mail: fire@ms.ire.rssi.ru*

Static firing tests of oxygen-hydrogen propulsion units with propellant tank load of up to 2 700 kg of hydrogen are run with special safety precautions and using emergency test protection system covering up to 60% of contingencies. Test on propulsion units with higher hydrogen propellant loads (up to 7 000 kg) require additional safety measures, based on improved effectiveness of the fire and explosion prevention systems, emergency protection, and the coverage ratio for emergency (off-nominal) situations. The key factors for improving off-nominal situations coverage ratio during tests are research into systems for earlier detection of hydrogen leaks and the use of inhibitors with nitrogen as the phlegmatizing agent to prevent explosion of the hydrogen/air (oxygen) mixtures.

The paper presents results of studies into systems for early detection of hydrogen leaks and design of monitoring equipment based on fiber optics and microcavity structures that have higher speed of response, selectivity, immunity to noise and reliability.

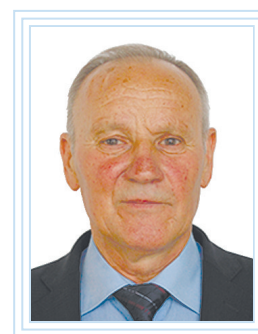
Key words: *propulsion system, safety, emergency protection system, off-nominal situation, hydrogen leak, fiber-optic technology.*



ГАЛЕЕВ А.Г.



ЕГОРОВ Ф.А.



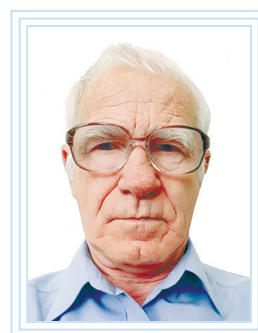
ПОЛЯХОВ А.Д.



ПОТАПОВ В.Т.



СИЗЯКОВ Н.П.



СОКОЛОВСКИЙ А.А.

ГАЛЕЕВ Айвенго Гадыевич — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФКП «НИЦ РКП», e-mail: a.galeev@nic-rkp.ru
GALEEV Ayvengo Gadyevich — Doctor of Science (Engineering), Professor, Chief research scientist at FTE «RTC RSI», e-mail: a.galeev@nic-rkp.ru

ЕГОРОВ Федор Андреевич — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, e-mail: egorov-fedor@mail.ru
EGOROV Fedor Andreevich — Doctor of Science (Physics and Mathematics), Lead research scientist at FIRE RAS, e-mail: egorov-fedor@mail.ru

ПОЛЯХОВ Александр Дмитриевич — начальник отдела ФКП «НИЦ РКП»,
e-mail: mail@nic-rkp.ru
POLYAKHOV Aleksandr Dmitrievich — Head of Department at FTE «RTC RSI»,
e-mail: mail@nic-rkp.ru

ПОТАПОВ Владимир Тимофеевич — доктор технических наук, главный
научный сотрудник ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, e-mail: v_potapov38@mail.ru
ПОТАПОВ Vladimir Timofeevich — Doctor of Science (Engineering), Chief research
scientist at FIRE RAS, e-mail: v_potapov38@mail.ru

СИЗЯКОВ Николай Петрович — доктор технических наук, исполняющий
обязанности генерального директора ФКП «НИЦ РКП», e-mail: mail@nic-rkp.ru
SIZYAKOV Nikolay Petrovich — Doctor of Science (Engineering), Acting General
director of FTE «RTC RSI», e-mail: mail@nic-rkp.ru

СОКОЛОВСКИЙ Александр Алексеевич — доктор технических наук, ведущий
научный сотрудник ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, e-mail: asokol@list.ru
SOKOLOVSKIY Aleksandr Alekseevich — Doctor of Science (Engineering),
Lead research scientist at FIRE RAS, e-mail: asokol@list.ru

Введение

Современное развитие ракетно-космических комплексов для полетов к объектам ближнего и дальнего космоса показывает перспективы применения криогенных видов топлива: кислорода с метаном и кислорода с водородом на верхних ступенях, разгонных блоках и межорбитальных буксирах. В рассматриваемых ракетах-носителях тяжелого и сверхтяжелого классов предусматривается применение разгонного блока КВТК и ступени с кислородно-водородными двигателями РД0146 и РД0150 с тягой 90 и 1 000 кН, соответственно.

Экспериментальная отработка ракетно-космических комплексов требует проведения большого объема наземных испытаний двигателей и двигательных установок (ДУ). Следует отметить, что водород и метан в смесях с кислородом и воздухом взрыво- и пожароопасны, поэтому стендовые испытания ДУ являются наиболее опасными, 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.

В связи с вышеизложенным, исследование систем обеспечения безопасности испытаний кислородно-водородных ДУ являются актуальными.

Безопасность стендовых испытаний кислородно-водородных ДУ

Безопасность испытаний кислородно-водородных ДУ на стенде с учетом тротиловых эквивалентов топливной пары определяется количеством водорода, заправляемого в топливный бак ДУ. При оценке безопасности применяется гипотеза мгновенного разрушения баков окислителя и горючего, пролива и взрыва образуемых смесей водорода с воздухом (кислородом) [1, 2].

Нижние и верхние концентрационные пределы воспламенения и детонации топливных пар приведены в табл. 1 [1].

Таблица 1

Пределы воспламенения и детонации топливных пар

Топливные пары	Нижний предел, % H ₂ (CH ₄) по объему		Верхний предел, % H ₂ (CH ₄) по объему	
	Воспламенение	Детонация	Воспламенение	Детонация
Водород – кислород	4,6	15	94	90
Водород – воздух	4,1	18,3	74,2	59
Метан – кислород	5,6	8,2	61	56
Метан – воздух	4,4	6,3	17	14

В 1991 г. на основании накопленного опыта стендовой отработки жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) и ДУ и проведенных расчетов межотраслевого экспертного

комиссия по безопасности испытаний приняла решение с риском 10^{-4} (одна авария на 10 000 испытаний) о возможности проведения «холодных» и огневых испытаний ДУ разгонных блоков на стенде В-3 ФКП «НИЦ РКП» с заправкой топливного бака ДУ жидким водородом в количестве 2 700 кг.

Согласно расчетам опасных зон для испытаний ракетных блоков, имеющих в топливных баках 1...10 т жидкого водорода, определялось избыточное давление во фронте ударной волны при взрыве на поверхности земли по формуле М.А. Садовского:

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

где $\Delta p_{\text{взр}}$ (бар) — избыточное давление во фронте ударной волны на расстоянии $\sim R$ (м) от центра взрыва; B (кг) — масса заряда тротила, определяемая соотношением $B = zC_3m_{\text{H}_2}$; z — коэффициент участия водорода во взрыве для случая истечения и смешения с $Re \gg Re_{\text{кр}}$; Re — критерий Рейнольдса; $C_3 = 10,4$ и $13,3$ (кг ТНТ/кг H_2) — тротильный эквивалент водородно-воздушной и водородно-кислородной смесей в стехиометрическом соотношении, соответственно; m_{H_2} (кг) — масса выброшенного водорода при аварийной ситуации [2].

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

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

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 $z = 0,02...0,10$ и для замкнутого рабочего объема при $z = 0,2...0,4$.

В расчетах экспертами было принято значение $z = 0,3$, и 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 разрушение (менее 10%) остеклений зданий и сооружений. При этом «холодные» и огневые испытания кислородно-водородных ДУ с заправкой в топливный бак ДУ 2 700 кг водорода должны проводиться с выполнением специальных мероприятий по безопасности, включающих в себя следующие требования:

- для первых испытаний ДУ выполняется с дополнительно упрочненными баками;
- двигатель отделяется от баков защитным устройством;
- двигатель до начала испытаний в составе ДУ должен иметь коэффициент надежности не ниже 0,98, подтвержденный при автономных испытаниях;

а также:

- агрегаты и системы ДУ должны быть испытаны автономно на натуральных компонентах;
- огневые испытания должны предшествовать «холодным» испытаниям ДУ;
- в баках ДУ должны быть установлены разделительные клапаны и клапаны аварийного слива компонентов из баков, дополнительные дренажно-предохранительные клапаны и системы дополнительного наддува баков.

Должно быть также предусмотрено применение в ДУ следующих систем:

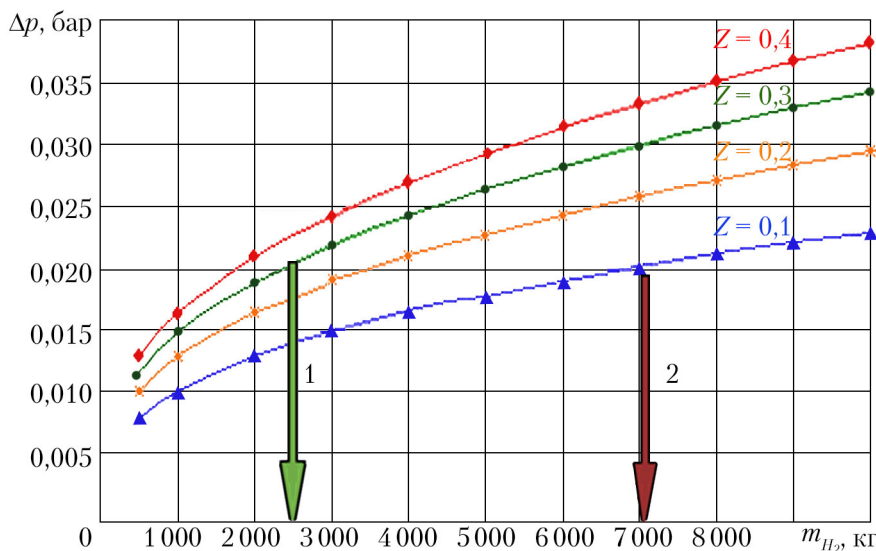


Рис. 1. Результаты расчета избыточного давления Δp во фронте ударной волны в зависимости от массы выброса водорода m_{H_2} и коэффициента участия его во взрыве z при расстоянии до жилого массива $R = 1100$ м (водородно-кислородная смесь): 1 — при заправке в бак 2 700 кг водорода; 2 — при заправке в бак 7 000 кг водорода

- пожаровзрывопредупреждения (СПВП) и аварийной защиты испытаний (САЗ);
- контроля опасных концентраций водорода и кислорода в отсеках стенда и ДУ;
- воспламенения и дожигания выбросов водорода из сопла двигателя;
- блоки информационно-управляющей системы должны быть в искрозащищенном исполнении.

Расчеты, которые, как отмечалось выше, проводились с использованием гипотетической модели развития аварийной ситуации, не учитывали динамику и кинетику процессов от начала разгерметизации системы до взрыва, а также уменьшение тротилового эквивалента при неполучении стехиометрической смеси. В то же время рассмотрение статистики аварий, произошедших по причине выброса водорода, показывает, что развитие событий имеет заметное время, позволяющее парировать развитие аварийной ситуации, а коэффициент участия водорода во взрыве z в большинстве случаев не превышает 0,1.

Это позволяет рассматривать вопрос о проведении испытаний на стенде ФКП «НИЦ РКП» ДУ с заправкой блока ступени ракеты-носителя водородом более 2 700 кг (до 7 000 кг) при выполнении комплекса дополнительных мер 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;
- внедрение датчиков контроля утечек водорода с инерционностью не более 1–2 с;
- применение усовершенствованных САЗ двигателя с быстродействием не более 0,02 с;
- применение ингибиторов с флегматизатором-азотом для предотвращения детонации взрывоопасных смесей водорода с воздухом и кислородом в отсеках ДУ и стенда, и др.

В качестве эффективных ингибиторов применительно к горению смесей водорода (метана) в воздухе (и кислороде), содержащих более 10% водорода, были предложены и испытаны олефиновые соединения (в частности – пропилен (C_3H_6)), обеспечивающие обрыв цепей воспламенения (взамен чисто тепловой теории воспламенения) и исследованные

в работах Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (ИСМАН). Так, 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 его количество (до 4%) [3, 4].

Результаты исследования систем контроля опасных накоплений взрывоопасных газов

Известно, что основными причинами аварийных ситуаций при использовании жидких водорода и кислорода являются:

1) конденсация и накопление твердых кристаллов воздуха или кислорода в жидком водороде;

2) образование пожаро- и взрывоопасных смесей при утечках или выбросах водорода в пространстве испытательного стенда или объекта испытания.

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. *Второй случай* чаще встречается при стендовых испытаниях ЖРД и ДУ. Поэтому важным является оснащение ДУ ракетных блоков системой пожаровзрывопредупреждения, основным элементом которой является подсистема контроля опасных накоплений (СКОН) взрывоопасных газов (водорода и кислорода).

Следует при этом отметить, что основным недостатком большинства применяемых датчиков СКОН является большая инерционность (до 30 с) и недостаточная селективность (реакция на присутствие других газов, например, кислорода и гелия) [3, 5, 6].

Проблема быстродействия и селективности сигнализаторов СКОН, контролирующих концентрации водорода в двигательном отсеке (ДО) блока 12КРБ при проведении стендовых испытаний, была решена применением:

- основной системы с полупроводниковыми датчиками ИПКВ1 контроля опасных концентраций водорода (разработка МИФИ);
- дублирующей системы контроля температуры [7].

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

С учетом обобщения опыта отработки ЖРД и ДУ, работающих на жидких водороде и кислороде, можно сформулировать основные требования к перспективным газоаналитическим датчикам водорода и кислорода:

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

Одно из главных требований – максимальное быстродействие (инерционность до 2 с), оперативная и эффективная реакция на аварийный выброс водорода в атмосферу отсеков испытательного стенда или изделия для исключения вероятности взрыва водородно-воздушной смеси.

Для проведения сравнительных испытаний датчиков СКОН на стенде ФКП «НИЦ РКП» разработана, смонтирована и внедрена установка сравнительных испытаний датчиков (УСИД1), схема которой приведена на рис. 2 [8].

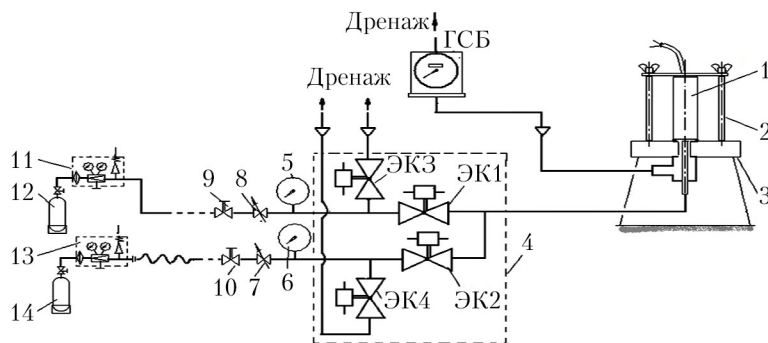


Рис. 2. Пневмогидравлическая схема испытательной установки УСИД1:
 1 – испытуемый датчик ГА; 2 – траверсы для крепления и герметизации датчика; 3 – рабочий стол УСИД1; 4 – счетчик газа типа ГСБ-400; 5, 6 – манометры; 7, 8 – дроссели настройки расхода; 9, 10 – вентили запорные; 11, 13 – редукторы баллонные;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

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

Таблица 2

Результаты сравнительных испытаний газоаналитических датчиков

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

Результаты испытаний показали значительно большую величину инерционности датчиков, превышающую 2 с.

Кроме того, вышеуказанные промышленно выпускаемые СКОН обладают низкой помехозащищенностью, не позволяющей их применение в составе стендовых ИУС. Целесообразно использовать гибридную технологию построения быстродействующих высоконадежных оптоэлектронных стендовых СКОН.

Построение СКОН на основе гибридных оптоволоконных датчиков

Сочетание известных преимуществ оптических волокон и элементов микроэлектроники в составе гибридных оптоволоконных датчиков позволяет на основе таких систем создать измерительный комплекс испытательного стенда, отличающийся взрывобезопасностью, помехозащищенностью, высокой точностью и гибкостью в изменении его конфигурации применительно к текущим задачам.

Особенность гибридных оптоволоконных датчиков состоит в том,

что питание удаленного измерительного модуля осуществляется с помощью оптического излучения, передаваемого по многомодовому волокну и преобразуемого фотовольтаическим преобразователем [9] в электрическую мощность для питания измерительного модуля, а передача измерительной информации также осуществляется по оптоволоконному каналу. Это позволяет отказаться от проводных линий в СКОН, что повышает собственную взрывобезопасность и помехозащищенность измерительной системы. Кроме этого, гибридная технология позволяет легко мультиплексировать сигналы от нескольких датчиков и измерять в критических точках стенда целый комплекс параметров, влияющих на безопасность испытаний: температуру, виброперегрузки, утечку компонентов топлива.

Структурная схема гибридной измерительной системы изображена на рис. 3.

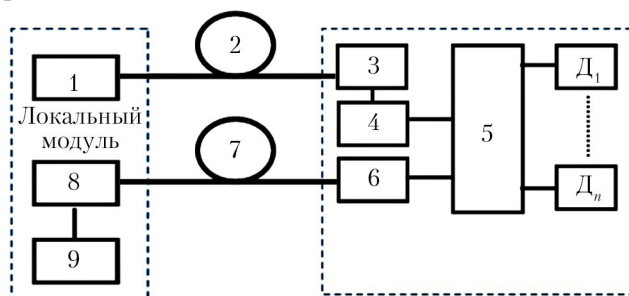


Рис. 3. Структурная схема гибридной измерительной системы: 1 – лазер питания измерительного модуля; 2, 7 – дуплексный волоконный кабель; 3 – фотовольтаический преобразователь; 4 – блок питания измерительного модуля; 5 – микропроцессорный модуль; D_1 – D_n – датчики; 6 – оптический передатчик информационного сигнала; 8, 9 – блок приема и обработки измерительной информации

Система содержит локальный модуль (ЛМ), расположенный в операторской зоне, и измерительный электронный модуль (ИМ), расположенный в контролируемой зоне.

Локальный модуль содержит полупроводниковый лазер 1 с системой управления его мощностью. Излучение этого лазера через стандартное многомодовое волокно 2 передается на фотовольтаический преобразователь 3, подключенный к системе формирования питающих напряжений измерительного блока 4. К микропроцессорному блоку 5 подключены различные датчики D_1 – D_n для контроля параметров испытательного стенда. Это могут быть датчики концентрации взрывоопасных компонентов топлива, температуры, давления, механических напряжений, положения

исполнительных механизмов и т.д. Информация от всех датчиков кодируется в определенный формат [10, 11] в блоке 5 и передается с помощью излучателя 6 через волокно 7 в ЛМ, где принимается фотоприемником 8 и поступает в блок обработки и отображения информации 9. Длина дуплексной волоконной линии 2 и 7, связывающей локальный и измерительный блоки, может достигать нескольких километров.

Вся система строится на основе стандартных и доступных электронных компонентов. В качестве фотовольтаических преобразователей могут применяться сборки кремниевых фотодиодов. Однако, их эффективность не превышает 10–20% и требует повышенной оптической мощности для питания ИМ, что не всегда приемлемо по требованиям взрывобезопасности.

Вопросам взрывобезопасности волоконных систем посвящены работы [12, 13], где показано, что взрывобезопасным уровнем оптической мощности при разломе волокна в метано-воздушной или водородно-воздушной смесях, содержащих поглощающие частицы (угольная пыль, окислы железа и т.д.), является мощность 200–300 мВт. Следует отметить, что характерное время воспламенений [12] метано-воздушной или водородно-воздушной смесей, приводящих к взрыву, составляет 40...300 мс. Обратная связь о состоянии питания ИМ [13] позволяет за время не более 100 мкс отключить питающую оптическую мощность при обрыве волокна, что гарантирует взрывобезопасность измерительной системы и при оптической мощности более 1 Вт. Измерительный модуль может также содержать резервный источник питания, например, аккумулятор, который обеспечит его работу в критической ситуации.

Для обеспечения взрывобезопасных уровней оптической мощности вопросы эффективности питания оптическим излучением являются первостепенными. Эти вопросы успешно решаются как применением высокоэффективных (до 50%) фотовольтаических преобразователей [14], так и специальным построением системы оптического питания [15].

В ФИРЭ имени В.А. Котельникова РАН предложен оптоэлектронный датчик для контроля концентрации взрывоопасных углеводородных газов (например, метана). Один из вариантов реализации такого датчика приведен на рис. 4.

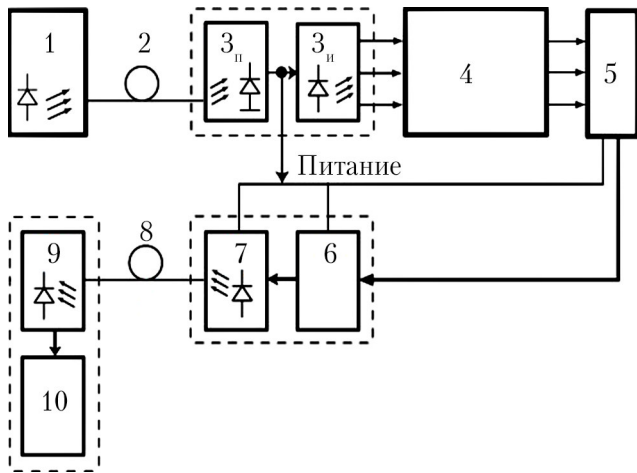


Рис. 4. Вариант реализации гибридного датчика углеводородов с инфракрасным излучателем на 3,3 мкм: 1 – лазер питания; 2, 8 – дуплексный волоконный кабель; 3_n – фотовольтаический преобразователь; 3_i – инфракрасный излучатель 3,3 мкм; 4 – газовая кювета; 5 – инфракрасный фоторезистор; 6 – блок кодирования информации; 7 – оптический передатчик; 9 – фотоприемник; 10 – блок обработки и отображения информации

Датчик работает следующим образом. Излучение от источника оптического излучения 1 (рис. 4) с длиной волны λ_1 , соответствующей полосе прозрачности волоконного световода 2, поступает по этому световоду на преобразователь частоты 3, который преобразует излучение с длиной волны λ_1 в излучение с длиной волны λ_2 , соответствующей линии поглощения анализируемого газа, находящегося в кювете 4. В качестве преобразователя излучения может быть применен люминофор $\text{In}_{0.94}\text{Ga}_{0.06}\text{As}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$, выращенный на подложке InAs с промежуточным слоем $n\text{-InAs}_{0.74}\text{Sb}_{0.09}\text{P}_{0.17}$. Для этого материала спектр люминесценции лежит в области 3,3 мкм, соответствующей полосе поглощения углеводородных газов, а эффективное возбуждение люминесценции осуществляется полупроводниковым излучателем с длиной волны 0,87 мкм, которая соответствует полосе прозрачности стандартного волоконного световода. Преобразователем излучения может быть также светодиод 3_n , который питается от фотовольтаического преобразователя 3_n , как показано на рис. 4. Излучение с длиной волны λ_2 (3,3 мкм) проходит через исследуемый газ, и его интенсивность регистрируется приемником излучения 5, установленным на выходе кюветы 4. Информацию о концентрации исследуемого газа несет интенсивность излучения, прошедшего через кювету 4. Выходной сигнал с приемника 5 поступает на устройство 6 кодирования информационного

сигнала, которое затем с помощью излучателя 7 и световода 8 передает информацию на блок 9–10 приема и обработки. В блоке 10 осуществляется сопоставление измеренной интенсивности излучения со значением интенсивности, соответствующей концентрации исследуемого газа.

Высокая чувствительность предложенного датчика обусловлена тем, что интенсивность поглощения анализируемых газов на основной линии поглощения на два-три порядка больше, чем в области 1,6–1,7 мкм, которая ранее использовалась в волоконных датчиках метана. Кроме этого, увеличение длины волны излучения, на которой производится анализ, позволяет снизить влияние рассеяния и, следовательно, улучшить точность датчика, поскольку двукратное увеличение длины волны приводит к подавлению влияния рассеяния в 16 раз. Достоинством разработанного датчика является также высокое быстродействие. Последнее достигается тем, что при значительном подавлении влияния рассеяния, обусловленного увеличением длины волны зондирующего излучения, допустимо использование открытых (незащищенных) кювет, вследствие чего скорость проникновения газа в кювету не ограничивается никакими защитными материалами и приспособлениями.

О возможности создания датчиков концентрации водорода и метана для СКОН на основе микрорезонансных структур

Современные технологии микромеханики, волоконной и интегральной оптики в сочетании с методами лазерной обработки материалов (в т. ч. на базе волоконных лазеров) позволяют создавать искусственные объекты и среды с уникальными свойствами, в частности, микрооптомеханические резонансные структуры (МОМРС, микроосцилляторы), возбуждаемые светом [16]. Это привело к формированию нового научно-технического направления (лазерная оптомеханика), связанного с исследованием взаимодействия лазерного излучения с микроосцилляторами, которые могут играть также роль внутривибраторных оптических элементов в лазерах. Интерес к данному направлению обусловлен, в частности, тем, что помимо новых перспектив исследований в области фундаментальной

физики и фотоники оно открывает широкие возможности для создания нового класса датчиков — волоконно-оптических резонансных (вибросочастотных) датчиков (ВОРД) (рис. 5), принцип действия которых основан на зависимости частоты резонансных колебаний МОМРС, возбуждаемых лазерным излучением, от внешних воздействий на микроосциллятор и параметров окружающей среды.

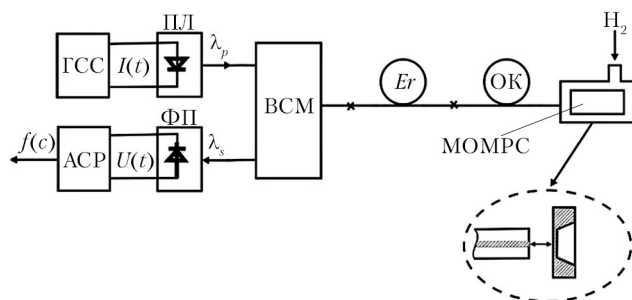


Рис. 5. Схема волоконно-оптических резонансных датчиков на основе кремниевых МОМРС: ГСС — генератор синусоидальных сигналов; ПЛ — полупроводниковый лазер накачки (λ_p); ВСМ — волоконный спектральный мультиплексор; ФП — фотоприемник на основе фотодиода; АС — активный световод (эрбиевый); ОК — оптический кабель; АСР — анализатор спектра радиочастотный

Известно [17, 18], что преобразование измеряемой величины в частотно-временные параметры сигналов является одним из эффективных методов повышения точности измерений, что находит широкое применение при решении научно-технических задач и проведении высокоточных измерений в промышленности. Этот метод лежит в основе функционирования, например, хорошо известных резонансных (струнных) преобразователей [18], принцип действия которых основан на зависимости собственной (резонансной) частоты мод поперечных колебаний металлической струны — колебательного элемента (КЭ) преобразователя от контролируемых параметров (механической силы, деформаций, температуры и др.).

Микроосцилляторы в ВОРД играют роль КЭ с характерной резонансной частотой (f) и одновременно выполняют функции сенсорного элемента (СЭ) датчика, воспринимающего воздействия и осуществляющего преобразование измеряемой величины в смещение резонансной частоты микроосциллятора (Δf).

Важными отличительными особенностями ВОРД являются:

- пассивность и отсутствие электрических цепей в зоне измерения;

- большая дистанционность контроля (удаленность объектов контроля может составлять несколько километров);

- применение МОМРС в диэлектрическом исполнении, что позволяет полностью снять проблему гальванической развязки датчика от объекта контроля;

- малые массо-габаритные параметры СЭ, обеспечивающие возможность проведения измерений в труднодоступных местах; и др., что существенно расширяет условия эксплуатации и области применений ВОРД.

С позиций теории колебаний микроосциллятор представляет собой распределенную упругую систему с микро- (нано) масштабами размеров, характеризующуюся широким набором мод собственных акустомеханических колебаний, возбуждаемых за счет энергии оптического (лазерного) излучения. При этом лазерно-оптическое возбуждение колебаний может обуславливаться как пондеромоторным действием излучения (давление света, оптическая «градиентная» сила, «эффект А.И. Садовского»), так и параметрическими эффектами (фототермический, радиометрический, электрострикция в поле световой волны и др.), которые в силу универсального характера проявляются в широком спектральном диапазоне как в известных, так и в новых «искусственных» материалах.

На рис.6 приведены типичные осциллограммы и Фурье-спектр выходного сигнала ВОРД, пропорционального интенсивности лазерного излучения (с длиной волны λ_s), которые свидетельствуют о высоком отношении сигнал/шум в схеме датчика и показывают возможность регистрации текущего значения резонансной частоты МОМРС (и, соответственно, ее смещения Δf) путем анализа Фурье-спектра выходного сигнала ВОРД, модулированного с резонансной частотой микроосциллятора.

МОМРС могут быть изготовлены как из полупроводниковых, так и диэлектрических материалов с помощью методов плазмохимии и анизотропного травления, которые позволяют реализовать микроосцилляторы различных типов. В качестве примера на рис.7 представлен один из простейших типов кремниевых МОМРС с колебательным элементом в виде микробалки прямоугольного сечения, жестко закрепленной на концах (КЭ — «микромостик»).

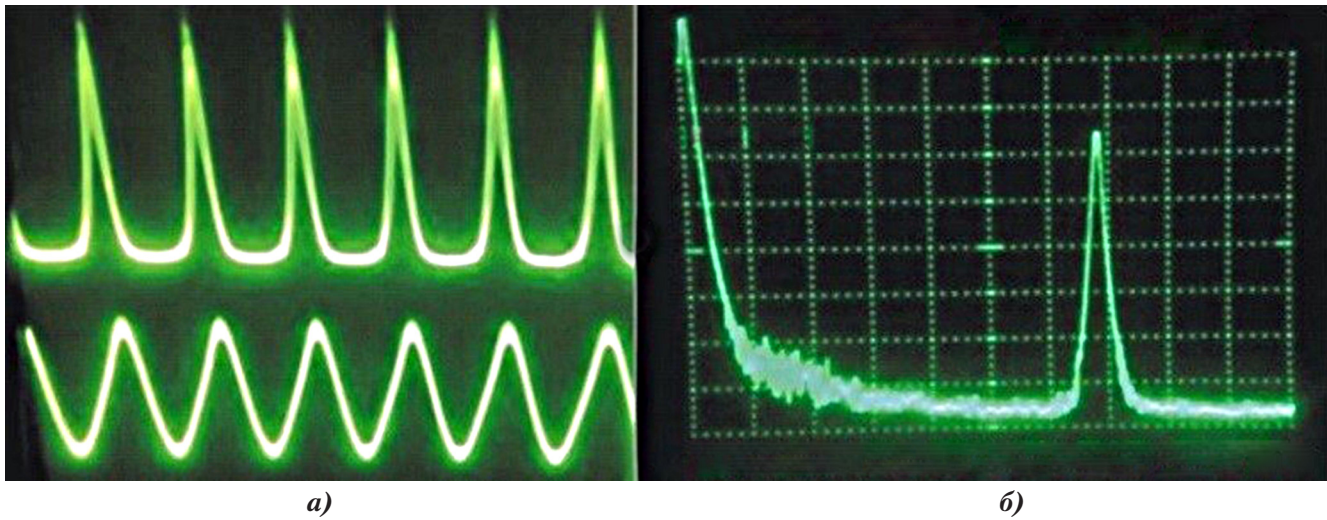


Рис. 6. Типичные осциллограммы (верхняя – интенсивность лазерного излучения, нижняя – колебания микроосциллятора) (а); и Фурье-спектр выходного сигнала ВОРД (б)

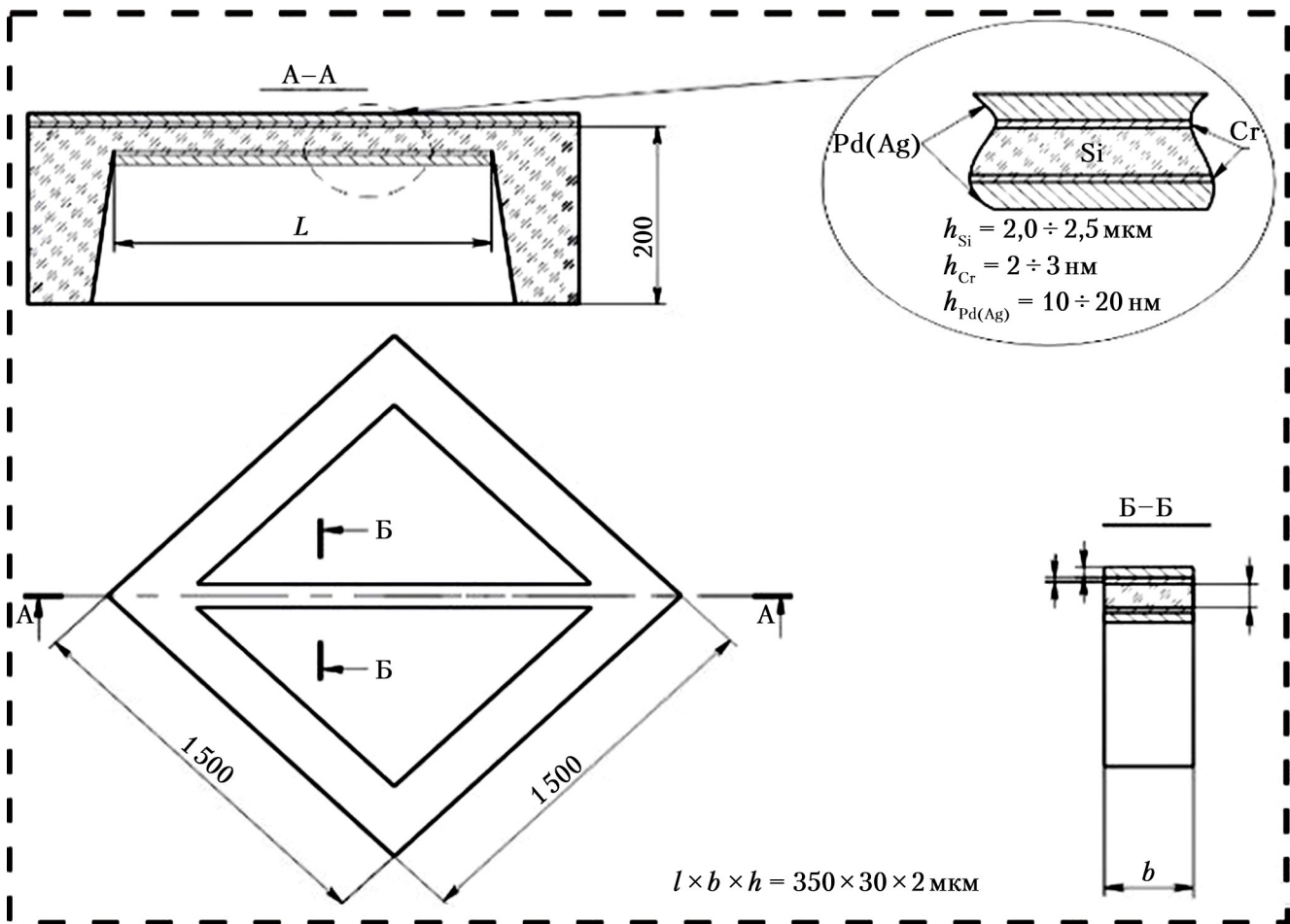


Рис. 7. Схема кремниевой МОМРС с тонкой пленкой палладия

В работе [19] показано, что использование волоконных лазеров на основе активных световодов позволяет реализовать ВОРД, использующие режимы свободных, вынужденных и автоколебаний МОМРС. При этом особый интерес представляют схемы на основе кремниевых МОМРС в микрообъемном исполнении, что обусловлено превосходными упруго-

механическими свойствами кремния и их высокой стабильностью; наличием достаточно развитой технологии изготовления МОМРС и сопряжения их с широко используемыми кварцевыми волоконными световодами.

Резонансные частоты (f) мод собственных поперечных (изгибных) колебаний МОМРС, представленные на рис. 8, зависят от следующих факторов:

- внешние воздействия на МОМРС;
- условия эксплуатации (давление, температура и другие физические параметры);
- состав окружающей среды, что обусловлено процессами адсорбции (десорбции) на поверхности КЭ той или иной компоненты окружающей среды при нанесении на указанную поверхность соответствующего селективного адсорбента. Это может приводить к изменению эффективных упруго-механических характеристик КЭ, а также к эффекту «присоединенной» массы.

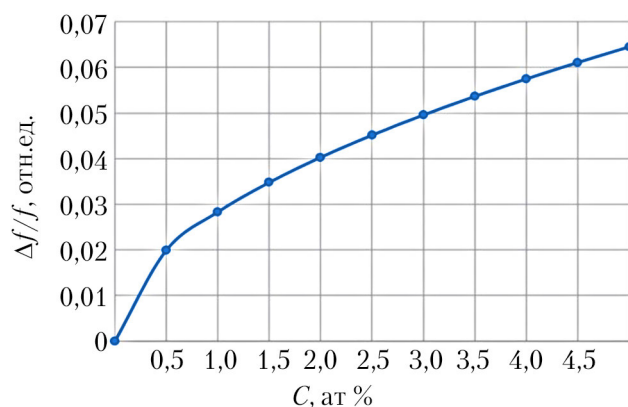


Рис. 8. Расчетная зависимость относительного смещения резонансной частоты МОМРС $\Delta f/f_0$

Известно [20], что эффективным и достаточно селективным адсорбентом для водорода является палладий (Pd), который образует с водородом химическое соединение переменного состава PdH_x , где переменная x характеризует содержание атомарного водорода в палладии и зависит от парциального давления молекулярного водорода (P_{H_2}) в окружающей среде: $x = 2,42 \cdot 10^{-4} \sqrt{P_{H_2}}$.

Упруго-механические свойства соединения PdH_x заметно отличаются от аналогичных параметров чистого палладия и зависят от x , что приводит к зависимости резонансной частоты МОМРС с тонкой пленкой палладия от концентрации водорода в окружающей среде. При малых концентрациях водорода $c = P_{H_2}/P_0 \ll 1$ ($P_0 \approx 10^5$ Па — нормальное давление) влияние присоединенной массы $\Delta m(c)$ незначительно, и зависимость резонансной частоты от концентрации водорода $f(c)$ обусловлена, в основном, изменением эффективных упруго-механических параметров составного КЭ с пленкой палладия. Это изменение связано, в основном, с уменьшением плотности и, соответственно, с относительным удлинением пленки палладия [21]:

$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = 0,026x \approx 1,96 \cdot 10^{-3} \sqrt{c}$, приводящим к деформации сжатия микроэлемента (в силу неподвижности его концов).

Отметим, что с точки зрения достижения максимальной чувствительности ВОРД к водороду целесообразно использование МОМРС с КЭ именно типа «микроэлемента», в которых оба указанных фактора — продольная деформация сжатия $\varepsilon_{эфф}(c)$ и присоединенная масса $\Delta m(c)$ — действуют в одном и том же направлении и приводят к уменьшению резонансной частоты МОМРС. В результате зависимость резонансной частоты рассматриваемой МОМРС от концентрации водорода выражается формулой [22]:

$$f(c) = f_0 \left[1 + \frac{\Delta m(c)}{M} \right]^{-\frac{1}{2}} \left[1 - \left(\frac{l}{h} \right)^2 \varepsilon_{эфф}(c) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где f_0 — резонансная частота в отсутствие водорода; $\Delta m(c)$ — масса водорода, поглощенного пленкой палладия; $M \approx \rho_{Si} l b h_{Si}$ — масса КЭ (без водорода); $\varepsilon_{эфф}(c) = \frac{2Y}{1+2Y} \varepsilon(c)$,

где $Y = \frac{E_{Pd} h_{Pd}}{E_{Si} h_{Si}}$; E_{Pd} , ρ_{Pd} (E_{Si} , ρ_{Si}) — соответственно, модули Юнга и плотности палладия и кремния (материала МОМРС); h_{Pd} , h_{Si} — толщина пленки палладия и колебательного элемента, соответственно.

Расчетная зависимость $\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_0 - f(c)}{f_0}$,

полученная с использованием численных значений величин: $h_{Pd} = 30$ нм; $h_{Si} = 2000$ нм (2 мкм); $E_{Pd} = 121$ ГПа; $E_{Si} = 131$ ГПа; $l = 350$ мкм (рис. 8). При $c \ll 1\%$ имеем:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_0 - f(c)}{f_0} \approx 7 \cdot 10^{-3} \sqrt{c}.$$

Известно [20], что относительная погрешность измерения резонансной частоты колебательной системы $\left\langle \frac{\Delta f}{f_0} \right\rangle$ существенно зависит от ее добротности (Q),

при этом $\left\langle \frac{\Delta f}{f_0} \right\rangle \sim Q^{-1}$. С учетом того, что

резонансная частота и механическая добротность рассматриваемых МОМРС составляют, соответственно, $f_0 \approx 100$ кГц, $Q \approx 10^2$ (на воздухе), относительная

погрешность измерения резонансной частоты может быть оценена как $\langle \frac{\Delta f}{f_0} \rangle \approx 10^{-5}$ [21].

Исходя из этого, для порога чувствительности рассматриваемых ВОРД получим оценку $c_{\min} \approx 0,001\%$ (10 ppm), показывающую, что чувствительность ВОРД значительно превышает чувствительность серийных отечественных и зарубежных датчиков контроля концентрации водорода. На основе литературных данных о быстродействии датчиков водорода с пленками Pd [20–22] можно оценить ожидаемое быстродействие рассматриваемых ВОРД (при $h_{\text{Pd}} = 20$ нм) на уровне 2–4 с по переднему фронту (нарастание); 8–15 с — по фронту релаксации. При этом отметим, что благодаря значительному запасу по чувствительности в рассматриваемых ВОРД могут быть использованы МОМРС с существенно меньшей толщиной пленки палладия ($h_{\text{Pd}} \approx 5–10$ нм), что позволит получить быстродействие (суммарное по обоим фронтам) не хуже 2 с. Для этого необходимо проведение цикла исследований, связанных с выработкой оптимальных технологических режимов формирования рассматриваемых составных МОМРС, обеспечивающих однородность и сплошность таких весьма тонких пленок, высокую стабильность характеристик при длительных сроках эксплуатации в изменяющихся условиях окружающей среды.

Результаты проведенных лабораторных исследований физических моделей 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 САЗ при стендовых испытаниях кислородно-водородных ЖРД РД0146Д и РД0150 разгонного блока КВТК и ступеней РН «Ангара-А5В» на стендах ФКП «НИЦ РКП».

Заключение

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

Применяемая в современных промышленных СКОН широкая номенклатура

серийных отечественных и зарубежных газоаналитических датчиков, основанных на различных физико-химических принципах, ограниченно годна к применению в стендовых системах и не может применяться в СКОН с функциями аварийной защиты.

Повышение основных характеристик газоаналитических систем (быстродействие, чувствительность, селективность) возможно при использовании некоторого ряда серийных датчиков, интегрированных в волоконно-оптическую сеть. Полученная сеть гибридных оптоволоконных датчиков обладает малой инерционностью, позволяет повысить эффективность САЗ и коэффициент охвата аварийных ситуаций.

Увеличение функциональных возможностей стендовых СКОН в части уменьшения массо-габаритных показателей, повышения надежности и быстродействия целесообразно проводить на основе разработки микрорезонансных датчиковых волоконно-оптических систем.

Целесообразно проведение НИОКР силами ФИРЭ имени В.А. Котельникова РАН, ФКП «НИЦ РКП» и ФГУП «НПО «Техномаш» с целью разработки единой технологии обеспечения пожаровзрывобезопасного проведения стендовых испытаний на таких компонентах топлива, как водород, метан, кислород.

Систему контроля опасных накоплений взрывоопасных газов на основе волоконно-оптических и микрорезонансных сред рекомендуется использовать в системах аварийной защиты при стендовых испытаниях кислородно-водородных ЖРД РД0146Д и РД0150, разгонного блока КВТК и ступеней РН «Ангара-А5В», перспективных изделий на топливной паре кислород–метан на стендах 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 // Альтернативная энергетика и экология. 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. 368 с.

3. Азатян В.В., Галеев А.Г. Эффективные методы химического управления воспламенением и детонацией газовых смесей водорода с воздухом и кислородом // Сб. тезисов докладов Российской научно-технической конференции «Ракетно-космическая техника и технология 2011». Самара: СГАУ, 2011. С. 124–127.

4. Попов Б.Б. Контроль концентраций водорода на стендах ракетно-космических систем // Полет. Специальный выпуск. 2009. С. 18–24.

5. Поляхов А.Д. Волоконно-оптическая система контроля утечек водорода при стендовых испытаниях ракетно-космических комплексов / Современное общество, образование и наука: сб. науч. тр. по материалам Международной науч.-практ. конф. Тамбов: ТРОО «Бизнес–Наука–Общество», 2012. Ч. 1. С. 95–98.

6. Поляхов А.Д. Повышение быстродействия газоаналитических систем мониторинга концентраций утечек водорода на основе идентификации с нечетким прогнозом // Общество, современная наука и образование: проблемы и перспективы: сб. науч. тр. по материалам Международной науч.-практ. конф. Тамбов: ТРОО «Бизнес–Наука–Общество», 2012. Ч. 5. С. 130–136.

7. Родченко В.В., Галеев А.Г., Попов Б.Б., Галеев А.В. Исследование систем обеспечения безопасности испытаний кислородно-водородных ДУ на стенде // Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 20. С. 42–52.

8. Патент РФ № 89708, МКИ G 01 N 27/02. Российская Федерация. Установка для сравнительных испытаний газоаналитических датчиков с имитацией натуральных условий. Галеев А.Г., Попов Б.Б.; заявка № 2009130189 от 05.08.2009 г.; опубликовано 10.12.2009 г.

9. Turan J., Ovsenik L., Turan J., Jr. *Optically powered fiber optic sensors* // *Acta Electrotechnica et Informatica*. 2005. V. 5. № 3. P. 1–7.

10. Задворнов С.А., Соколовский А.А. Энергосберегающее кодирование измерительной информации в гибридных волоконно-оптических датчиках // Датчики и системы. 2015. № 11. С. 17–20.

11. Соколовский А.А., Отчерцов А.В., Мусеев В.В. Оптоэлектронная измерительная система для удаленных датчиков с аналоговым выходом // Датчики и системы. 2015. № 12. С. 34–38.

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

13. Dubaniewicz T.H. et al. *Ignition of methane-air mixtures by laser heated small particles* // *Journal of loss prevention in the process industries*. 2000. № 13. P. 349–359.

14. Соколовский А.А. Фотовольтаические характеристики светодиодов на основе AlGaAs // Письма в Журнал технической физики. 2018. № 8. С. 57–62.

15. Соколовский А.А. Повышение эффективности системы питания электронных измерительных модулей оптическим излучением // Датчики и системы. 2016. № 12. С. 62–65.

16. Aspelmeyer M., Kippenberg T.J., Marquardt F. *Cavity Optomechanics. Nano- and Microoptomechanical Resonators Interacting with Light* // Springer. Verlag Berlin Heidelberg. 2014. 353 p.

17. Эткин Л.Г. Виброчастотные датчики. Теория и практика. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004. 408 с.

18. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. М.: Энергоатомиздат, 1989. 272 с.

19. Egorov F.A., Potapov V.T. *Fiber-optic sensors based on fiber-optic lasers and microoptomechanical resonance structures* // *Laser Physics*. 2011. V. 21. № 2. P. 299–303.

20. Fisser M., Badcock R.A., Teal P.D., Hunze A. *Optimizing the sensitivity of palladium based hydrogen sensors* // *Sensors and Actuators*. 2018. V. 259. P. 10–19.

21. Butler M.A., Ginley D.S. *Hydrogen sensing with palladium-coated optical fibers* // *Journal of Applied Physics*. 1988. V. 64. P. 3706–3712.

22. Henriksson J., Villanueva L.G., Brugger J. *Ultra-low power hydrogen sensing based on a palladium-coated nanomechanical beam resonator* // *Nanoscale*. 2012. V. 4. P. 5059–5064.

Статья поступила в редакцию 27.06.2019 г.
Окончательный вариант — 20.08.2019 г.

Reference

1. Galeev A.G. *Ob opyte otrabotki raketnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok na vodorodnom toplive i problemy obespecheniya ikh bezopasnosti* [About experience in developing rocket engines and power

generating systems running on hydrogen propellant and problems in assuring their safety]. *Alternativnaya energetika i ekologiya*, 2007, no. 7, pp. 8–14.

2. Galeev A.G., Denisov K.P., Ishchenko V.I., Liseikin V.A., Saidov G.G., Cherkashin A.Yu. *Ispytatel'nye komplekсы i eksperimental'naya otrabotka zhidkostnykh raketnykh dvigatelei* [Test facilities and developmental testing liquid propellant rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie. Mashinostroenie – Polet publ., 2012. 368 p.

3. Azatyay V.V., Galeev A.G. *Effektivnye metody khimicheskogo upravleniya vosplamneniem i detonatsiei gazovykh smesei vodoroda s vozdukhom i kislorodom* [Efficient methods of chemical control over ignition and detonation of gaseous mixtures of hydrogen with air and oxygen]. *Book of abstracts of the Russian scientific and technical conference «Rocket and space engineering and technology 2011»*. Samara, SGAU publ., 2011. Pp. 124–127.

4. Popov B.B. *Kontrol' kontsentratsii vodoroda na stendakh raketno-kosmicheskikh sistem* [Monitoring hydrogen concentration in the test stands for rocket and space systems]. *Polet. Special issue*, 2009, pp. 18–24.

5. Polyakhov A.D. *Volonno-opticheskaya sistema kontrolya utechek vodoroda pri stendovykh ispytaniyakh raketno-kosmicheskikh kompleksov* [A fiber-optic system for monitoring hydrogen leaks during stand tests of rocket and space systems]. *Modern society, education and science: Collection of scientific papers from the International research-to-practice conference*. Tambov, TROO Biznes–Nauka–Obshchestvo publ., 2012, part 1, pp. 95–98.

6. Polyakhov A.D. *Povyshenie bystrodeistviya gazoanaliticheskikh sistem monitoringa kontsentratsii utechek vodoroda na osnove identifikatsii s nechetkim prognozom* [Improving response time of gas analytical systems for monitoring concentrations of hydrogen leaks based on identification with fuzzy prediction]. *Society, modern science and education: problems and prospects: Collection of scientific papers from the International research-to-practice conference*. Tambov, TROO Biznes–Nauka–Obshchestvo publ., 2012, part 5, pp. 130–136.

7. Rodchenko V.V., Galeev A.G., Popov B.B., Galeev A.V. *Issledovanie sistem obespecheniya bezopasnosti ispytaniy kislorodno-vodorodnykh DU na stende* [Study of systems for assuring safety of static firing tests of oxygen/hydrogen propulsion units]. *Alternativnaya energetika i ekologiya*, 2015, no. 20, pp. 42–52.

8. Patent RF № 89708, MKI G 01 N 27/02. Rossiiskaya Federatsiya. *Ustanovka dlya sravnitel'nykh ispytaniy gazoanaliticheskikh datchikov s imitatsiei naturnykh uslovii* [Setup for comparative testing of gas analysis sensors with simulation of natural environments]. Galeev A.G., Popov B.B.; application 2009130189; priority of 05.08.2009; published 10.12.2009.

9. Turan J., Ovsenik L., Turan J., Jr. *Optically powered fiber optic sensors*. *Acta Electrotechnica et Informatica*, 2005, vol. 5, no. 3, pp. 1–7.

10. Zadornov S.A., Sokolovskii A.A. *Energosberegayushchee kodirovanie izmeritel'noi informatsii v gibrnidnykh volokonno-opticheskikh datchikakh* [Energy-saving encoding of measurement data in hybrid fiber-optic sensors]. *Datchiki i sistemy*, 2015, no. 11, pp. 17–20.

11. Sokolovskii A.A., Otchertsov A.V., Moiseev V.V. *Optoelektronnaya izmeritel'naya sistema dlya udalennykh datchikov s analogovym vykhodom* [Optoelectronic measuring system for remote sensors with analog output]. *Datchiki i sistemy*, 2015, no. 12, pp. 34–38.

12. Zadornov S.A., Sokolovskii A.A. *O pozharovzryvobezopasnosti volokonno-opticheskikh gibrnidnykh izmeritel'nykh sistem* [About fire and explosion safety of fiber-optic hybrid measuring systems]. *Datchiki i sistemy*, 2007, no. 3, pp. 11–13.

13. Dubaniewicz T.H. et al. *Ignition of methane-air mixtures by laser heated small particles*. *Journal of loss prevention in the process industries*, 2000, no. 13, pp. 349–359.

14. Sokolovskii A.A. *Fotovolt'naicheskie kharakteristiki svetodiodov na osnove AlGaAs* [Photovoltaic characteristics of AlGaAs-based LEDs]. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2018, no. 8, pp. 57–62.

15. Sokolovskii A.A. *Povyshenie effektivnosti sistemy pitaniya elektronnykh izmeritel'nykh modulei opticheskim izlucheniem* [Improving efficiency of the system for supplying power to electronic measuring modules by optical radiation]. *Datchiki i sistemy*, 2016, no. 12, pp. 62–65.

16. Aspelmeyer M., Kippenberg T.J., Marquardt F. *Cavity Optomechanics. Nano- and microoptomechanical resonators interacting with light*. Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 353 p.

17. Etkin L.G. *Vibrochastotnye datchiki. Teoriya i praktika* [Vibration frequency sensors. Theory and practice]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman publ., 2004. 408 p.

18. Malov V.V. *P'ezorezonansnye datchiki* [Piezoresonance sensors]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1989. 272 p.

19. Egorov F.A., Potapov V.T. *Fiber-optic sensors based on fiber-optic lasers and microoptomechanical resonance structures*. *Laser Physics*, 2011, vol. 21, no. 2, pp. 299–303.

20. Fisser M., Badcock R.A., Teal P.D., Hunze A. *Optimizing the sensitivity of palladium based hydrogen sensors*. *Sensors and Actuators*, 2018, vol. 259, pp. 10–19.

21. Butler M.A., Ginley D.S. *Hydrogen sensing with palladium-coated optical fibers*. *Journal of Applied Physics*, 1988, vol. 64, pp. 3706–3712.

22. Henriksson J., Villanueva L.G., Brugger J. *Ultra-low power hydrogen sensing based on a palladium-coated nanomechanical beam resonator*. *Nanoscale*, 2012, vol. 4, pp. 5059–5064.

Издатель

Четырежды ордена Ленина,
ордена Октябрьской Революции
ПАО «Ракетно-космическая
корпорация “Энергия” им. С.П. Королёва»

Научный редактор

Синявский В.В.

Редакторская группа

Черных О.А.
Лосикова А.А.

Дизайн и верстка

Кузнецова Т.В.

Разработка макета и дизайн обложки

Милехин Ю.Н.
Паук Е.В.

Фотограф

Григоренко Н.А.

Перевод

Сектор переводов контрактной
документации РКК «Энергия»

Адрес редакции

Ул. Ленина, 4А, г. Королёв,
Московская область,
Российская Федерация, 141070
Тел. 8(495)513-87-46
E-mail: ktt@rsce.ru
<http://www.energia.ru/ktt/index.html>

Подписной индекс 40528 («Пресса России»)

Дата выхода в свет 30 III, VI, IX, XII мес.

Подписано в печать 28.02.2020 г. Формат 60×84/8.
Бумага мелованная. Цифровая печать.
Объем 17 печ. л. Тираж 200 экз. Заказ № 8108
Оригинал-макет подготовлен редакцией журнала
«Космическая техника и технологии»
Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии ПАО «РКК “Энергия” им. С.П. Королёва»