

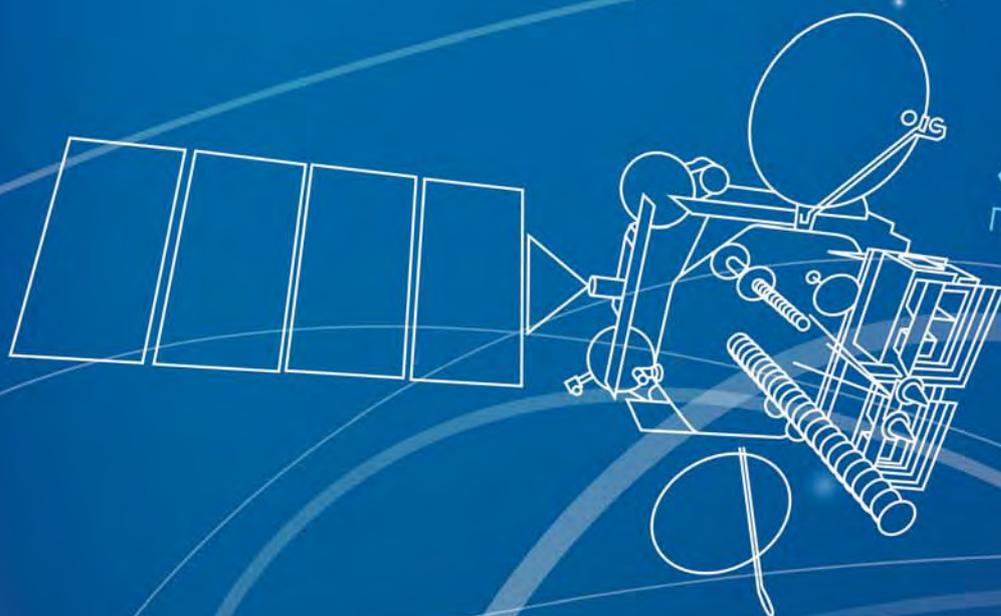
# ИССЛЕДОВАНИЯ НАУКО ГРАДА

Издается с января 2012 года  
Научный журнал

ISSN 2225-9449

Том 1  
№ 3 (21)

июль – сентябрь 2017  
Выходит один раз в три месяца



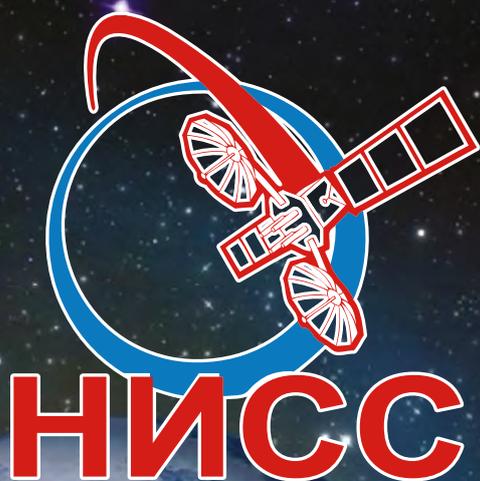
«Электро-Л»  
Производитель: АО «НПО Лавочкина»



Технологическая платформа

## НИСС

Национальная информационная  
спутниковая система



Деятельность технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система» направлена на скоординированное решение комплекса образовательных, научных, технических, технологических и экономических проблем создания и использования перспективных космических систем и комплексов.

Стратегической целью технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система» является разработка совокупности «прорывных» технологий для:

- радикального повышения показателей пользовательских свойств космических аппаратов новых поколений и доступности персональных пакетных космических услуг;
- значительного расширения присутствия на мировых рынках высокотехнологичной продукции и услуг в космической, телекоммуникационной и других некосмических отраслях экономики.

Журнал является официальным научным изданием технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система».

Сайт ТП «НИСС»: [tp.iss-reshetnev.ru](http://tp.iss-reshetnev.ru)

ISSN 2225-9449

**ИССЛЕДОВАНИЯ**  
**НАУКО**  
Издается с января 2012 года  
Научный журнал  
**ГРАДА**

---

---

Том 1

№ 3 (21)

июль – сентябрь 2017

Выходит один раз в три месяца

Красноярский край  
Железногорск

2017

# Исследования наукограда

## Научный журнал

Издается с января 2012 года

Главный редактор  
**Тестоедов Николай Алексеевич**  
чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, председатель редакционного совета  
(Железногорск)

Заместитель главного редактора  
**Халиманович Владимир Иванович**  
канд. физ.-мат. наук, профессор (Железногорск)

Ответственный секретарь  
**Хныкин Антон Владимирович**  
канд. техн. наук (Железногорск)

Редакционная коллегия  
**Гарин Евгений Николаевич**  
д-р техн. наук, профессор (Красноярск)

**Головёнкин Евгений Николаевич**  
д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

**Двурный Валерий Васильевич**  
д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

**Ковель Анатолий Архипович**  
д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

**Косенко Виктор Евгеньевич**  
д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

**Лопатин Александр Витальевич**  
д-р техн. наук (Красноярск)

**Охоткин Кирилл Германович**  
д-р физ.-мат. наук, доцент (Железногорск)

**Пономарев Сергей Васильевич**  
д-р физ.-мат. наук (Томск)

**Цибульский Геннадий Михайлович**  
д-р техн. наук, профессор (Красноярск)

**Чеботарёв Виктор Евдокимович**  
д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

**Матвеев Станислав Алексеевич**  
канд. техн. наук (Санкт-Петербург)

**Непомнящий Олег Владимирович**  
канд. техн. наук, доцент (Красноярск)

**Смотров Андрей Васильевич**  
канд. техн. наук (Жуковский)

**Сухотин Виталий Владимирович**  
канд. техн. наук, доцент (Красноярск)

**Хартов Станислав Викторович**  
канд. техн. наук (Красноярск)

**Фернандес Кабальеро Антонио**  
профессор (Альбасете, Испания)

**Нинкович Деян**  
д-р техн. наук (Белград, Сербия)

Редакционный совет  
**Аннин Борис Дмитриевич**  
академик РАН, д-р физ.-мат. наук (Новосибирск)

**Шабанов Василий Филиппович**  
академик РАН, д-р физ.-мат. наук (Красноярск)

**Попов Гарри Алексеевич**  
академик РАН, д-р техн. наук (Москва)

**Васильев Валерий Витальевич**  
чл.-кор. РАН, д-р техн. наук (Хотьково)

**Махутов Николай Андреевич**  
чл.-кор. РАН, д-р техн. наук (Москва)

**Псахье Сергей Григорьевич**  
чл.-кор. РАН, д-р физ.-мат. наук (Томск)

**Шайдуров Владимир Викторович**  
чл.-кор. РАН, д-р физ.-мат. наук (Красноярск)

**Чернявский Александр Григорьевич**  
(Королёв)

**Медведский Александр Леонидович**  
д-р физ.-мат. наук (Жуковский)

**Овчинников Сергей Геннадьевич**  
д-р физ.-мат. наук, профессор (Красноярск)

**Пчеляков Олег Петрович**  
д-р физ.-мат. наук, профессор (Новосибирск)

**Хартов Виктор Владимирович**  
д-р техн. наук, профессор (Королёв)

ISSN 2225-9449

Издатель  
Ассоциация «Технологическая платформа  
«Национальная информационная спутниковая система»

Журнал «Исследования наукограда» – рецензируемый научный журнал технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система».

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77 - 61605 от 07.05.2015 г.)

Импакт-фактор РИНЦ за 2016 г. – 0,268

«Исследования наукограда» публикуют оригинальные работы, обзорные статьи, очерки и обсуждения, охватывающие последние достижения в области космонавтики.

Тематические направления журнала:

- ракетно-космическая техника;
- новые материалы и технологии в космической технике;
- космическое приборостроение;
- космические услуги;
- инновации и экономика космической отрасли.

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях. Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят закрытое (слепое) рецензирование.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com), [www.cyberleninka.ru](http://www.cyberleninka.ru)

Учредитель  
Общество с ограниченной ответственностью «Умный город»

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 - 61605 от 07.05.2015

Адрес редакции: 662971, г. Железногорск, ул. Кирова, 12а  
E-mail: [isercit@gmail.com](mailto:isercit@gmail.com); <http://www.journal-niss.ru>

Адрес издателя:  
662972, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Ленина, 52

Допечатная подготовка:  
ООО «Центр информации»  
660079, г. Красноярск, ул. Свердловская, 23, к. 32  
[lev\\_zhivilo@mail.ru](mailto:lev_zhivilo@mail.ru)  
Разработка макета Л. М. Живило  
Редактор Н. Ф. Ткачук  
Компьютерная верстка: Л. М. Живило, И. В. Манченкова

Тираж 200 экз. Заказ 3538  
Распространяется бесплатно

Отпечатано Библиотечно-издательским комплексом  
Сибирского федерального университета  
660041, Красноярск, пр. Свободный, 82а  
Тел. (391) 206-26-67; <http://bik.sfu-kras.ru>  
E-mail: [publishing\\_house@sfu-kras.ru](mailto:publishing_house@sfu-kras.ru)

ISSN 2225-9449

# THE RESEARCH OF THE **SCIENCE** CITY

Published since 2012  
Scientific quarterly journal

---

---

Volume 1  
№ 3 (21)  
July – September 2017

Zheleznogorsk  
Krasnoyarsk region  
2017

# The Research of the Science City

Scientific quarterly journal

Published since 2012

Chief Editor

**Testoyedov N. A.**

Corresponding Member of RAS, Doctor of Engineering, Chairman of Editorial Board

Deputy Chief Editor

**Khalimanovich V. I.**

PhD in Physics and Mathematics, Professor

Executive Secretary

**Khnykin A. V.**

PhD in Engineering

ISSN 2225-9449

Publisher

Association «Technology Platform  
«National Information Satellite System»

«The Research of the Science City» is peer-reviewed scientific journal of Technology Platform «National Information Satellite System».

The journal is registered by the the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (PI certificate no. FS 77 - 61605, May 05, 2015).

The journal publishes original papers, reviews articles, rapid communications and discussions covering recent advances in space.

The journal directions:

- Rocket and space equipment;
- New materials and technologies in space equipment;
- Space instrument engineering;
- Space Services;
- Innovation and economics of the space industry.

«The Research of the Science City» publishes only original research articles. All articles are peer reviewed by international experts. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication.

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com), [www.cyberleninka.ru](http://www.cyberleninka.ru)

Founder

Limited Liability Company «Smart city»

Editorial Board

**Annin B. D.**

Academician of RAS, Doctor of Physics and Mathematics (Russia)

**Shabanov V. Ph.**

Academician of RAS, Doctor of Physics and Mathematics (Russia)

**Popov G. A.**

Academician of RAS, Doctor of Engineering (Russia)

**Vasiliev V. V.**

Corresponding Member of RAS, Doctor of Engineering (Russia)

**Makhutov N. A.**

Corresponding Member of RAS, Doctor of Engineering (Russia)

**Psakhie S. G.**

Corresponding Member of RAS, Doctor of Physics and Mathematics (Russia)

**Shaidurov V. V.**

Corresponding Member of RAS, Doctor of Physics and Mathematics (Russia)

**Cherniavsky A. G.**

(Russia)

**Medvedtskiy A. L.**

Doctor of Physics and Mathematics (Russia)

**Ovchinnikov S. G.**

Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Russia)

**Pchelyakov O. P.**

Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Russia)

**Khartov V. V.**

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

**РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА**

**В. П. Зюзликов, Б. Е. Синильщиков,  
В. Б. Синильщиков, М. В. Ракитская**  
ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ  
ПРИ ЗАПУСКЕ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

**В. А. Пинчук, А. В. Пинчук**  
РЕСУРСЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ  
И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**А. В. Колычев, В. А. Керножицкий**  
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ  
ТЕРМОЭМИССИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ  
СО СВЕРХДЛИТЕЛЬНЫМ СРОКОМ  
АКТИВНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ

**КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**

**В. Б. Иванов, А. А. Холмогоров, О. А. Горбачев**  
АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ  
ОДНОЧАСТОТНЫХ ПРИЕМНИКОВ ГНСС  
ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИОНОСФЕРЫ

**Р. Б. Ковалев**  
МЕТОДЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ БОРЬБЫ  
В ОБЛАСТИ КОСМИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ  
И ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ  
В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ**

**Н. В. Луконин, О. А. Белов, Д. М. Доронкин,  
А. Н. Коробкин, И. Я. Шестаков**  
ПРИМЕНЕНИЕ СПОСОБА БЕСКОНТАКТНОЙ  
ПАЙКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОНАДЕЖНЫХ  
ПРЕЦИЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ УСТРОЙСТВ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**ROCKET AND SPACE EQUIPMENT**

103 **V. P. Zyuzlikov, B. E. Sinilshchikov,  
V. B. Sinilshchikov, M. V. Rakitskaya**  
COMPUTATIONAL INVESTIGATION OF  
NONSTATIONARY PROCESSES AT LAUNCH  
OF THE ROCKET ENGINE

115 **V. A. Pinchuk, A. V. Pinchuk**  
RESOURCES OF INCREASE OPERATIONAL  
AND TECHNICAL-ECONOMIC INDICES  
OF HEAT-ENGINES

126 **A. V. Kolychev, V. A. Kernozhitskiy**  
HYDRODYNAMIC THERMIONIC CONVERTERS  
POWER PLANTS OF SPACECRAFTS WITH THE  
SUPERLONGTERM LIFECICLE

**SPACE INSTRUMENT ENGINEERING**

130 **V. B. Ivanov, A. A. Kholmogorov, O. A. Gorbachev**  
ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING  
SINGLE-FREQUENCY GNSS RECEIVERS  
FOR MONITORING OF THE IONOSPHERE

139 **R. B. Kovalyov**  
METHODS OF ELECTRONIC WARFARE  
IN SPACE NAVIGATION AND PROTECTION  
OF SPACECRAFTS

**NEW MATERIALS AND TECHNOLOGIES  
IN SPACE EQUIPMENT**

144 **N. V. Lukonin, O. A. Belov, D. M. Doronkin,  
A. N. Korobkin, I. Y. Shestakov**  
THE USE OF NON-CONTACT SOLDERING  
TO CREATE A HIGHLY RELIABLE PRECISION  
CONNECTION OF ANTENNA-FEEDER DEVICES  
OF SPACECRAFT

## ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЗАПУСКЕ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

**В. П. Зюзликов, Б. Е. Синильщиков, В. Б. Синильщиков,  
М. В. Ракитская**

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация*

*Рассматриваются нестационарные процессы в сопле и развитие нестационарной струи при запуске ракетного двигателя; определяются нестационарные газодинамические нагрузки, действующие на донную часть ракеты космического назначения при старте. Численно решаются нестационарные уравнения Навье–Стокса с использованием алгебраических моделей турбулентности. Учитываются отрывные течения в сопле, которые, как показали авторы, оказывают существенное влияние на величины нагрузок. Проведено исследование двух вариантов выхода двигателя на режим: с малым временем выхода и с временем выхода, характерным для современных двигателей, используемых на ракетах космического назначения. Приводятся результаты расчетов: поля температур газа, статического давления, чисел Маха, а также графики давления на днище ракеты. Показано, что для обоих вариантов запуска из-за перехода от истечения воздуха из сопла к истечению продуктов сгорания и отрывных течений в сопле массовый расход через плоскость среза сопла вначале достигает максимума, а потом резко падает. Это приводит к формированию волн разрежения, существенно влияющих на величины нагрузок. Через некоторое время начинается фаза пульсационного воздействия. Показано, что начало фазы определяется приближением точки пересечения последней (пограничной) характеристикой течения Прандтля–Майера с диском Маха к оси струи. Это сопровождается перестроением волновой структуры, в результате чего диск Маха перестраивается в криволинейный выпуклый скачок. Расчетные частоты колебаний, как и частоты, измеренные в натуральных условиях, оказываются несколько ниже частоты пауэлловских колебаний, определенных по длине первой бочки струи.*

*Ключевые слова: ракетный двигатель, сопло, пусковые волны, отрыв, давление, разрежение.*

При запуске ракетного двигателя (РД) в окружающем пространстве распространяются пусковые волны (ПВ). Первоначально из сопла выходит ударная волна и последующий пакет волн сжатия, догоняющих ее. Далее происходит отражение этих волн от элементов пусковой установки (ПУ). Фаза сжатия заканчивается переходом к нестационарному знакопеременному колебательному процессу. Амплитуды давлений в таких волнах при открытом старте ракет космического назначения (РКН) с ЖРД обычно не превышают  $0,15\text{--}0,3\text{ кг/см}^2$  (при использовании РДТТ – выше), и они, как правило, не представляют опасности для элементов ПУ, но их воздействие на днище и нижнюю часть боковой поверхности РКН может быть опасным. Впервые на эту проблему обратили внимание при создании шахтных пусковых

установок, когда отраженные от стенок шахты ПВ стали представлять опасность для ракеты [1]. При исследовании этих процессов первоначально основное внимание уделялось внешнему течению, и первые численные методики расчета ПВ не учитывали процессов отрыва течения от стенок сопла, которые, как будет показано ниже, оказывают существенное влияние на уровни ударноволновых нагрузок.

Отрывным течениям в сопле посвящено достаточно много как экспериментальных, так и численных исследований [2, 3]. Однако во всех этих работах рассматриваются стационарные или квазистационарные режимы работы сопла, в то время как при запуске течение – существенно нестационарное.

Ранее авторами была разработана математическая модель и программа численного расчета ПВ при запуске РД, в которой турбулентность в пограничном слое не учитывалась, для определения точки отрыва течения в сопле использова-

лось эмпирическое соотношение, связывающее число Маха перед точкой отрыва с отношением давлений перед точкой отрыва в сверхзвуковом потоке и в зоне отрыва, а для моделирования отрыва использовалась соответствующая структура сетки [4]. Расчеты показали, что после прохождения пусковых волн возникает фаза пульсационных процессов. Наличие экрана (контейнера или проема оголовка) может заметно увеличить уровень нестационарного воздействия на днище РКН.

Следует отметить, что задача расчета ПВ, сопряженная с нестационарным расчетом отрывных течений в сопле с учетом пограничного слоя на большом промежутке времени (от запуска РД до выхода на предварительную или главную ступень тяги), является крайне ресурсоемкой. Это связано, в частности, с необходимостью введения малых пристеночных ячеек, причем необходимость учета нестационарных эффектов, связанных с отрывом, делает невозможным существенное увеличение для таких ячеек числа Куранта при использовании неявной схемы. С другой стороны, корректный расчет ПВ во внешней среде с учетом их отражения от элементов ПУ требует включения в расчетную область достаточно большого пространства. Нестационарный трехмерный расчет для всего газодинамического тракта требует неприемлемо больших ресурсов. Для проведения достаточно большой серии расчетов на доступных ЭВМ приходится идти на значительные упрощения. Из расчетной области исключается газоотводящий тракт и рассматривается запуск РД в свободном пространстве. Задача решается в осесимметричной постановке (не учитываются трансверсальные колебания). Учитывая, что применение методологии LES невозможно из-за высокой ресурсоемкости, а использование даже современных моделей RANS при расчете отрывных течений, как показано в [5–7], может привести к значительным погрешностям, в данной работе использовались наименее ресурсоемкие алгебраические модели (модель Болдуина–Ломакса – в пограничном слое и разработанная авторами и описанная в [8] модель турбулентности в слое смешения). Повышение точности достигается посредством корректирующего коэффициента для турбулентности в области отрыва по согласованию с экспериментально измеренными значениями донного давления. В остальном математическая модель и метод расчета аналогичны описанным в [8] (параметры, относящиеся к капельной фазе, принимаются нулевыми).

Для лучшего понимания нестационарных процессов сначала рассмотрим «пушечный» запуск РД (с малым временем выхода на режим) – вариант 1. На рис. 1–3 приведены результаты расчета запуска РД с параметрами на срезе, соответствующими параметрам двигателя РД-191. Время выхода РД на режим выбрано очень малым – 0,08 с;

закон роста давления в камере сгорания (КС) – линейный. На этом и последующих рисунках отсчет времени ведется с момента достижения давления в камере РД уровня  $p = 1,1$  ата. На рис. 1, а цветом показано поле температуры газа  $T$  в момент времени  $t = 0,004$  с (абсолютное давление в КС – 9,4 ата). На этом и последующих рисунках линиями показаны изолинии числа Маха ( $M = 0,01$  – линия черного цвета; 0,05 – розового; 0,2 – черного; 0,5 – зеленого; 0,7 – черного; 1,0 – синего; 1,2, 1,4, 1,6 и 1,8 – черного; 2,0 – красного, 2,2, 2,4, 2,6 и 2,8 – черного; 3,0 – розового, 3,2, 3,4, 3,6, 3,8 – черного). На рис. 2 приводятся временные зависимости расхода газа через срез сопла

$$G = \int \rho_a U_a dF_a$$

и условной (без учета нестационарных эффектов) тяги РД

$$R = \int_{F_a} (\rho_a U_a^2 + \Delta p_a) dF_a$$

(здесь  $dF_a$  – элемент площади среза  $r_a$ ,  $\Delta p_a$  и  $U_a$  – плотность, избыточное давление и осевая проекция скорости газа на срезе). На рис. 3 приводятся графики избыточного давления в численных датчиках 1 и 2 на наружной поверхности сопла у среза и на днище РКН – см. рис. 1, а.

Повышение давления в КС вызывает расширение волн сжатия в сторону среза и одновременно повышение скорости (по мере прохождения пусковых волн). Вначале течение во всем сопле дозвуковое, сопло заполнено холодным воздухом. По мере прохождения пусковых волн скорость увеличивается, и в какой-то момент в критическом сечении сопла она становится звуковой. После этого в расширяющейся части сопла воздух начинает разгоняться до сверхзвуковой скорости (с одновременным падением давления при расширении). Воздух, прошедший критическое сечение раньше этого момента, течет в сопле еще с дозвуковой скоростью. Сверхзвуковое течение догоняет дозвуковое, что приводит к образованию между сверхзвуковым и дозвуковым потоками скачка уплотнения. На рис. 1, а видно, что первичная ударная волна достигла середины расширяющейся части сопла. Давление за ней поднялось до 1,21 кг/см<sup>2</sup> (здесь и ниже в расчетной области приводятся значения избыточных давлений). Максимальное число Маха в пока еще холодной струе достигло  $M = 2,3$ . За критическим сечением струя оторвалась от стенок, что видно из изолинии  $M = 1,0$  (синий цвет) с образованием зоны обратного течения. Течение посредине сопла остается безотрывным.

На рис. 1, б показано поле температур в момент времени  $t = 0,008$  с (давление в КС 17,8 ата). Достаточно четко выделяется диск Маха (скачок

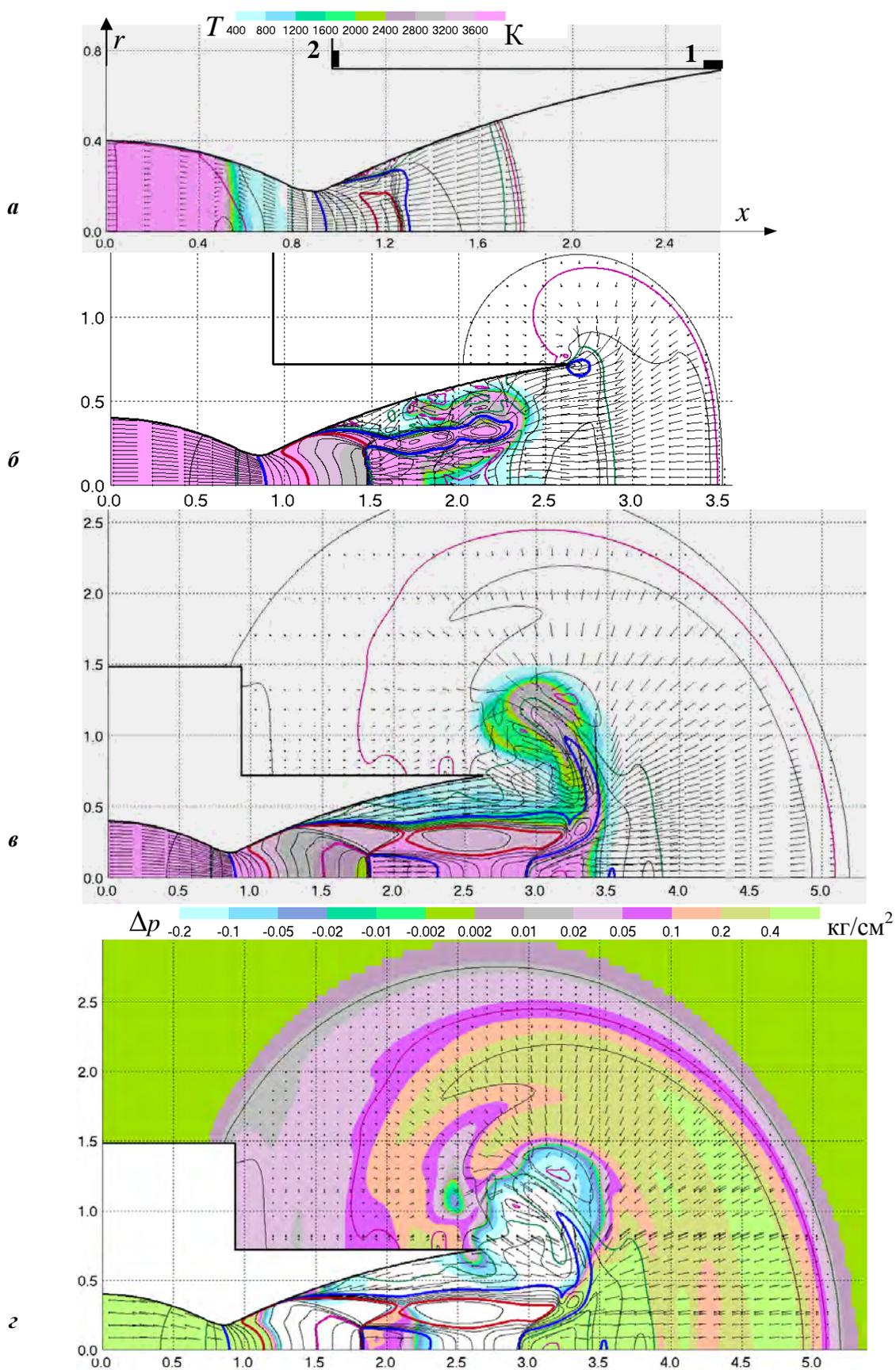


Рис. 1. *a–в* Вариант 1: *a–в* – поля температуры для  $t = 0,004$  с,  $t = 0,008$  с и  $t = 0,012$  с, *г* – поле избыточного давления для  $t = 0,012$  с

уплотнения в приосевой части струи в сечении  $x \approx 1,5$  м по форме близок к прямому) и отходящие от тройной точки косые скачки. Продукты сгорания прошли через диск Маха и приближаются к срезу сопла, а пакет пусковых волн вышел из сопла. Поток, прошедший через два косых скачка (отходящих от тройной точки), имеет сверхзвуковую скорость и распространяется в виде тонкой кольцевой сверхзвуковой струи ( $1,5 \text{ м} \leq 2,3 \text{ м}$ ,  $r \approx 0,3 \text{ м}$ ). Данный момент приблизительно соответствует максимумам расхода газа через срез сопла и условной тяги – см. рис. 2. Последующее резкое падение расхода и тяги (в 3–6 раз) связано с уменьшением плотности после того, как через срез начинают истекать высокотемпературные продукты сгорания, а также с затеканием воздуха из внешней среды в циркуляционную область после отрыва потока от стенок сопла.

Пока расход возрастает, фронт первичной ударной волны, вышедшей из сопла, имеет подпитку за счет пакета последующих волн сжатия, что частично компенсирует падение давления на фронте при его сферическом расширении. После падения расхода подпитка прекращается и вслед за волнами сжатия начинают распространяться волны разрежения.

На рис. 1, в показано поле температур, а на рис. 1, г – избыточного статического давления при  $t = 0,012$  с (давление в КС 26,3 ата). Давление на срезе сопла в области отрыва падает до  $-0,4 \text{ кг/см}^2$ , при этом в районе самой точки отрыва остается еще небольшая область с положительным давлением. И в дальнейшем давление в области отрывного течения существенно изменяется в пространстве и времени.

На рис. 1, д показано поле давлений в момент времени  $t = 0,016$  с (давление в КС  $34,6 \text{ кг/см}^2$ ). Формы скачков, их положения и положение точки отрыва существенно изменились в сравнении с рис. 1, г. Вместо диска Маха, близкого по форме к прямому скачку, образовался криволинейный скачок, распадающийся в его периферийной части на два косых. Подобный эффект описан в [9]. Это связано с приближением точки пересечения последней (пограничной) характеристики Прандтля–Майера (на рис. 1, д она показана пунктирной линией) со скачком к оси струи. До этой характеристики (между характеристикой и осью) скорости практически не меняются по радиусу; после характеристики – быстро падают по мере увеличения радиуса. Это приводит к образованию новой конфигурации скачка выпуклой формы, причем после перестройки он смещается в сторону критического сечения. На рис. 1, д видно, что скорости газа за скачком в данный момент времени направлены в сторону критического сечения (при этом скорость самого скачка, перемещающегося также в сторону критического сечения, боль-

ше скорости газа за ним). Причина связана с тем, что поток, прошедший два косых скачка (на радиусах  $r \approx 0,2\text{--}0,4 \text{ м}$  – см. рис. 1, д), имеет большее статическое давление, чем полное давление газа, прошедшего прямой скачок в районе оси. Разница давлений оказывается настолько существенной, что газ, текущий в обратном направлении в районе оси, разгоняется до небольших сверхзвуковых скоростей ( $x \approx 2,5 \text{ м}$ ). Такая конфигурация ударных волн с обратным направлением течения газа в приосевой области за центральным скачком была численно исследована в работе [9]. Показано, что эта конфигурация является неустойчивой и скачок может совершать колебания с определенной частотой, что сопровождается изменением давления в приосевой области. Структура сверхзвуковой струи при этом также постоянно деформируется: изменяет свое положение как граница внутренней дозвуковой зоны, так и наружная граница струи. Изменяется и положение точки отрыва, причем скорость перемещения точки отрыва изменяется в диапазоне от 25 м/с в направлении среза сопла до 10 м/с в противоположном направлении, а обратные перемещения точки отрыва за один полупериод достигают 0,25–0,3 м. Изменение структуры течения сопровождается интенсивным излучением акустических волн, которые накладываются на пусковые волны. Как показано на рис. 1, д, пусковая волна прошла донный срез ракеты. Численный датчик 2 на донном срезе фиксирует максимум давления  $\Delta p = 0,39 \text{ кг/см}^2$  при  $t = 0,0153$  с (см. рис. 3). Большое значение максимума объясняется малым временем выхода РД на режим.

Быстрое нарастание и последующее (при  $t = 0,008$  с) быстрое уменьшение расхода через срез сопла в некоторой степени аналогично течению при взрыве. Классический взрыв сопровождается выбросом в пространство большого объема газа, после чего расход резко падает и наступает фаза разрежения. В данной задаче также можно выделить фазу разрежения при  $t = 0,17\text{--}0,24$  с – см. рис. 3. На эти процессы накладываются описанные выше пульсации давления. При развитии нестационарной струи образовались мощные пусковые вихри. В процессе перестройки и изменения ударно-волновой структуры струя взаимодействует с этими вихрями, что также оказывает влияние на ее структуру. На рис. 1, е показаны поля статического давления в моменты времени  $t = 0,027$  с (давление в КС  $57,7 \text{ кг/см}^2$ ). Повышение давления в камере РД привело к восстановлению традиционной волновой структуры с диском Маха.

На рис. 1, ж–з показаны поля статического давления в моменты времени 0,041 с и 0,043 с (давления в КС  $87 \text{ кг/см}^2$  и  $91 \text{ кг/см}^2$ ). Точка отрыва приближается к срезу сопла. В сечении  $x = 4,3\text{--}4,6 \text{ м}$  около границы струи имеются области, в которых происходит быстрое изменение давления, что со-

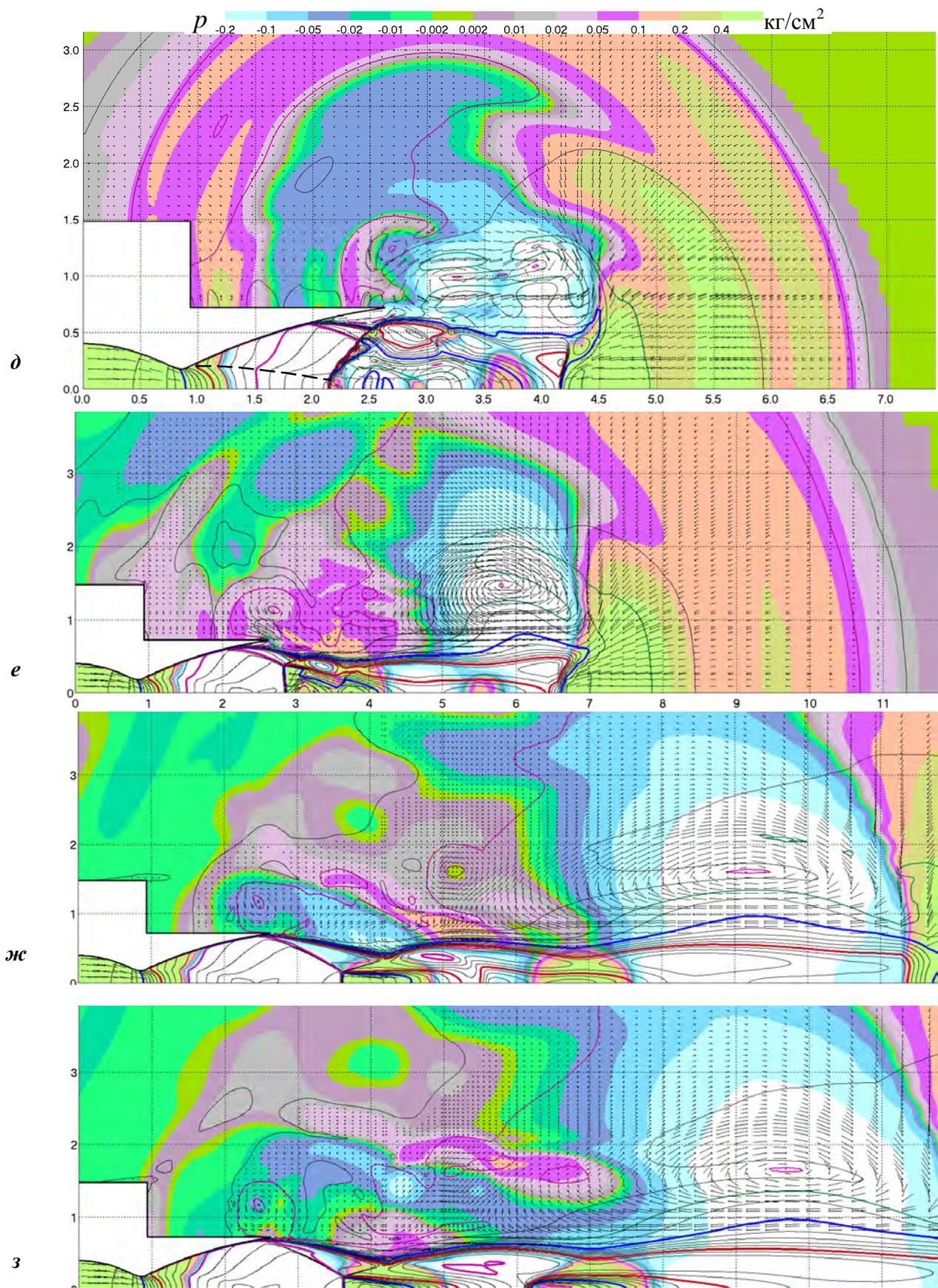


Рис. 1.  $\delta$ - $z$  Вариант 1. Поля избыточного давления для  $t = 0,016$  с,  $t = 0,027$  с,  $t = 0,041$  с и  $t = 0,043$  с

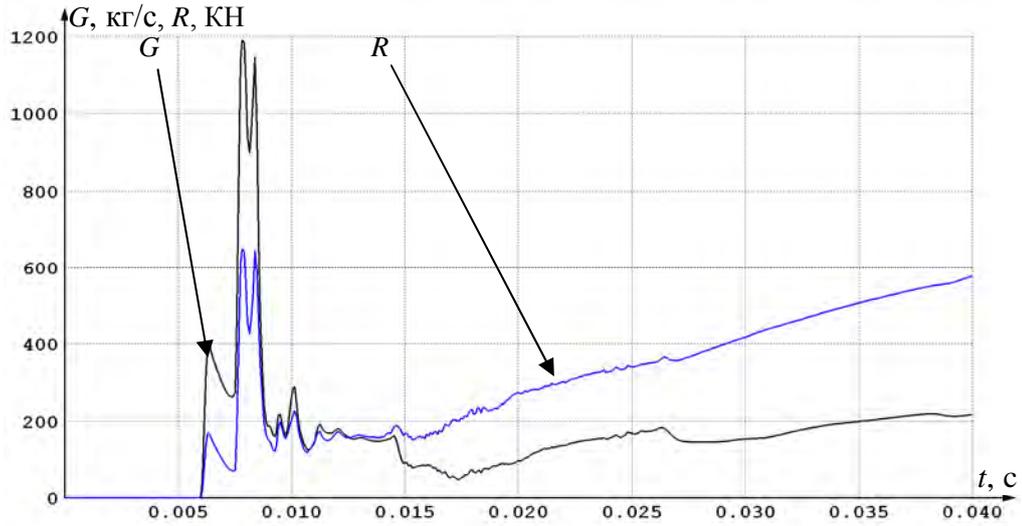


Рис. 2. Вариант 1. Зависимости расхода, условной тяги и давления в КС от времени

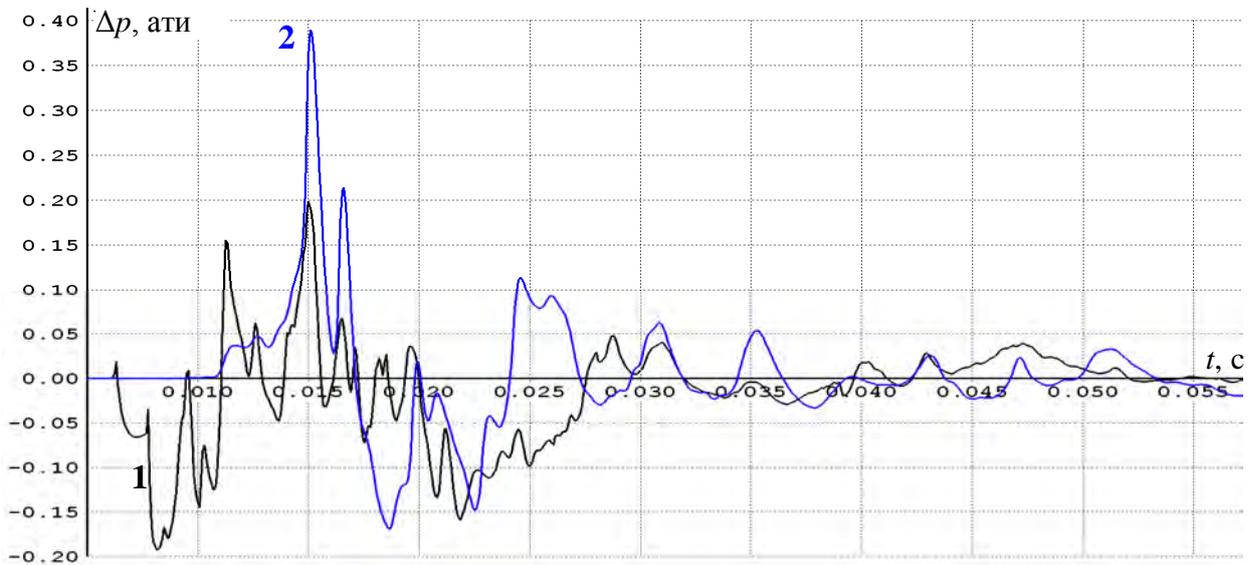


Рис. 3. Вариант 1. Показания численных датчиков давления 1 и 2

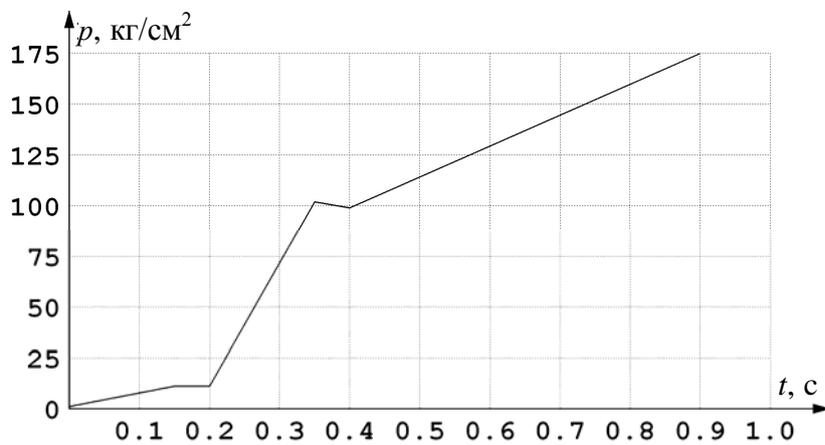


Рис. 4. Вариант 2. Закон изменения давления в КС

проводается излучением акустических волн. На рис. 3 видно, что начиная с  $t = 0,03$  с на днище и срезе сопла наблюдаются колебания, которые, по-видимому, связаны с механизмом Пауэлла. Согласно [1, 10] период таких колебаний определяется по формуле  $\tau_{\text{п}} = l/c_{\text{н}} + l/u_{\text{к}}$ , где  $l$  – расстояние от среза сопла (в данном случае – от точки отрыва) до источника излучения на границе струи;  $c_{\text{н}}$  – скорость звука во внешней среде (воздухе);  $u_{\text{к}} \approx 0,8u_{\text{экр}}$  – скорость распространения возмущений в струе,  $u_{\text{экр}}$  – скорость эквивалентной изобарической струи с такими же тягой и расходом, что и реальная. В качестве источника излучения обычно принимают границу первой и второй бочки, в которой происходят интенсивные колебания границы струи (сечение  $x = 4,2$  м на рис. 1, ж–з). Возмущения, дошедшие по воздуху до точки отрыва, вносят возмущения в сверхзвуковую струю (изменяют давление за точкой отрыва и положение самой точки) и далее распространяются по струе. Если принять расстояние от области излучения до точки отрыва 1,5–1,6 м, то пауэлловская частота окажется равной 200–225 Гц. По рис. 3 частоту колебания для  $0,03 \text{ с} < t < 0,045 \text{ с}$  можно оценить как 220–280 Гц.

По мере роста давления в камере размер диска Маха уменьшается и струя становится более устойчивой, поэтому к  $t = 0,055$ – $0,06$  с колебания давления прекращаются.

Далее рассмотрим запуск РД типа РД-191, приняв закон изменения давления в КС подобным реальному – рис. 4 (вариант 2). На рис. 5 приводятся поля избыточного статического давления для этого варианта, на рис. 6 – временные зависимости расхода газа через срез сопла и условной тяги РД, на рис. 7 – графики избыточного давления на днище РКН (см. численный датчик 2 на рис. 1, а).

На рис. 5, а показано поле статического давления для  $t = 0,010$  с (давление в КС 1,76 ата). Течение в сопле в районе критического сечения – слабое сверхзвуковое. ПВ выходят из сопла, их интенсивность не превышает  $0,1 \text{ кг/см}^2$ . Зона отрыва в сопле имеет малую протяженность, в остальной части сопла течение безотрывное. Как показано на рис. 6, расход газа (на первом этапе воздуха) через срез сопла начинается при  $t = 0,0075$  с и достигает максимума при  $t = 0,0175$  с.

На рис. 5, б цветом показано поле давления для  $t = 0,016$  с (давление в КС 2,2 ата). Протяженность зоны отрыва увеличилась, однако в районе среза течение пока безотрывное и истекает холодный воздух. Как видно на рис. 7, давление на днище РКН при достижении фронта ПВ ( $t = 0,015$  с) не превышает  $0,009 \text{ кг/см}^2$  (в варианте 1 –  $0,04 \text{ кг/см}^2$ ). Максимальная скорость в струе соответствует  $M = 1,2$ . Давление в области между оторвавшейся струей и стенкой сопла существенно неравномерное.

На рис. 5, в показано поле давления при  $t = 0,024$  с (давление в КС 2,68 ата). К этому времени давление на донном срезе ракеты достигает  $0,022 \text{ кг/см}^2$  – см. рис. 7. При  $t = 0,03$ – $0,05$  с имеет место фаза разрежения, затем ( $t = 0,05$ – $0,1$  с) колебания, связанные с прохождением пусковых волн, затухают. Далее до  $t = 0,2$  с в расчете регистрируются только высокочастотные колебания с малой амплитудой и частотой около 500 Гц.

Начиная с  $t = 0,2$  с скорость роста давления в КС существенно повышается. На рис. 5, г приведено поле давления для  $t = 0,202$  с (давление в КС 12,8 ата). Как видим, из сопла истекает кольцевая струя с относительно небольшой скоростью ( $M < 2,0$ ). При  $t = 0,214$  с точка пересечения последней характеристики Прандтля–Майера с диском Маха приближается к оси сопла (см. пояснение к рис. 1, д), что приводит к образованию криволинейного скачка, имеющего выпуклую форму, и неустойчивости течения. В качестве иллюстрации такой неустойчивости на рис. 5, д–е приведены поля статического давления для  $t = 0,231$  с и  $t = 0,233$  с (давления в КС 29,8 ата и 31,0 ата). Сравнив их, можно сделать вывод, что за промежуток времени 0,002 с происходит существенное изменение границ струи, границ внутренней дозвуковой зоны, положения криволинейного скачка и точки отрыва струи от сопла. В данном случае мы имеем более сложную, чем в механизме Пауэлла, колебательную систему, в которой реализуются совместные осевые и радиальные колебания. К  $t = 0,234$  с восстанавливается конфигурация с диском Маха, однако колебания продолжают.

Согласно рис. 7 частота колебаний при  $t = 0,24$ – $0,28$  с оценивается в 100–160 Гц, что согласуется и с измерениями при натурном пуске (120–140 Гц). Отметим, что данная частота существенно ниже пауэлловской. На рис. 5, ж–з показаны поля статического давления при  $t = 0,261$  с и  $t = 0,269$  с (давления в КС 47,9 ата и 49,2 ата). На рисунках видно, что основной источник излучения находится на границе струи в сечении  $x \approx 3,6$ . Расчетная (пауэлловская) частота колебаний в данном случае определяется совокупностью более сложных процессов. На колебания могут оказывать влияние нестационарное течение в узкой области отрыва между границей струи и стенкой сопла, неустойчивая область течения за диском Маха (его размеры в данном случае составляют более половины от радиуса струи) и ряд других факторов.

При  $t = 0,3$  с точка отрыва выходит на срез сопла, после чего колебания давления становятся нерегулярными и затухают.

Таким образом, для современных РКН, имеющих растянутую циклограмму выхода РД на режим, при запуске РД можно выделить две харак-

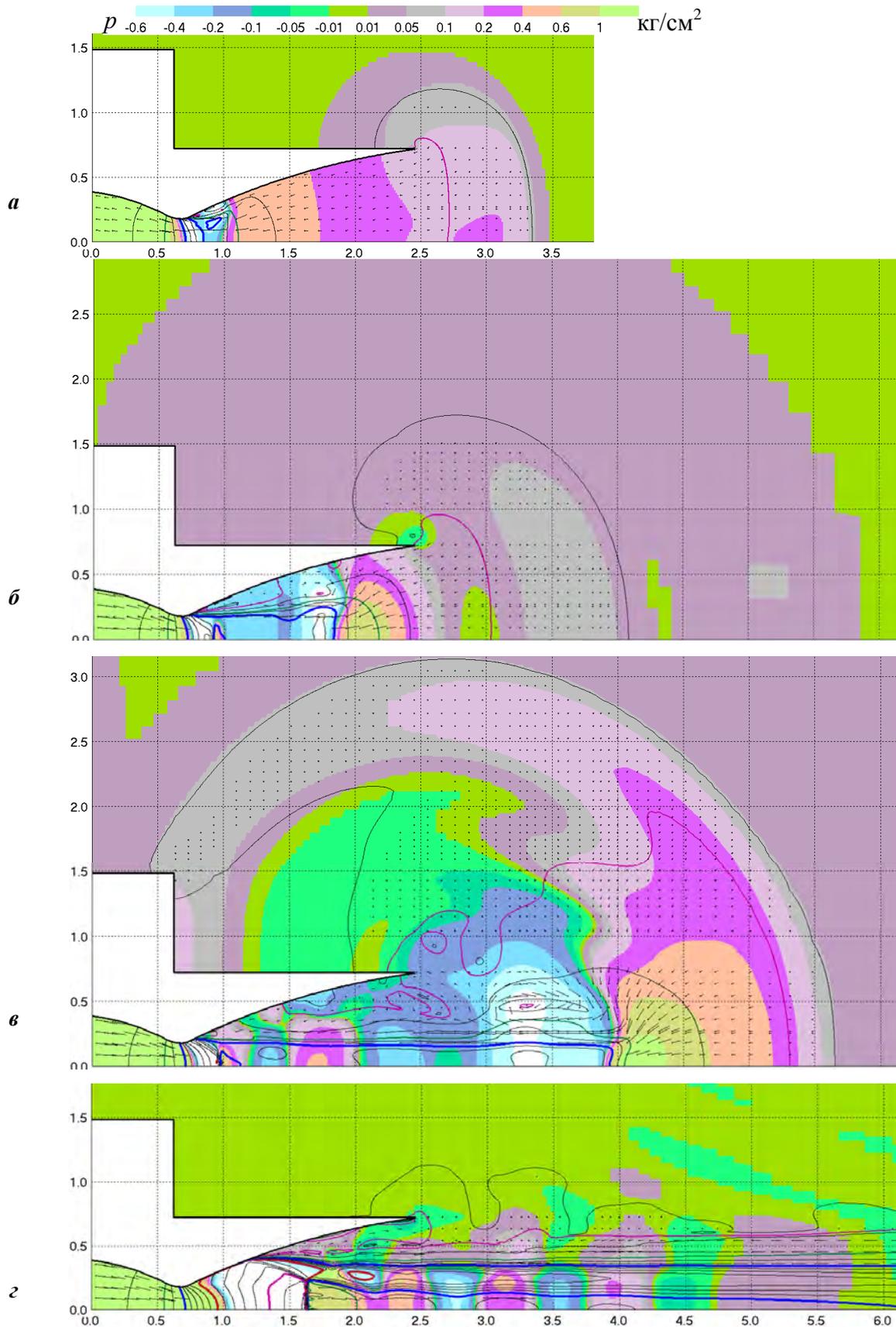


Рис. 5. *a-г* Вариант 2. Поля избыточного давления для  $t = 0,01$  с,  $t = 0,016$  с,  $t = 0,024$  с и  $t = 0,202$  с

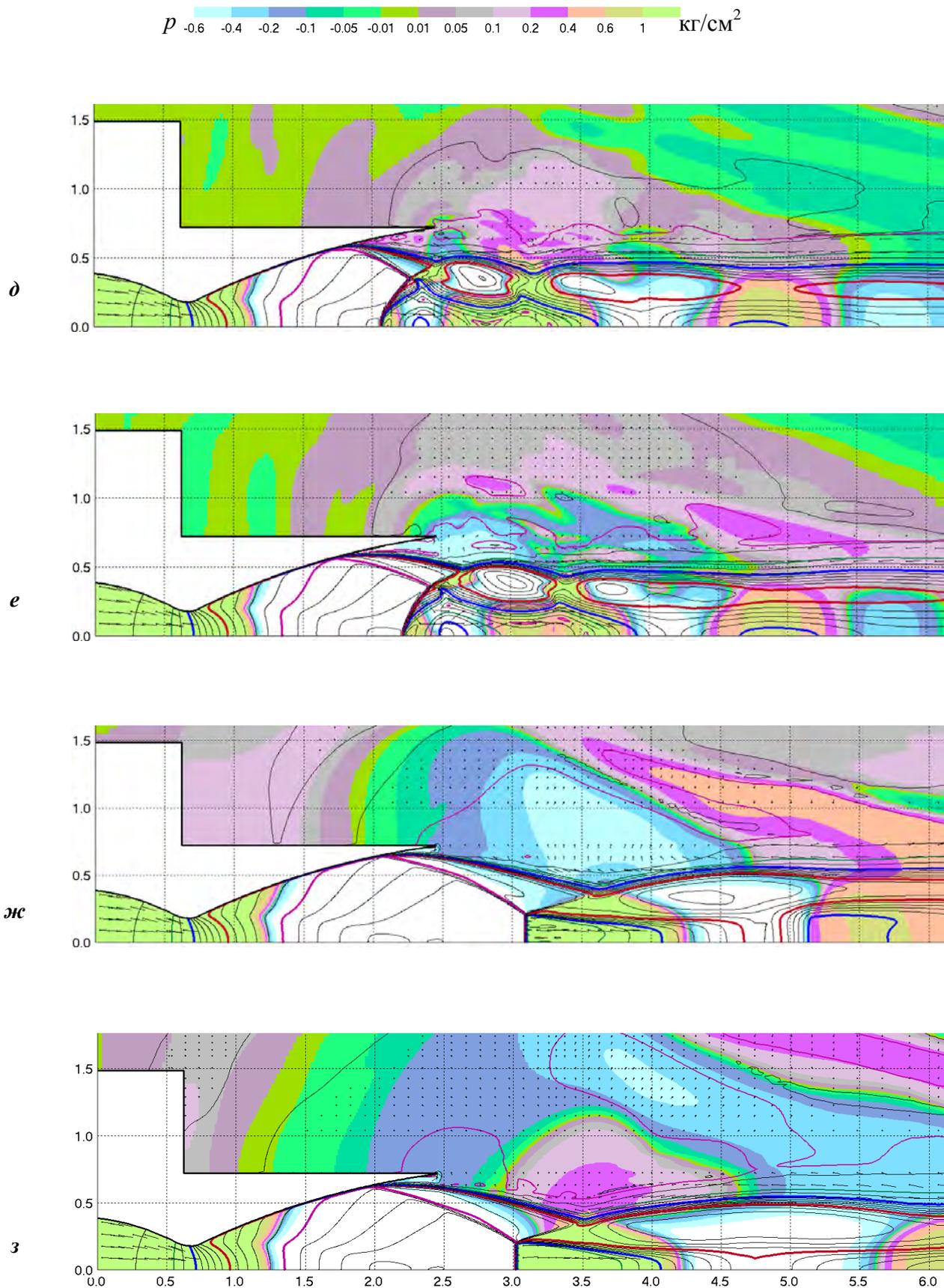


Рис. 5.  $\delta$ - $z$  Вариант 2. Поля избыточного давления для  $t = 0,231$  с,  $t = 0,233$  с,  $t = 0,261$  с и  $t = 0,269$  с

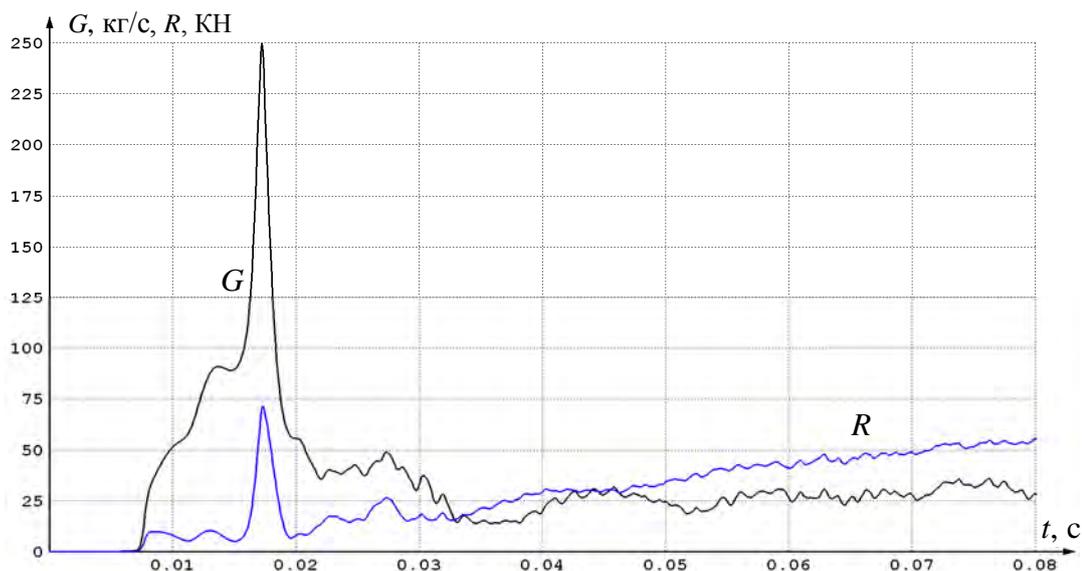


Рис. 6. Вариант 2. Временные зависимости расхода и условной тяги

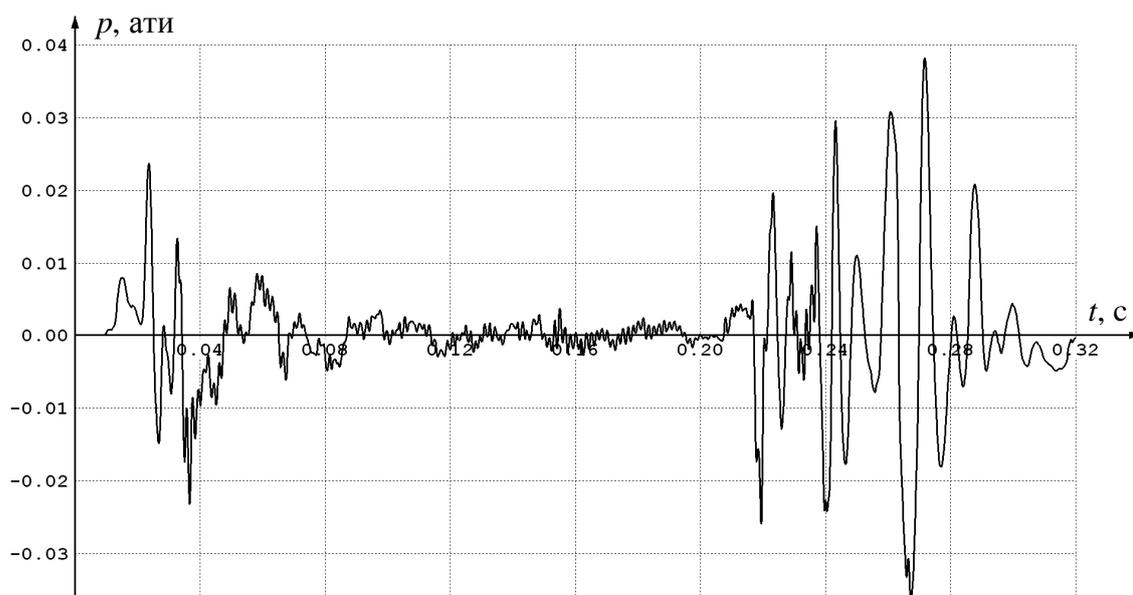


Рис. 7. Вариант 2. Давление на днище РКН (численный датчик 2)

терных фазы волнового воздействия на РКН и ПУ: фазу, связанную с распространением пусковых волн, и фазу пульсационного воздействия. Начало второй фазы определяется приближением точки пересечения последней (пограничной) характеристики течения Прандтля–Майера с диском Маха к оси струи. При этом реальные частоты колеба-

ний могут оказаться заметно ниже частоты пауэловских колебаний, определенных по длине первой бочки струи. Амплитуда колебаний давления на участке пульсационного воздействия оказывается выше амплитуды пусковых волн. При наличии экрана амплитуда колебаний давления может дополнительно увеличиться.

## Список литературы

1. Газодинамика стартовых комплексов / Г. П. Бирюков, А. Б. Бут, В. А. Хотулев, А. С. Фадеев. М. : Рестарт, 2012. 364 с.
2. Hunter C. A. Experimental, theoretical, and computational investigation of separated nozzle flows // AIAA Pap. 98-3107, 1998.

3. Глушко Г. С., Иванов И. Э., Крюков И. А. Численное моделирование отрывных течений в соплах // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. № 1. С. 172–179.
4. Нестационарные струйные течения при запуске РД / В. П. Зюзликов, Б. Е. Синильщиков, В. Б. Синильщиков, О. В. Андреев // Сб. трудов НТК «Четвертые Уткинские чтения». СПб. : БГТУ, 2009.
5. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М. : Физматлит, 2008. 368 с.
6. Федорова Н. Н., Федорченко И. А. Расчет взаимодействия падающего косоугольного скачка уплотнения с турбулентным пограничным слоем на пластине // Прикладная механика и техническая физика. 2004. Т. 45, № 3. С. 61–71.
7. Липатов И. И., Тугазаков Р. Я. Механизм образования пульсаций давления при падении ударной волны на пограничный слой // Ученые записки ЦАГИ. Т. XLIV. 2013. № 1. С. 62–75.
8. Синильщиков Б. Е., Синильщиков В. Б. Исследование термосилового нагружения газоотражателей стартовых комплексов ракет космического назначения при работе систем водоподачи // Исследования наукограда. 2017. Т. 1, № 2. С. 61–71.
9. Карпов А. В., Васильев Е. И. Численное моделирование истечения перерасширенного газа из короткого осесимметричного сопла // Вестник ВолГУ. 2005. Серия 1. Вып. 9. С. 81–87.
10. Антонов А. Н., Купцов В. М., Комаров В. В. Пульсации давления при струйных течениях. М. : Машиностроение, 1990. 271 с.

*История статьи*

*Поступила в редакцию 29 мая 2017 г.*

*Принята к публикации 27 июня 2017 г.*

## COMPUTATIONAL INVESTIGATION OF NONSTATIONARY PROCESSES AT LAUNCH OF THE ROCKET ENGINE

V. P. Zyuzlikov, B. E. Sinilshchikov, V. B. Sinilshchikov,  
M. V. Rakitskaya

Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov,  
Saint Petersburg, Russian Federation

*Nonstationary processes in the nozzle and the development of a nonstationary jet at launch of the rocket engine are considered, nonstationary gas-dynamic loads acting on the bottom part of the space rocket at launch are determined. Nonstationary Navier–Stokes equations completed with algebraic models of turbulence are solved numerically. Separated flows in the nozzle which, as is shown by the authors, essentially influence on the load values are taken into consideration. Two variants of build-up time are studied: for a short build-up time and for the build-up time that is typical of modern engines used in the space rockets. The computational results for the gas temperature field, static pressure, the Mach numbers, as well as graphs of pressure on the rocket bottom are presented. It is shown that for the both versions of the launch due to the transition from the air outflow from the nozzle to the combustion products outflow and due to separated flows in the nozzle, the mass flow through the nozzle section first reaches its maximum and then decreases sharply. This leads to formation of rarefaction waves that essentially influence the load values. In a certain time a phase of oscillatory action begins. It is shown that the beginning of the phase is determined by approach of the intersection point of the last (boundary) characteristic Prandtl–Mayer flow and the Mach disc to the jet axis. This is accompanied with reformation of wave structure, as the result of which the Mach disc rearrange itself in a curvilinear convex shock wave. Theoretical frequencies of oscillation, as well as the frequencies measured at launch, are considerably lower than the frequencies of Powell oscillation.*

*Keywords: rocket engine, nozzle, shock wave, separation, pressure, rarefaction.*

## References

1. Biryukov G. P., But A. B., Khotulev V. A., Fadeev A. S. *Gazodinamika startovykh kompleksov* [Gas dynamics of launching complexes]. Moscow, Restart, 2012, 364 p. (In Russian)
2. Hunter C. A. Experimental, theoretical, and computational investigation of separated nozzle flows // AIAA Pap. 98-3107, 1998.
3. Glushko G. S., Ivanov I. E., Kryukov I. A. *Chislennoe modelirovanie otrivnykh techeniy v soplakh* [Numerical modeling of detachment flows in nozzles]. Physicochemical kinetics in gas dynamics, 2010, no. 1, pp. 172–179. (In Russian)

4. Zyuzlikov V. P., Sinilshchikov B. E., Sinilshchikov V. B., Andreev O. V. *Nestatsionarnye struynnye techeniya pri zapuske RD* [Unsteady jet streams at the launch of a rocket engine] / Sb. trudov NTK «Chetvertye Utkinskie chteniya», Saint Petersburg, BSTU, 2009. (In Russian)
5. Volkov K. N., Emel'yanov V. N. *Modelirovanie krupnykh vikhrey v raschetakh turbulentnykh techeniy* [Modeling of large eddies in calculations of turbulent flows]. Moscow, Fizmatlit, 2008, 368 p. (In Russian)
6. Fedorova N. N., Fedorchenko I. A. *Raschet vzaimodeystviya padayushchego kosogo skachka uplotneniya s turbulentnym pogranchnym sloem na plastine* [Calculation of the interaction of an incident oblique shock wave with a turbulent boundary layer on a plate] / *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 2004, vol. 45, no. 3, pp. 61–71. (In Russian)
7. Lipatov I. I., Tugazakov R. Ya. *Mekhanizm obrazovaniya pul'satsiy davleniya pri padenii udarnoy volny na pogranchnyy sloy* [The mechanism of formation of pressure pulsations with the impact of a shock wave on the boundary layer] / *Uchenye zapiski TSAGI*. 2013, vol. XLIV, no. 1, pp. 62–75. (In Russian)
8. Sinilshchikov B. E., Sinilshchikov V. B. Investigation of force and thermal loading of jet deflectors of launch complexes of space rockets during the work of water supply systems. The Research of the Science City, 2017, vol. 1, no. 2, pp. 61–71. (In Russian)
9. Karpov A. V., Vasil'ev E. I. *Chislennoye modelirovanie istecheniya pererasshirennogo gaza iz korotkogo osesimmetrichnogo sopla* [Numerical simulation of overexpanded gas outflow from a short axisymmetric nozzle]. *Vestnik VolGU*. 2005, part. 1, issue. 9, pp. 81–87. (In Russian)
10. Antonov A. N., Kuptsov V. M., Komarov V. V. *Pul'satsii davleniya pri struynnykh techeniyakh* [Pulsation of pressure in jet streams]. Moscow, Mashinostroenie, 1990, 271 p. (In Russian)

*Article history*

*Received 29 May 2017*

*Accepted 27 June 2017*

# РЕСУРСЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**В. А. Пинчук<sup>1</sup>, А. В. Пинчук<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup>Научно-исследовательский центр «ПРОТЕЙ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

*В работе обращается внимание на существование новых, традиционно не учитываемых (в том числе и ранее неизвестных) ресурсов повышения эксплуатационных и технико-экономических показателей тепловых двигателей.*

*Отмечается, что эксплуатационная надёжность тепловых двигателей могла бы быть увеличена повышением эффективности процессов диагностирования качества рабочего процесса и состояния материальной части двигателя, обеспечиваемыми в том числе включением в состав диагностической информации, отображающей рабочий процесс двигателя электрофизической информации и регистрируемой в первую очередь измерениями в потоке продуктов сгорания за срезом сопла.*

*В рамках изыскания дополнительных ресурсов для повышения технико-экономических показателей тепловых двигателей обращается внимание на принципиальную возможность дополнительного энергообеспечения рабочего цикла двигателей энергией внутриядерного происхождения. Прогнозируемая результативность и практическая целесообразность использования отмечаемых возможностей обосновываются в том числе и результатами эксперимента.*

*Практическое использование отмеченных ресурсов требует, однако, дополнительных исследований и может быть обеспечено лишь на базе необходимого организационного, финансового, материального и технического обеспечения.*

*Ключевые слова: технико-экономические показатели, энергетическая эффективность, эксплуатационная надёжность, техническая диагностика двигателей.*

## Введение

Уже в настоящее время потребности в расширении народно-хозяйственных задач, решаемых на базе тепловых двигателей (ТД), не могут быть удовлетворены в должной мере из-за несоответствия потребностям их эксплуатационных и технико-экономических показателей (ТЭП). Важно, что факторы, сдерживающие в настоящее время совершенствование ТД, носят в большинстве своем принципиальный характер и не могут быть устранены традиционными способами. Последнее и предопределило собой, по существу, целевое назначение, форму и содержание настоящей работы.

Статья базируется на материалах работ авторов и представляет собой их продолжение и дальнейшее логическое развитие.

## 1. Эксплуатационная надёжность Тепловых двигателей

### 1.1. Специфика ситуации

В первую очередь обратим внимание на то, что эксплуатационная надёжность ТД определяется в том числе надёжностью формируемого диагноза о качестве рабочего процесса (РП) и состоянии агрегатов двигателя и обеспечивается, прежде всего, содержательностью используемой в этих целях диагностической информации.

Отметим, к сожалению, что сбор диагностической информации контактными измерительными методами уже изначально предопределяет необходимость нарушения целостности агрегатов и понижение, таким образом, их физической надёжности. Отмеченное же приводит к тому, что диагностирование камер до настоящего времени, например, осуществляют, по сути, в условиях «информационного голода».

Известны материалы, в общем указывающие, что работа двигателя сопровождается формированием электрофизических отображений (ЭФО) его рабочего процесса, регистрируемых в том числе и в потоке продуктов сгорания (ПС) за срезом сопла [1–5]. Слабая изученность механизмов формирования и, прежде всего, содержательности ЭФО до сих пор сдерживает их использование в целях диагностики. Более того, даже успешные попытки подтверждения содержательности ЭФО экспериментальными результатами [6, 7] так и не изменили сдержанное отношение к их использованию.

Таким образом, формируемый [6, 7] подход требует и в настоящий момент дополнительного разъяснения, а возможно, и уточнения.

## 1.2. Модель механизма формирования ЭФО на стадии истечения

Будем полагать, что содержательность ЭФО, регистрируемых в потоках ПС на стадии истечения из камер, могла бы быть обоснована их обусловленностью внутрикамерными нестационарностями.

Учтём, что продукты сгорания в камере представляют собой термодинамически открытую плазменную систему – смесь взаимодействующих друг с другом нейтральных (*a*), а также положительно (*i*) и отрицательно (*e*) заряженных частиц (трёхжидкостная плазменная модель [6]). Состав плазмы совокупно определим степенью ионизации

$$\alpha = \frac{p_i}{p_n^0} = \frac{n_i kT}{n_n^0 kT} = \frac{n_i}{n_n^0} \quad (1)$$

и относительным содержанием электронов в её составе

$$\eta = \alpha \cdot (1 + \psi), \quad \psi = (n_e - n_i) / n_i. \quad (2)$$

Систему уравнений в одномерном представлении и в пренебрежении электрическим взаимодействием потока ПС с соплом:

$$m_e n_e \left( \frac{\partial U_e}{\partial t} + U_e \frac{\partial U_e}{\partial x} \right) + \frac{en_e}{\mu_e} (U_e - U_a) + \frac{\partial p_e}{\partial x} - en_e E = 0 \quad (3)$$

$$m_i n_i \left( \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_i \frac{\partial U_i}{\partial x} \right) + \frac{en_i}{\mu_i} (U_i - U_a) + \frac{\partial p_i}{\partial x} + en_i E = 0 \quad (4)$$

$$U_\Sigma \left( \eta + \frac{m_i}{m_e} \alpha + \frac{m_a}{m_e} (1 - \alpha) \right) - U_e \eta - \frac{m_i}{m_e} U_i \alpha - \frac{m_a}{m_e} U_a (1 - \alpha) = 0 \quad (5)$$

$$\rho_\Sigma (1 + \eta) - (m_e \eta + m_i \alpha + m_a (1 - \alpha)) \frac{P_\Sigma}{kT} = 0 \quad (6)$$

$$\bar{f} \frac{\partial \rho_\Sigma}{\partial t} + \rho_\Sigma U_\Sigma \frac{\partial \bar{f}}{\partial x} + \rho_\Sigma \bar{f} \frac{\partial U_\Sigma}{\partial x} + U_\Sigma \bar{f} \frac{\partial \rho_\Sigma}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\alpha \eta}{(1 - \alpha)(1 + \eta)} - 6,666799_{10^{-2}} \frac{T^{5/2}}{P_\Sigma} \exp\left(-\frac{eV}{kT}\right) = 0 \quad (8)$$

$$\bar{f} \frac{\partial q}{\partial t} + j_k \frac{\partial \bar{f}}{\partial x} + \bar{f} \frac{\partial j_k}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} - \frac{e}{\epsilon_0} \frac{\alpha - \eta}{1 + \eta} \frac{P_\Sigma}{kT} = 0 \quad (10)$$

представим уравнениями движения электронной (3) и ионной (4) компонент, выражениями для среднемассовой скорости (5) и плотности (6) потока среды, уравнением неразрывности потока (7), аналогом уравнения Саха (8) в представлениях трёхжидкостной модели [6], законом сохранения заряда (9) и уравнением Пуассона (10) для электрической составляющей поля. Связь давления и температуры при изоэнтропическом истечении учтём как

$$T = T_0 (p/p_0)^{(n-1)/n}. \quad (11)$$

Зависимость для уширения сопла как функции относительного давления в потоке и показателя процесса *n* определим выражением

$$\bar{f} = \left( \frac{2}{n+1} \right)^{1/(n-1)} \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^{0.5} \left[ \left( \frac{p}{p_0} \right)^{2/n} - \left( \frac{p}{p_0} \right)^{(n+1)/n} \right]^{-0.5}. \quad (12)$$

Совокупным учётом зависимостей система (3)–(12) приводилась к десяти линейно-независимым уравнениям относительно одиннадцати неизвестных  $U_e, U_i, U_a, \rho_\Sigma, U_\Sigma, \alpha, \eta, E, p, f, T$ .

## 1.3. Численный эксперимент

Оценки параметров в невозмущенном внутрикамерными нестационарностями потоке («\*»), когда

$$p^*(x) = p_{кр} \left( \frac{p_a}{p_{кр}} \right)^{\frac{x}{L_a}}$$

принимались в качестве начальных условий для расчета:

$$t = 0 : U_e(x) = U_e^*(x); U_i(x) = U_i^*(x); U_a(x) = U_a^*(x);$$

$$\rho_\Sigma(x) = \rho_\Sigma^*(x); U_\Sigma(x) = U_\Sigma^*(x),$$

$$\alpha(x) = \alpha^*(x); \eta(x) = \eta^*(x); E(x) = E^*(x),$$

где  $x \in [0, L_a]$  – линейная координата.

Предположением, что пространственно-временное распределение давления ПС в сверхзвуковой части сопла с учетом возмущающего воздействия камеры отвечает уравнению

$$p(x, t) = \begin{cases} f_1(x, t), & \text{если } t - \int_0^x \frac{dx}{a^*(x) + U_{\Sigma}^*(x)} \geq 0 \\ p^*(x), & \text{если } t - \int_0^x \frac{dx}{a^*(x) + U_{\Sigma}^*(x)} < 0 \end{cases}, \quad (13)$$

а связь между температурой и давлением в потоке – зависимости

$$T(x, t) = T_0 \left( \frac{p(x, t)}{P_0} \right)^{\frac{n-1}{n}}, \quad (14)$$

обеспечивалось замыкание системы.

Здесь

$$f_1(x, t) = p^*(x) \left[ 1 + c \sin \left( 2\pi n_1 f_0 \left( t - \int_0^x \frac{dx}{a^*(x) + U_{\Sigma}^*(x)} \right) \right) \right];$$

$a^*(x)$  – местная скорость звука в сверхзвуковом потоке ПС с невозмущенными характеристиками, оценивалась зависимостью [8]

$$\frac{T_0 - T^*(x)}{T^*(x)} = \left( \frac{U_{\Sigma}^*(x)}{a^*(x)} \right)^2 \cdot \frac{n-1}{2}. \quad (15)$$

Задача сводилась к рассмотрению результатов интегрирования в области  $x \in [0, x_a]$ ,  $t \in [0, m\tau]$  ( $x_a = L_a$ ,  $\tau = 1/(n_1 f_0)$ ,  $m = 1, 2, \dots$ ). Начало функционирования источника возмущений отвечает времени  $t = 0$ .

Условия расчета определялись заданием давлений  $p_0, p_a$  в камере и на срезе сопла; температуры  $T_0$  продуктов сгорания в камере; показателя  $n$  процесса истечения; потенциала ионизации  $V$  условной среды; длины сопла  $L_a$ ; относительной частоты  $n_1$  и амплитуды пульсаций  $c$  ( $f_0 = 1000$  Гц).

Входные параметры при расчетах широко варьировались:

$p_0 \in (6; 0,25)$  МПа;  $p_a \in (1; 0,05)$  МПа;  $T_0 \in (1500; 3500)$  К;  $n \in (1,1; 1,4)$ ;  $L_a \in (0,5; 1,5)$  м;  $V \in (6; 16)$  В;  $n_1 \in (1; 16)$ ;  $c \in (0,01; 0,1)$ . Обеспечивалось, однако, соотношение  $p_0/p_a \leq 10$ .

На рис. 1 представлены характерные для исследований пространственно-временные распределения по длине сопла пульсационных составляющих (давления), на рис. 2 – обуславливаемые воздействиями внутрикамерных нестационарностей на поток изменения его определенных –  $E, j = f(x, t)$  – электрофизических характеристик по отношению к их фоновым («\*») значениям. Результаты рис. 2 отвечают составам ПС с потенциалами ионизации  $V = 8, 10, 14,5$  В – а, б, с – и условиям, когда  $p_0 = 0,4$  МПа;  $p_a = 0,1$  МПа;  $T_0 = 3000$  К;  $n = 1,3$ ;  $n_1 = 2$ ;  $c = 0,05$ . Графики отвечают времени:  $0,625 \cdot 10^{-4}$  с,  $0,125 \cdot 10^{-3}$  с,  $0,188 \cdot 10^{-3}$  с,  $0,250 \cdot 10^{-3}$  с,  $0,313 \cdot 10^{-3}$  с,  $0,375 \cdot 10^{-3}$  с,  $0,438 \cdot 10^{-3}$  с,  $0,5 \cdot 10^{-3}$  с ( $t/\tau = 0,125, 0,250, 0,375, 0,5, 0,625, 0,75, 0,875, 1$ ) – кривые 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 соответственно.

Зависимости, представленные на рис. 1, 2, отражают общий характер исследований. Устанавливается, что нестационарные воздействия на поток со стороны камеры ТД действи-

тельно отображаются изменениями электрофизических характеристик среды ПС в потоке, в том числе и за срезом сопла. При этом, если передача акустических возмущений из камеры к срезу сопла предполагает необходимое временное запаздывание, то электрофизический отклик на камерную нестационарность в потоке генерируется практически мгновенно. Наблюдается лишь некоторая «затяжка» его стабилизации.

Подтверждается, что конкретно формируемая в потоке электрофизическая информация совокупно определяется сложным комплексом факторов, отражающих в том числе как особенности режима ( $P_0, p_a, T_0$ ) и состав среды ПС ( $n, V$ ), так и спектральные характеристики и относительный уровень нестационарных воздействий ( $n_1, f_0, c$ ).

Зависимость отмеченных признаков от состояний и качества работы сложного комплекса агрегатов и систем ТД позволяет считать, что электрофизические характеристики потоков ПС отображают особенности как рабочего процесса, так и состояний отдельных агрегатов и ТД в целом. Последнее находится в согласии и с известными наблюдениями [1–5].

#### 1.4. Инструментальный эксперимент

Исследования проводились на базе лабораторного двигателя – камеры сгорания (рис. 3), работающей на газообразном кислороде и водном растворе этилового спирта и состоящей из форсуночной головки 1, средней 2 и сопловой 3 частей. Сопло камеры (материал – бронза) выполнялось толстостенным и дополнялось системой, обеспечивающей омывание наружной поверхности сопла водой.

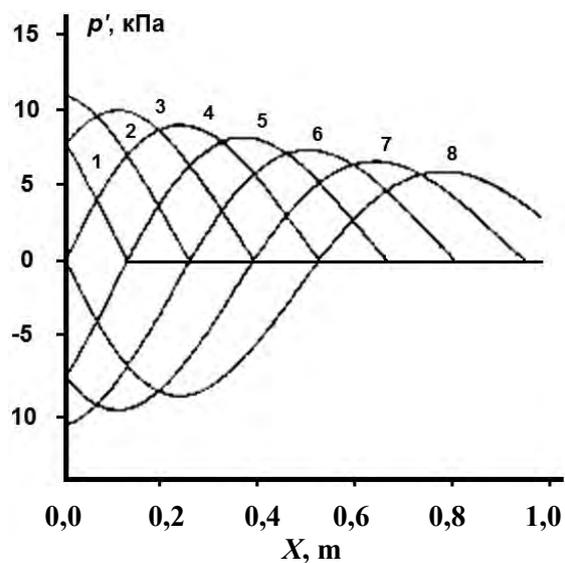


Рис. 1. Распределение  $p = f(x, t)$  по длине сопла – возмущающее воздействие

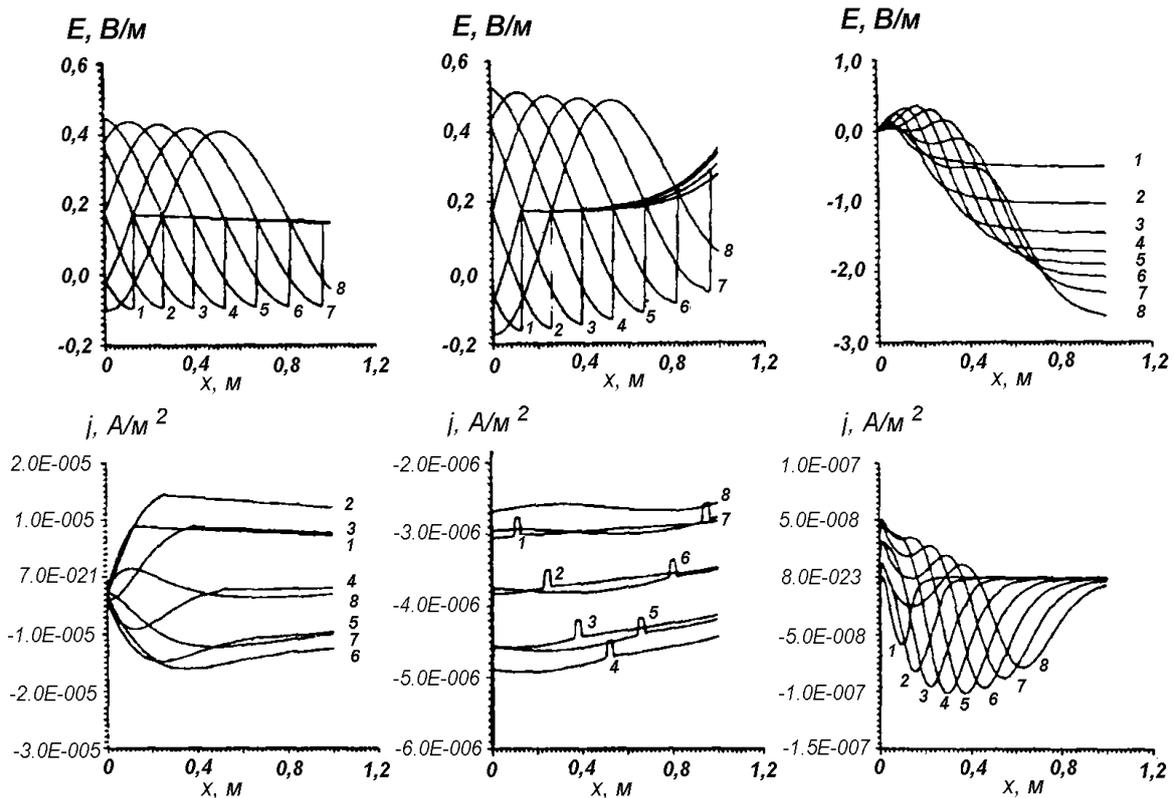


Рис. 2. Пространственно-временные распределения по длине сопла электрофизических отображений ( $E, j$ ) внутрикамерных возмущающих воздействий в средах различного состава

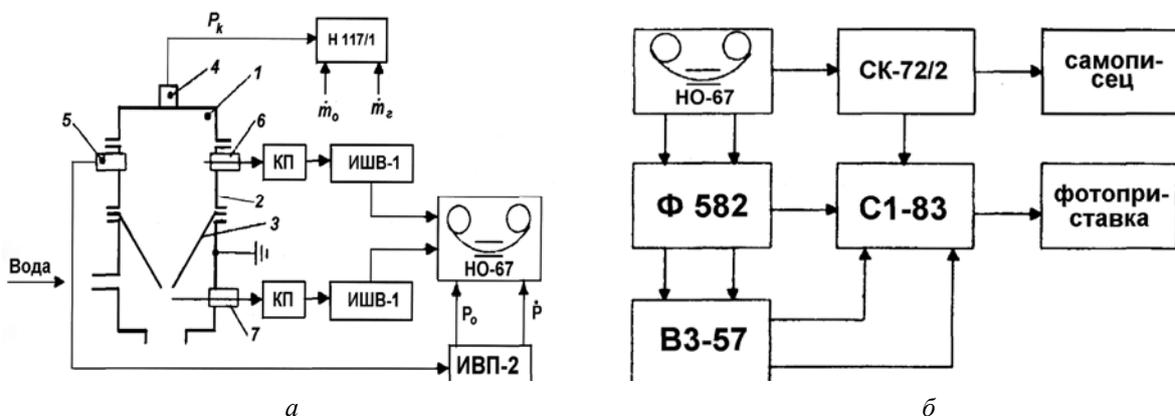


Рис. 3. Схемы регистрации (а) и анализа (б) информации

Для моделирования различных состояний, в том числе ориентированных на реализацию аварийных и предаварийных ситуаций, предусматривалась возможность уменьшения расхода воды до значений, не обеспечивающих работоспособность сопла в установившемся тепловом режиме.

При реализации ориентированных на аварию испытаний режимные параметры варьировались в следующих диапазонах: давление в камере  $P_0 = 3,5-4,2$  МПа, коэффициент избытка окислителя  $\alpha = 0,8-1,1$ , суммарный расход топливных компонентов в камеру  $m' = 0,35-0,45$  кг/с.

Время нормальной работы двигателя в этих условиях ограничивалось периодом установления

недопустимого, с точки зрения работоспособности, теплового режима сопла (15–20 с), сопровождающегося его разгаром.

Характерная длительность разгара – от момента возникновения эрозии до сквозного прогара стенки сопла – составляла 2–5 с. Отключение двигателя могло производиться как на предаварийной стадии развития эрозии сопла, так и в момент (после) наступления аварии (его прогара).

Камера оснащалась датчиками измерения давления – МД-40 4 и ДДИ-21 5 и электростатическими зондами 6 и 7. Зонды – датчики электростатического потенциала – выполнялись из вольфрамовой проволоки диаметром 3 мм и вводились

в объем камеры 6 и поток ПС за срезом сопла 7 на глубину 10 мм. Охлаждаемый датчик давления ДДИ-21 5 и зонд 6 устанавливались в камере на расстоянии 50 мм от огневого днища головки под взаимным углом  $135^\circ$ . Отбор давления на датчик осуществлялся через акустический канал с размерами 2,5 и 3,0 мм (диаметр и длина соответственно). Методика предполагала получение в процессе работы двигателя безынерционной информации о режимных и электрофизических характеристиках процесса, их регистрацию и совместное рассмотрение с целью анализа.

На рис. 3 отражены конкретные составы используемых систем регистрации (а) и анализа информации (б). При регистрации запись информации о статической составляющей давления и расхода топливных компонентов производилась шлейфным осциллографом Н-117/1. Сигналы датчика ДДИ-21 и зондов регистрировали измерительным магнитофоном НО-67 в режиме частотной модуляции. При этом сигнал датчика с помощью измерительного преобразователя ИВП-2 предварительно усиливался и разделялся на основную (0–0,2 кГц) и пульсационную (0–10 кГц) составляющие. Предварительное усиление по мощности сигнала с зондов обеспечивалось выносным катодным повторителем (КП), а по амплитуде – усилителем ИШВ-1, питаемым от аккумулятора.

Система обработки и анализа информации (рис. 3, б) позволяла с помощью измерительного магнитофона НО-67 и анализатора спектров СК-72/2 многократно воспроизводить результаты записей сигналов и исследовать их амплитудно-частотный состав.

Одновременная обработка двух сигналов (с помощью узкополосного избирательного усилителя Ф-582, микровольтметра ВЗ-57, использовавшегося в качестве детектора среднеквадратичных значений, электронного двухлучевого осцилло-

графа С1-83 и фотоприставки) позволяла совместно оценивать их уровни и характер временных изменений. При выявлении характера изменений общего уровня сигналов во времени последние с выхода магнитофона НО-67 подавались непосредственно на входы милливольтметра ВЗ-57.

### 1.5. Результаты и их обсуждение

Характерные значения среднеквадратичной сигнала зонда (на входе катодного повторителя КП) и пульсационной составляющей давления в камере на стационарном режиме теплового лабораторного двигателя представлены на рис. 4.

Наблюдалось, что при прочих равных условиях уровни сигналов зондов характерно откликаются на изменения давления  $p_0$ , состава  $\alpha$  и температуры ПС в камере. При этом сигналы зонда, установленного в камере, отвечали промежутку 25–35 мВ, тогда как сигналы зонда, вводимого в поток ПС за срезом сопла, достигали 1В.

Представляют интерес результаты узкополосного анализа сигналов по каналам пульсационных составляющих давления и потенциала зондов ( $p'_k, \phi'_z$ ). Их рассмотрение показывает, что наиболее интересными с точки зрения задач диагностики состояний ТД являются зоны высоких частот, где сигналы зондов при нормальной работе двигателя практически не фиксируются (зоны «молчания»), но появляются и достигают существенных по величине уровней при переходе режима в стадию разгара сопла (переход ТД в предаварийное состояние).

Момент нарастания сигнала, по меньшей мере в части спектральных зон, предвещает на практически значимый временной промежуток аналогичное увеличение пульсационной составляющей давления в камере. Переход ТД в предаварийное состояние надежно отображается и характерными изменениями сигналов зонда за срезом сопла.

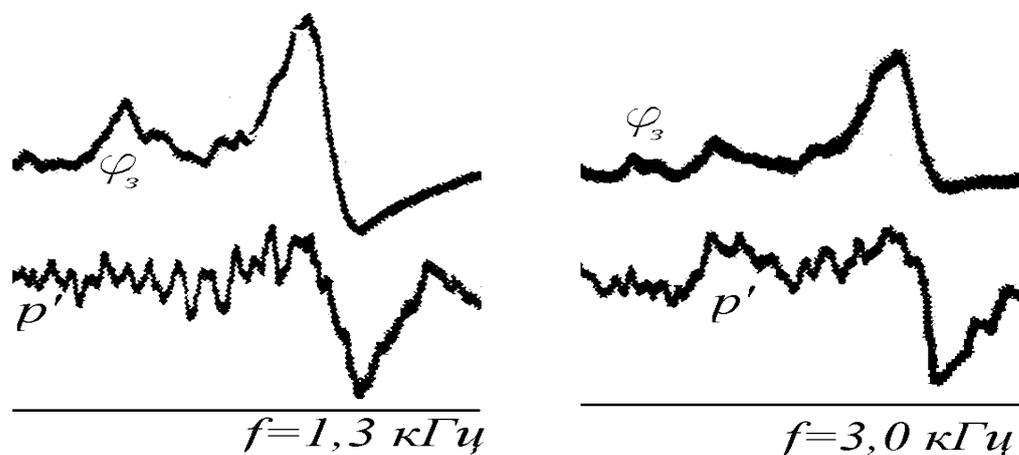


Рис. 4. Зависимости пульсационной составляющей давления и зондового сигнала в полосах 1,3 и 3,0 кГц (время испытания ~20 сек.)

Более того, испытаниями **полномасштабного ТД** выявлено, что зондом за срезом сопла надёжно отображаются все практически значимые изменения стационарных характеристик двигателя, в том числе и не регистрируемые общепринятыми средствами измерений.

Особенно важно, что даже не фиксируемая штатной системой диагностики кинетика перехода натурального двигателя в предаварийное состояние отображается сигналом с зонда за срезом сопла.

Таким образом, совокупные результаты убедительно свидетельствуют в пользу целесообразности включения ЭФО (прежде всего регистрируемой в потоках ПС за срезом сопла) в состав диагностической информации.

## 2. Техничко-экономические показатели тепловых двигателей

### 2.1. Состояние проблемы

Согласно общепринятым представлениям, максимальные уровни удельных энергетических показателей «химических» ТД, например, принципиальным образом ограничиваются сверху энергосодержанием топлива. Сопоставление же предельно достижимых показателей ТД с уровнями удельных показателей, обеспечиваемых известными к настоящему времени разработками двигателей, показывает, что возможности улучшения энергетических характеристик ТД за счёт освоения новых топлив, по существу, исчерпаны.

Проблема повышения удельных энергетических показателей ТД тем не менее могла бы быть решена изысканием возможностей дополнительного энергообеспечения рабочего цикла двигателей.

Именно на эти возможности и ориентирован *способ повышения удельных энергетических характеристик ТД за счёт дополнительного энергообеспечения рабочего цикла двигателя, при прочих равных условиях, энергией внутриядерного происхождения [9]*.

Способ учитывает особенности условий внутреннего энергетического равновесия (УВЭР – между различными по физической природе энергетическими состояниями) в составе материальных образований с избыточным (некомпенсированным) электрическим зарядом (аквазинейтральных или АК-образований), впервые установленных авторами в рамках инициативных исследований по обоснованию природы аномалий и, прежде всего, шаровой молнии [10–12].

Сведения о предложенном способе до сих пор, однако, недостаточно распространены, вследствие чего он остаётся, по существу, не востребованным и требует дополнительного разъяснения.

### 2.2. Формирование подхода

УВЭР, положенные в основу предложенного способа, в числе прочих выражений могут быть представлены зависимостью

$$\prod_j p_j^{c_j} = \prod_j K(T)_j^{c_j} \exp\left(-\frac{\varepsilon_{act} - e\psi\Omega}{kT}\right), \quad (16)$$

от общеизвестных аналогичных по смыслу зависимостей отличающейся лишь наличием в показателе экспоненты дополнительного члена  $e\psi\Omega$ . При этом, так как работа, выполняемая средой по введению в её состав заряда, есть  $-L = q\Omega$ , то  $\text{sign}(\Omega) = -\text{sign}(q) = \text{sign}(\psi)$  и  $\text{sign}(\psi\Omega) > 0$ .

Конкретный характер (16) указывает, что применительно к образованиям с некомпенсированным зарядом температура  $T$  как параметр непосредственно определяет равновесные заселённости лишь «механической» природы энергетических состояний (поступательных, колебательных, вращательных).

Если в рамках традиционного описания и с учётом УВЭР ввести в рассмотрение температуры  $T_{exc}^*$  – возбуждения заселённостей химических связей и электронных энергетических состояний уровня  $\varepsilon_j$  в составе среды с некомпенсированным зарядом, то отвечающее равновесию её соотношение с  $T$  – температурой возбуждения «механических» энергетических состояний (поступательной) определится выражением

$$T_{exc}^* = T \frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_j - e\psi\Omega}, \quad (17)$$

а равновесная функция распределения заселённостей химических связей и электронных энергетических состояний – зависимостью

$$N_{\varepsilon_j}^* \approx \exp\left(-\frac{\varepsilon_j - e\psi\Omega}{kT}\right). \quad (18)$$

Отметим, что выражения (17), (18) указывают на допустимость соотношений  $T_{exc}^* \gg T$  при  $e\psi\Omega \leq \varepsilon_j$  или даже, напротив,  $T_{exc}^* < T$ , при  $\psi\Omega i \geq \varepsilon_j$ .

УВЭР в выявленной форме указывают, таким образом, *на существование традиционно не учитываемого (ранее неизвестного) канала управления состояниями сред, роль фактора управления в котором играет электрический заряд, – «зарядового»*.

Согласно УВЭР непосредственно с момента формирования АК-образований функция распределения заселённостей химических связей и электронных энергетических состояний в их составе необходимо преобразуется (испытывает деформацию) к виду (18).

При этом функция  $T_{exc}^* = f(e\psi\Omega)$  на стадии релаксации к УВЭР (при формировании АК-образований) или, напротив, к традиционно учитываемым условиям равновесия (при деградации

образований) может претерпевать разрыв типа  $(+\infty, -\infty)$  или  $(-\infty, +\infty)$ , отвечающий наиболее благоприятным условиям для развития неустойчивостей атомно-молекулярной структуры в составе АК-среды.

Обоснованно ожидать, что в среде АК-образований в этих условиях могут наблюдаться нарушения химических связей, потеря устойчивости электронов на орбитах, падения электронов с орбит, их поглощения ядрами и образование нейтронов – аналог явлений  $K$ - или  $e$ -захвата, совокупно приводящие как к изменению состава среды, так и вбросу энергии внутриядерного происхождения в её состав.

Применительно к ТД представляется возможным таким образом обеспечить дополнительное энергообеспечение рабочего процесса и повышение его удельных энергетических показателей. Высказанное предположение требует, однако, экспериментального подтверждения.

### 2.3. УВЭР как объект экспериментальных исследований

Оценим, в первую очередь, возможность формирования АК-образований. Обратим внимание, что в соответствии с зависимостью

$$q_{sur} = \int_0^t dq = e \cdot f_a \int_0^t [\Phi_i^{a \rightarrow env} + \Phi_e^{env \rightarrow a}] dt - e \cdot f_c \int_0^t [\Phi_e^{c \rightarrow env} + \Phi_i^{env \rightarrow c}] dt \neq 0 \quad (19)$$

избыточный заряд в среде реактора может быть сформирован, например, импульсным разрядом конденсатора за счёт различий между количеством *внесённого* в реактор электричества за время  $t$  по участку цепи «положительно заряженная обкладка конденсатора – электрод «анод» в реакторе» и *вынесённого* из реактора за это же время по участку цепи «электрод «катод» в реакторе – отрицательно заряженная обкладка конденсатора.

В (19)  $\Phi_j = f(t)$ , ( $j = e, i$ ) – удельный поток носителей зарядов (электронов и ионов) на участках цепи по границам раздела среда  $\leftrightarrow env$ ,  $c \leftrightarrow env$  (анод  $\leftrightarrow$  среда, катод  $\leftrightarrow$  среда соответственно),  $f$  – эффективная площадь,  $a, env, c$  – анод, среда, катод.

### 2.4. Облик установки, методика исследований

Отмеченное и определило, по существу, облик экспериментальной установки, блок-схема которой представлена на рис. 5.

В её составе: реактор 1 – сосуд из кварцевого стекла с устройствами ввода/вывода в/из его объема (а) рабочей среды, оснащаемый основными («А» и «С») электродами, выделяющими рабочую зону реактора и используемыми для формирова-

ния управляющих воздействий на среду, и вспомогательными («SE» – необязательно) – для регистрации и вывода сигналов, отображающих электрофизическую ситуацию в реакционной зоне; система 2 хранения и подготовки рабочей среды необходимого состава; система 3 ввода/вывода и подготовки среды, обеспечивающая в том числе контроль и непрерывное регулирование барометрических характеристик среды в объёме реактора; система 4 энергообеспечения процесса управляющих воздействий и запуск установки; система 5 регистрации и измерений радиационных и параметров электромагнитного и нейтронного излучения.

Отдельные варианты конструктивных решений реактора представлены на рис. 6.

При создании установки предполагалось, что необходимая для формирования в рабочей зоне реактора избыточного заряда асимметрия может быть совокупно обеспечена мерами, реализуемыми как на стадии изготовления установки (конструктивное решение реактора, геометрия и материал электродов, соотношение эффективных площадей анода и катода и т.д.), так и на стадии её эксплуатации (регулирование параметров источника с учётом состава и давления рабочей среды в реакторе при допустимых напряжённостях источника энергообеспечения и т.п.).

Источником зарядовых воздействий являлся конденсатор емкостью 2,0–2,5 мкФ, который через токоограничивающее сопротивление мог разряжаться через среду в реакторе. Разность потенциалов на обкладках конденсатора варьировалась в диапазоне 0,8–2,5 кВ.

Отдельные агрегаты и приборы, введённые в состав установки для реализации отмечаемых мер, а также регистрации электрофизических отображений процессов релаксации к УВЭР, изменившимся в связи с возникновением избыточного заряда в составе среды, представлены на рис. 7.

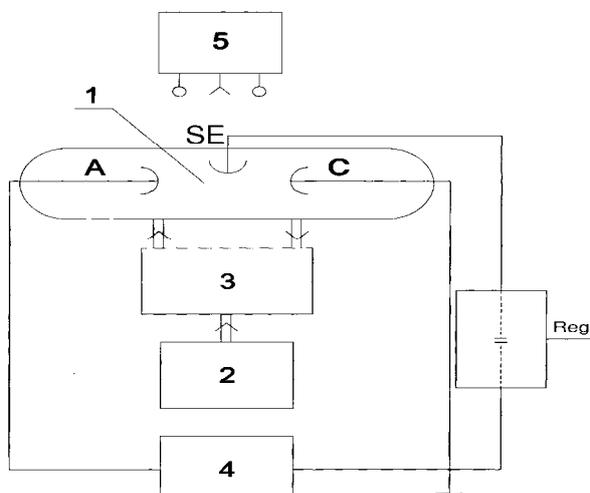


Рис. 5. Блок-схема установки

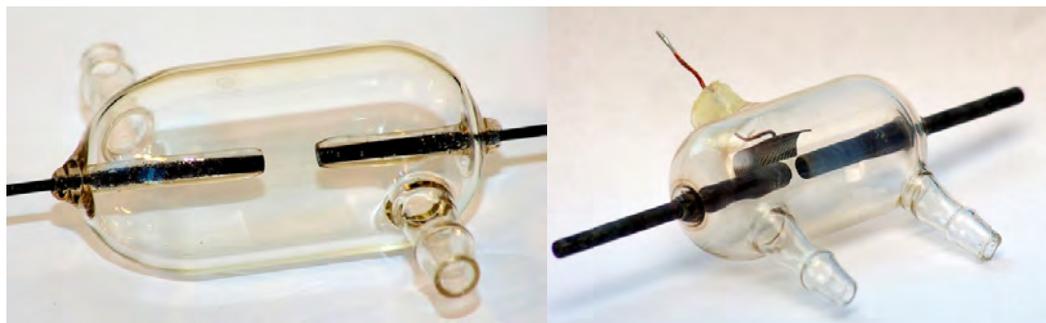
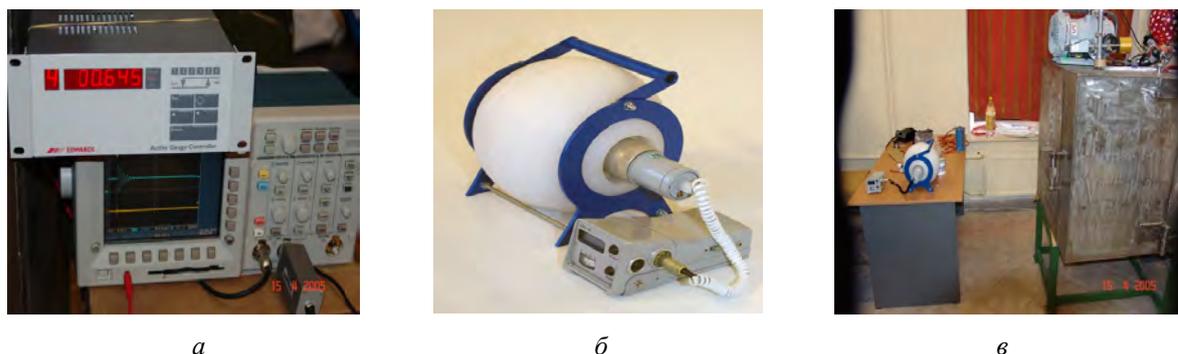


Рис. 6. Отдельные варианты конструктивных решений реактора

122



*a*

*б*

*в*

Рис. 7. Отдельные приборы и агрегаты установки

На рис. 7, *a* представлена фотография детекторного блока системы регистрации давления в реакторе и осциллографа «TETRONIX», используемого для регистрации и измерений характеристик разряда и электрофизических отображений его воздействий на среду. Дозиметром – радиометром ДКС-96 с блоком детектирования ДКС-96Н (рис. 7, *б*) в режиме счёта событий в процессе импульсного воздействия на среду в реакторе предусматривалась регистрация нейтронного излучения.

На рис. 7, *в* представлена капсула, выполненная из листовой нержавеющей стали, полыми стенками которой выделялся замкнутый объём пространства – отсек – для размещения реактора при испытаниях.

Каждая из шести стенок капсулы, выделяющих рабочее пространство реакторного отсека, представляла полую конструкцию. Отстояние листов стенок один от другого – около 250 мм. Полости стенок по желанию экспериментатора могли заполняться той или иной средой либо же оставаться незаполненными.

## 2.5. Общие результаты

На рис. 8 представлены типичные осциллограммы напряжения и тока на разрядном промежутке между А- и С-электродами, отвечающие условиям воздействия на среду таким образом. Ток – нижняя кривая, 227 А/div, напряжение на разрядном узле – верхняя кривая, 500 В/div.

Осциллограммы характерны для условий формирования зарядовых воздействий на среду выбранным способом. Состав сред варьировался. Использовались водород, азот, воздух, гелий, смеси азот-водород (при мольном соотношении ~1/1).

В качестве материала А- и С-электродов использовались Мо, W и/или сплав ковар (Fe, Ni, Co). Выбор материала в данном случае определялся, по существу, лишь технологическими ограничениями, связанными с остекловыванием боковых поверхностей электродов.

Источником энергообеспечения импульсных воздействий на среду в условиях эксперимента являлся конденсатор 2,2 мкФ, который при обеспечении пробойного напряжения между обкладками мог разряжаться через среду в реакторе. В разрядной цепи устанавливалось токоограничивающее сопротивление 2,5 Ом. Давление в разрядной зоне реактора поддерживалось в диапазоне 0,5–2,0 торр и определялось условиями пробоя разрядного промежутка в реакторе при ограничении разности потенциалов на обкладках питающего конденсатора диапазоном 0,8–1,5 кВ. Дозиметром – радиометром ДКС-96 с блоком детектирования ДКС-96Н измерялся поток нейтронов. Прибор переводился в режим счёта событий. Мерой мощности потока служило число событий за импульс разряда емкостного накопителя.

Применительно к условиям получения осциллограмм рис. 8 наложение поля конденсатора на электроды и запуск осциллографа для регистра-

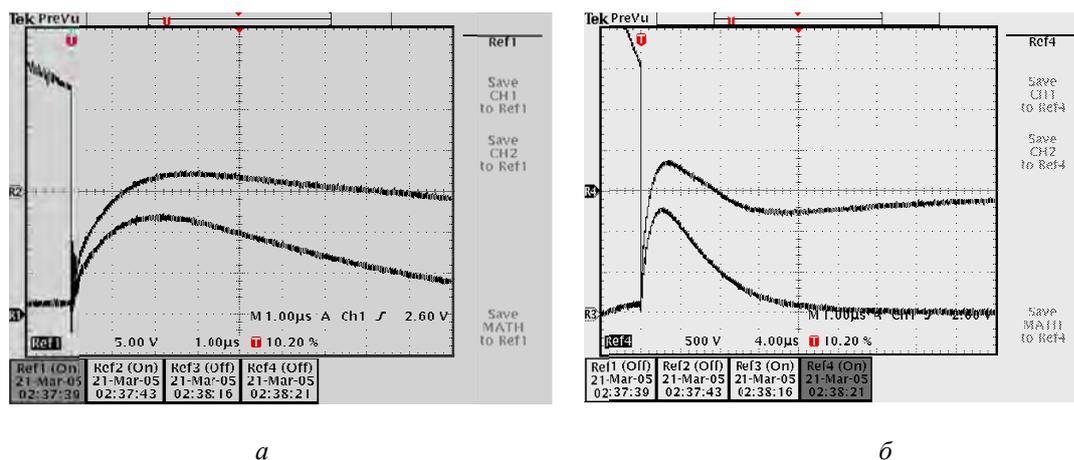


Рис. 8. Разряд при давлениях: *a* – (H<sub>2</sub>, He) при 0,5–1,5 торр; *б* – (N<sub>2</sub>, воздух, N<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>) при 1,0–2,0 торр. Развёртка: 1 мкс/div (*a*); 4 мкс/div (*б*)

ции характеристик разряда осуществлялись одновременно с помощью электронного ключа, вводимого в цепь питания разрядной зоны реактора. При этом начальный уровень напряжений на обкладках конденсатора (к моменту наложения поля на разрядный промежуток реактора) вне зависимости от состава среды (в рамках указанной номенклатуры) оставался одинаковым (не варьировался).

Для всех из указанной выше номенклатуры сред в характерных для рис. 8 условиях вблизи реактора (на расстоянии 0,5 м) за один импульс фиксировалось 100–200 событий (нейтронное излучение можно было фиксировать на расстоянии до 10 м от разрядного узла). Какой-либо принципиальной зависимости результатов от состава среды (в рамках используемой номенклатуры) не выявлено.

Для верификации природы излучения и исключения возможностей искажения результатов были проведены следующие эксперименты. Рядом с блоком детектирования устанавливался аналогичный блок с удалённой сцинтилляционной мишенью. Этот блок не регистрировал событий во время разрядов. Кроме того, использовался поглотитель нейтронов – насыщенный раствор борной кислоты, заливаемый в полости стенок реакторного отсека с глубиной ~250 мм. Наличие поглотителя между реактором и детектором приводило к резкому ослаблению регистрируемого потока (на порядок). При проведении же контрольных экспериментов с незаполненными полостями стенок или даже наполненными водопроводной водой ослабления потока практически не наблюдалось.

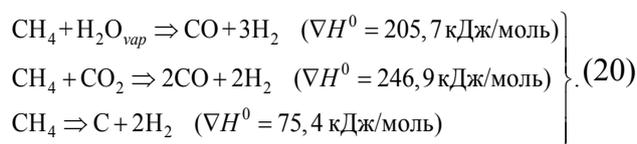
Отметим, что регистрация нейтронного излучения надёжно свидетельствует как в пользу реальных возможностей возбуждения зарядовыми воздействиями в составе материальных сред энергопродуцирующих реакций внутриядерного происхождения, так и одновременно в пользу достоверности УВЭР в целом.

Представленные на рис. 8 результаты являются характерными для всей серии исследований и в рамках используемой номенклатуры сред не обнаруживают каких-либо зависимостей от их состава.

## 2.6. Об обоснованности способа согласно [9]

Подтверждением УВЭР принципиально обосновывается и существование принципиально доступного для освоения, неизвестного ранее источника энергии внутриядерного происхождения, указывающего на возможность улучшения ТЭП двигателей за счёт его возбуждения, в том числе в составе хотя бы одного из компонентов топлива, на предваряющей его ввод в камеру стадии. Способы, на возможность использования которого для повышения характеристик ТД указывают, в частности, и результаты лабораторного эксперимента [9].

При оценке возможностей дополнительного энергообеспечения двигателей обращалось особое внимание на работы [10–12] и прогнозируемую с их учётом возможность возбуждения в составе топлива на предваряющей его ввод в камеру стадии, процессов переработки его состава, обеспечиваемой, например, реакциями типа



Возможно возникающие сомнения в принципиальной реализуемости способа в характерных для ТД условиях ограничим лишь обращением к результатам лабораторного эксперимента (рис. 9), где представлены масс-спектрограммы исходной (*a*) и модифицированной в (*б*) при атмосферном давлении смеси CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub> (≈0,5 + 0,5, vol) [9].

Смесь CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub> модифицирована в потоке, без предварительного подогрева и без использова-

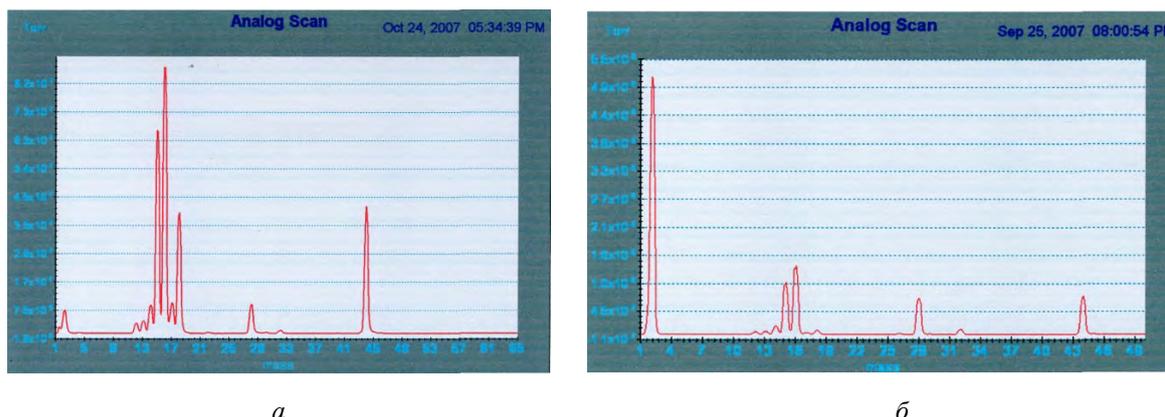


Рис. 9. Масс-спектрограмма исходного (а) и модифицированного (б) составов смеси  $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$

ния катализатора и, что особенно важно, с меньшими по отношению к оцениваемым, исходя из характеристик эндотермичности процесса, удельными энергетическими затратами на его возбуждение.

### Заключение

Совокупными результатами исследований сформулирован и обосновывается комплекс концептуальных представлений о традиционно не

учитываемых (обеспечиваемых в том числе и новыми, ранее неизвестными способами) ресурсах совершенствования (повышения) технико-экономических показателей тепловых двигателей. Дальнейшее развитие результатов работы требует, однако, дополнительных исследований разнопланового характера и может быть обеспечено лишь на базе необходимого организационного, финансового, материального и научно-технического обеспечения.

### Список литературы

1. Shaeffer J. F., Peng T. C. High-Potential clouds in jet-engine exhausts. AIAAPaper, 1976, no. 76-397, pp. 1-8.
2. Шкалик В. А. Исследование выхлопных устройств генераторного газа // Тепловые процессы и свойства рабочих тел двигателей летательных аппаратов. Казань : КАИ, 1980. С. 41–47.
3. Потапов Г.П. Электризация реактивных сопел // Известия вузов, Авиационная техника. 1978. № 4. С. 112–117.
4. Шкалик В. А., Лебедев А. А., Кульжанов Ж. К. Тепловые процессы и свойства рабочих тел двигателей летательных аппаратов / под ред. В. Е. Алемасова. Казань : КАИ, 1982. С. 79–83.
5. Ватажин А. Б. [и др.] Электродинамика. М. : Физматлит, 1983. 344 с.
6. Пинчук В.А. Низкотемпературная плазма в условиях внешних акустических воздействий // ИФЖ. 1994. Т. 67, № 1–2. С. 112–118.
7. Пинчук В. А., Пинчук А. В. Физика реальных процессов с аномальными проявлениями: введение в проблему. СПб. : БГТУ, 2016. 165 с.
8. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М. : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1976. 888 с.
9. Пинчук А. В., Пинчук В. А. Эксплуатационные характеристики тепловых энергопреобразователей: ресурсы обеспечения // Доклады пленарного заседания Всерос. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики», Казань, 12–13 октября 2009. Казань : Казан. гос. техн. ун-т, 2009. С. 65–85.
10. Pinchuk A. V., Pinchuk V. A. The Formations with Surplus Charge: Nature and influence upon Burning process Stability// 6<sup>th</sup> Int. Seminar on Flame Structure. Book of Abstracts (Ed. A. Konnov). Brussels: Belgium, 2008. p. 60.
11. Pinchuk A. V., Pinchuk V. A. Ball Lightning: Physics Base & Conceptual Views Complex. Eurasian Chemico-Technological Journal, 2009, vol. 11, no. 3, pp. 169–186.
12. Pinchuk A. V., Pinchuk V. A. Physics Base & Conceptual Views Complex of Ball Lightning. Journal of Modern Physics (JMP), 2010, vol. 1, no. 4, pp. 251–275.

*История статьи*

*Поступила в редакцию 29 мая 2017 г.*

*Принята к публикации 27 июня 2017 г.*

## RESOURCES OF INCREASE OPERATIONAL AND TECHNICAL-ECONOMIC INDICES OF HEAT-ENGINES

<sup>1</sup>V. A. Pinchuk, <sup>2</sup>A. V. Pinchuk

<sup>1</sup>Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov,  
Saint Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup>R&D Center «Protei», Saint Petersburg, Russian Federation

*In the work the attention is paid to existence of new, traditionally not accounted (earlier not known in that number) resources for increase of both operational and technical-economic indices of heat-engines is substantiated.*

*It's noted that operational performances of heat-engines could be raised by diagnostics efficiency increasing of both quality of working process of the engine and states of the one's material part. The noted, in the one's turn, could be substantiated with including of electro-physical information being registered in the flows of combustion products behind nozzle exit section into structure of diagnostics information.*

*In the frame of additional resources finding for increasing of technical-economic indices of heat-engines it's paid attention onto principal possibilities of additional energy-supplying of the engine's working cycle with energy of intra-nuclear origin.*

*Being forecasted productivity and practical expediency of using of the noted so possibilities for improvement of technical-economic and operational indices of heat-engines are substantiated in that number with experiment results. Practical using of being noted so resources demands however an additional investigations and can be substantiated only on the base of needed organizing, financial, material and technical investments.*

*Keywords: technical and economic indices, power efficiency, operational reliability, engines technical diagnostics.*

### References

1. Shaeffer J. F., Peng T. C. High-Potential clouds in jet-engine exhausts. AIAA Paper, 1976, no. 76-397, pp. 1–8.
2. Shkalikov V. A. *Issledovanie vyhlopnih ustrojstv generatornogo gaza* [Investigation of exhaust devices of generator gas] / In collection of papers: Heat Processes and working media characteristics of flying vehicles engines. Kazan, Kazan Aviation Institute (KAI), 1980, pp. 41–47 (In Russian)
3. Potapov G.P. *EHlektrizaciya reaktivnyh сопел* [Electrization of exhaust nozzles]. News of High Educational Institutions. Aviation Technics. 1978, no. 4, pp. 112–117. (In Russian)
4. Shkalikov V. A., Lebedev A. A., Kuldganov G. K. *Teplovye process i svojstva rabochih tel dvigatelej letatel'nyh apparatov* [Heat processes & Properties of flying vehicles engines working media]. Kazan, Kazan Aviation Institute, 1982, pp. 79–83 (In Russian)
5. Vatadgin A. B. *Elektrodinamika* [Electrodynamics]. Moscow, Publishing House of Phisico-mathematical Literature Publ., 1983, 344 p. (In Russian)
6. Pinchuk V. A. *Nizkotemperaturnaya plazma v usloviyah vneshnih akusticheskikh vozdeystvij* [Low Temperature Plasma to External Acoustic Disturbances]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics (JEPTER). 1994, vol. 67, no. 1–2, pp. 781–784. (In Russian)
7. Pinchuk V. A., Pinchuk A. V. *Fizika real'nyh processov s anomal'nymi proyavleniyami: vvedenie v problemu* [Physics of Real Processes with Anomalous Manifestations: introduction in the problem]. Saint-Peterburg, BSTU Publ., 2016, 165 p. (In Russian)
8. Abramovich G. N. *Prikladnaya gazovaya dinamika* [Applied Gas-dynamics]. Moscow, Chief Publishing House of Phisico-mathematical Literature Publ, 1976, 888 p. (In Russian)
9. Pinchuk A. V., Pinchuk V. A. *Ekspluatacionnye harakteristiki teplovyh ehnergopreobrazovatelej: resursy obespecheniya* [A Applied characteristics of heat converters: ensuring resources]. Plenary papers of All-Russian scientific and technical conference «Problems & Progress Perspectives of Aviation, ground transport and power engineering». Kazan, Publishing House of KSTU, 2009, pp. 65–85. (In Russian)
10. Pinchuk A. V., Pinchuk V. A. The Formations with Surplus Charge: Nature and influence upon Burning process Stability. 6<sup>th</sup> Int. Seminar on Flame Structure. Book of Abstracts (Ed. A. Konnov). Brussels, Belgium, 2008, p. 60.
11. Pinchuk A. V., Pinchuk V. A. Ball Lightning: Physics Base & Conceptual Views Complex. Eurasian Chemico-Technological Journal, 2009, vol. 11, no. 3, pp. 169–186.
12. Pinchuk A. V., Pinchuk V. A. Physics Base & Conceptual Views Complex of Ball Lightning. Journal of Modern Physics (JMP), 2010, vol. 1, no. 4, pp. 251–275.

**Article history**

Received 29 May 2017

Accepted 27 June 2017

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ТЕРМОЭМИССИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СО СВЕРХДЛИТЕЛЬНЫМ СРОКОМ АКТИВНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ

**А. В. Колычев, В. А. Керножицкий**

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация*

*Описано устройство гидродинамического термоэмиссионного преобразователя тепловой энергии в электрическую. Данное устройство заключается в том, что в его активной зоне организуется течение потоков слабоионизированной плазмы с высокими скоростями (0,5–7,0 км/с и выше). Это позволяет располагать рабочие поверхности катода и анода гидродинамического термоэмиссионного преобразователя на расстояниях, много больше характерных для классических термоэлектрических преобразователей величин в 0,3–0,5 мм. Таким образом, повышается надежность гидродинамического термоэмиссионного преобразователя за счет отсутствия необходимости поддержания малого зазора и сведения к минимуму негативных последствий изменения формы активной поверхности катода. Наличие слабоионизированной плазмы обуславливает перенос электронов за счет её движения, что приводит к ликвидации пространственного заряда над поверхностью эмиссии, что также позволяет поддерживать достаточно большой зазор (до 5 см и выше) между катодом и анодом при тех же и лучших теплоэлектрофизических характеристиках преобразования по сравнению с классическими термоэлектрическими преобразователями. При этом функционирование гидродинамического термоэмиссионного преобразователя не зависит от формы электродов, которая может меняться в течение всего срока существования, и отсутствует потребность в дистанциаторах. Это приводит к существенному повышению надежности и долговечности системы преобразования при применении любого источника тепловой энергии, обеспечивая ресурс в 15–20 лет и более непрерывной работы. При движении слабоионизированной плазмы над поверхностью катода происходит снос пространственного заряда по направлению её движения, что снижает потери напряжения между катодом и анодом и обуславливает рост КПД преобразования. По предварительным оценкам суммарный КПД преобразования может составлять 30–35 %. Вклад в данное значение вносит передача кинетической энергии движения слабоионизированной плазмы электронам эмиссии.*

*Ключевые слова: термоэлектронная эмиссия, гидродинамический термоэмиссионный преобразователь, высокоскоростные потоки слабоионизированной плазмы.*

На данном этапе развития ракетно-космической техники и космонавтики особую актуальность приобретает разработка крупногабаритных космических летательных аппаратов (КЛА) с длительным сроком службы. Данные КЛА необходимы для комплексного исследования Луны, организации исследовательских автоматических и пилотируемых миссий к планетам Солнечной системы, в том числе к Марсу, борьбы с космическим мусором, обеспечения электропитания крупных научных инструментов, например, орби-

тальных телескопов, предупреждения об астероидной опасности, поиска и добычи полезных ископаемых на различных космических телах и др. При этом важным фактором решения таких задач является применение отечественных технологий на полностью отечественной элементной базе.

Предполагается, что в основе энергообеспечения указанных КЛА будет система с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую энергию. Поэтому разработка и совершенствование таких систем энергообеспечения также является актуальной.

Разработчики систем прямого преобразования тепловой энергии в электрическую энергию

сталкиваются с рядом технических проблем, например, с проблемой обеспечения длительного ресурса таких преобразователей – источников электрической энергии на борту. Классические термоэмиссионные системы [1] имеют в своем составе малый межэлектродный зазор, что негативно сказывается на надежности такой системы преобразования в течение длительного срока службы порядка 10–15 лет. Так, для реализации турбомашинного преобразования [2] в составе энергетической установки КЛА требуется ряд новых технологических решений, например, обеспечение высоких оборотов ротора турбины на основе использования магнитных подшипников. Существуют также магнитогидродинамические (МГД) системы преобразования тепловой энергии в электричество [3], которые обладают такими недостатками, как низкий КПД при относительно высоких температурах рабочего тела ( $\approx 2200$  градусов Цельсия) и малый ресурс электродов в рабочей зоне. Поэтому актуальным является поиск новых методов преобразования тепловой энергии в электрическую энергию повышенной надежности, простоты и долговечности для использования в энергосистемах КЛА различных видов с длительным сроком активного существования.

В БГТУ разработан и исследуется новый тип гидродинамических термоэмиссионных преобразователей (ГИТЭП) [1, 2], в основу которых положен процесс организации в активной зоне термоэмиссионного преобразователя высокоскоростных потоков инертных газов (СИП). Разработка ГИТЭП реализуема полностью на отечественной элементной базе с использованием научного задела, опережающего научные заделы других стран на 5–10 лет.

Устройство ГИТЭП заключается в том, что в активной зоне ТЭП организуется течение СИП с высокой скоростью. Это достигается тем, что на входе в зазор между катодом и анодом ГИТЭП устанавливается сопло, выходное сечение которого через зазор связано с входным отверстием диффузора. А выходное отверстие диффузора через источник подогрева рабочего тела (инертных газов) посредством трубопровода связано с входным сечением сопла. При этом в трубопроводе, соединяющем диффузор и сопло, установлен вспомогательный анод-сетка, предназначенный для восприятия оставшихся электронов эмиссии и перенаправления их обратно на катод.

При нагреве катода, например, от бортового источника тепловой энергии происходит эмиссия электронов, которые переносятся на анод посредством СИП. То есть при движении СИП образуется проводящий слой, через который электроны переходят с катода на анод. При этом большая их часть воспринимается на выходе из активной зоны посредством вспомогательного анода-сетки,

что обуславливает низкую зависимость термоэлектронной эмиссии от величины межэлектродного зазора.

В качестве исходных элементов для СИП могут выступать легкоионизированные элементы или соединения, например, цезий, барий. Может быть также использована плазма инертных газов.

Устройство ГИТЭП представлено на рис. 1.

Мировая новизна и работоспособность ГИТЭП подтверждены патентом на изобретение № 2538768 и патентом на полезную модель № 139811.

Разрабатываемый ГИТЭП обладает следующими достоинствами:

1. Наличие СИП обуславливает перенос электронов за счет движения СИП за время, при котором не происходит существенного рассеяния энергии электронов, что позволяет получить высокие электрические характеристики преобразования.

2. Наличие СИП также приводит к ликвидации пространственного заряда над поверхностью эмиссии, что позволяет поддерживать достаточно большой зазор (до 5 см и выше) между катодом и анодом при тех же и лучших теплоэлектрофизических характеристиках преобразования по сравнению с классическим ТЭП. При этом функционирование ГИТЭП не зависит от формы электродов, которая может меняться в течение всего срока существования, и отсутствует потребность в дистанциаторах. Это приводит к существенному повышению надежности и долговечности системы преобразования при применении любого источника тепловой энергии, обеспечивая ресурс в 15–20 лет и более непрерывной работы.

3. Можно использовать относительно недорогие материалы эмиссионных слоев. При этом более высокое значение работы выхода таких материалов по сравнению с классическим цезиевым ТЭП компенсируется ликвидацией пространственного заряда посредством движения СИП с большими скоростями и увеличением размеров эмиссионной поверхности без ущерба для надежности и долговечности ГИТЭП.

4. СИП также приводит к устранению из зазора технологических газов и других веществ, характерных для устройства функционирования источника тепловой энергии КЛА.

5. За счет движения СИП над поверхностью катода происходит снос пространственного заряда по направлению движения СИП, что снижает потери напряжения между катодом и анодом и обуславливает рост КПД преобразования. По предварительным оценкам, суммарный КПД преобразования может составлять 30–35 %. Вклад в данное значение вносит передача кинетической энергии движения СИП электронам эмиссии.

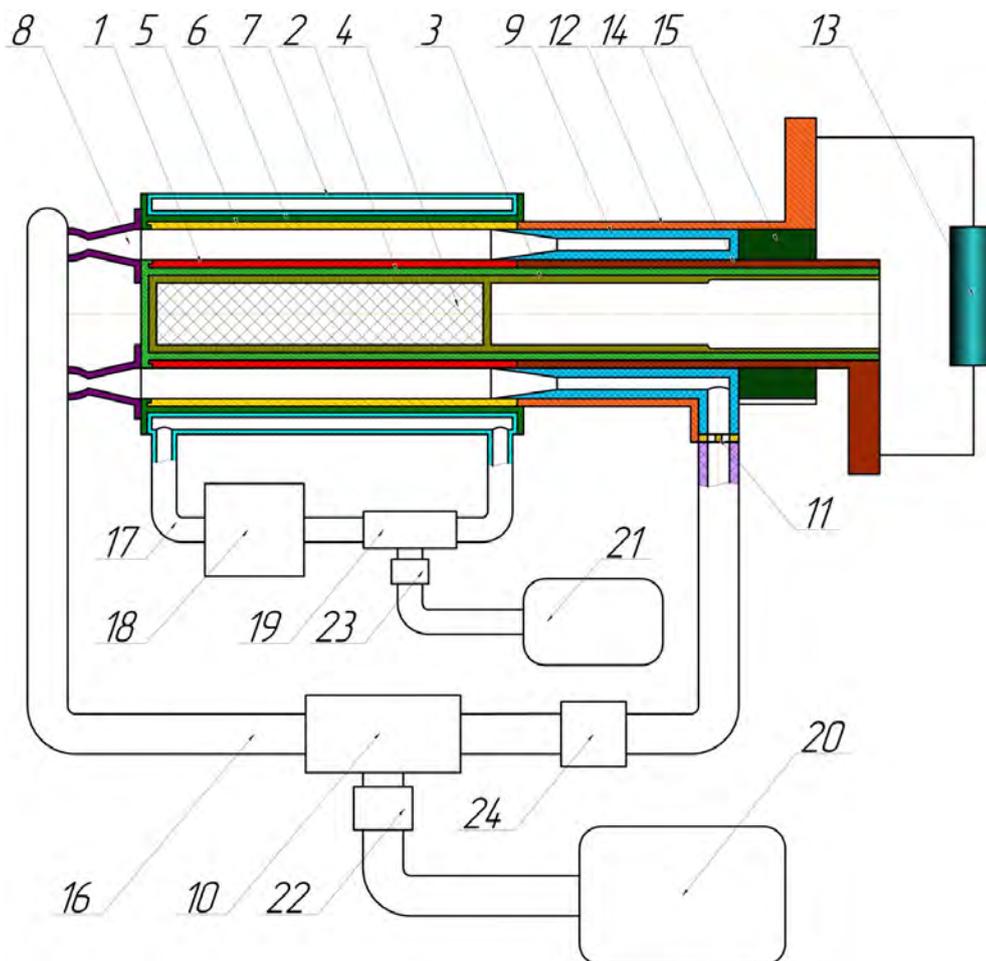


Рис. 1. Принципиальная схема устройства ГИТЭП:

1 – катод, 2 – электроизоляция катода, 3 – оболочка ядерного топлива, 4 – ядерное топливо, 5 – анод, 6 – электроизоляция анода, 7 – система охлаждения анода, 8 – сверхзвуковое щелевое сопло, 9 – сверхзвуковой щелевой диффузор, 10 – нагреватель, 11 – анод-сетка, 12 – токовывод анода, 13 – потребитель электрической энергии, 14 – токоввод катода, 15 – электроизоляция, 16 – трубопровод циркуляции рабочего тела, 17 – трубопровод системы охлаждения анода, 18 – теплообменник, 19 – насос, 20 – бак для хранения рабочего тела, 21 – бак для хранения охладителя анода, 22 – клапан, 23 – клапан, 24 – обратный клапан

Таким образом, на основе применения ГИТЭП появляется возможность создания новых энергетических установок с прямым преобразованием тепловой энергии в электричество повышенной надежности и долговечности, способных обеспечить длительное автономное существование крупногабаритных КЛА в ближнем и дальнем Космосе.

Предлагаемые в настоящей статье технические решения обладают технологической простотой, базируются на применении отечественных материалов и уникальных отечественных технологий. Это обуславливает высокую надежность

создаваемых на их основе энергетических установок и сокращают сроки их отработки и ввода в эксплуатацию.

ГИТЭП может стать основой для создания транспортного энергетического модуля и орбитального буксира, крупногабаритных КЛА, в том числе орбитальных платформ для сборки на орбите крупногабаритных конструкций со сверхдлительным сроком активного существования, других объектов ракетно-космической техники, предназначенных для решения основных задач исследования и освоения Солнечной системы.

## Список литературы

1. Квасников Л. А., Кайбышев В. З., Каландаришвили А. Г. Рабочие процессы в термоэмиссионных преобразователях ядерных энергетических установок. М. : МАИ, 2001. 240 с.
2. Цанев С. В., Буров В. Д., Ремезов А. Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций : учеб. пособие для вузов / под ред. С. В. Цанева. 3-е изд., стереотип. М. : Издательский дом МЭИ, 2009. 584 с.: ил.

3. Бреев В. В., Губарев А. В., Панченко В. П. Сверхзвуковые МГД-генераторы. М.: Энергоатомиздат, 1988. 240 с.
4. Патент РФ № 2538768 МПК G21C 3/40. Термоэмиссионный электрогенерирующий канал. Заявка № 2013143069/07 от 20.09.2013 / Керножицкий В. А., Кольчев А. В., Атамасов В. Д., Романов А. В., Шаталов И. В., Бюл., 2015. № 1.
5. Патент РФ № 139811 МПК G21C 3/40. Термоэмиссионный электрогенерирующий канал. Заявка № 2013145364/07 от 09.10.2013 / Керножицкий В. А., Кольчев А. В., Ипатов О. С., Бюл., 2014. № 12.

**История статьи**

Поступила в редакцию 31 мая 2017 г.

Принята к публикации 27 июня 2017 г.

## HYDRODYNAMIC THERMIONIC CONVERTERS POWER PLANTS OF SPACECRAFTS WITH THE SUPERLONGTERM LIFECICLE

129

**A. V. Kolychev, V. A. Kernozhitskiy**

*Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov,  
Saint Petersburg, Russian Federation*

*The device of the hydrodynamic thermionic converter of heat energy in electric is described. The hydrodynamic thermionic converter device is that in the nuclear core of it the current of flows of easy ionized plasma with high speeds will be organized (0.5-7 km/s and above). It allows to have effective areas of the cathode and hydrodynamic thermionic converter anode at distances much more than sizes, characteristic of classical thermionic converter, in 0.3-0.5 mm. Thus reliability of hydrodynamic thermionic converter due to lack of need of maintenance of the small gap and minimizing of negative effects of change of the form of the active surface of the cathode increases. Existence the easy ionized plasma causes electron transfer at the expense of the movement easy ionized plasma that leads to elimination of a space charge over the surface of issue that also allows to support rather big gap (to 5 cm and above) between the cathode and the anode at the same and best heatophysical characteristics of transformation in comparison with classical thermoelectric converter. At the same time functioning of hydrodynamic thermionic converter does not depend on a form of electrodes which can change during all term of existence and there is no requirement in the distantiatorakh. It leads to essential increase in reliability and longevity of system of transformation at application of any source of thermal energy, providing a resource in 15-20 and more years of the continuous operation.*

*At the movement easy ionized plasma over the surface of the cathode there is a demolition of a space charge in the direction of the movement easy ionized plasma that reduces losses of tension between the cathode and the anode and causes body height of efficiency of transformation. According to preliminary estimates the cooperative efficiency of transformation can make the size of 30-35%. The contribution to this value is made by transfer of a kinetic energy of the movement easy ionized plasma to emission electrons.*

*Keywords: thermionic emission, hydrodynamic thermionic converter, high-speed flows of easy ionized plasma.*

## References

1. Kvasnikov L.A., Kaybyshev V.Z., Kalendarishvili A.G. *Rabochie protsessy v termoemissionnykh preobrazovatelyakh yadernykh energeticheskikh ustanovok* [Working processes in thermionic converters of nuclear power plants]. Moscow, MAI Publ., 2001, 240 p. (In Russian)
2. Canev S. V. *Gazoturbinnie i parogazovie ustanovki teplovih elektrostancii* [Gas turbine and Steam Gas plants for heat electric station] Moscow, MEI Publ., 2009, 584 p. (In Russian)
3. Breev V. V., Gubarev A. V., Panchenko V. P. *Sverhzvukovie MGD-generatori* [Supersonic MHD – generators]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988, 240 p. (In Russian)
4. Kolychev A. V., Kernozhitskiy V. A. *Termoemissionnii elektrogeneriruyuschii kanal* [The thermoemission electrogenerating channel]. Patent RF, no. 2538768, 2015.
5. Kolychev A. V., Kernozhitskiy V. A. *Termoemissionnii elektrogeneriruyuschii kanal* [The thermoemission electrogenerating channel]. Patent RF, no. 139811, 2014.

**Article history**

Received 31 May 2017

Accepted 27 June 2017

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОДНОЧАСТОТНЫХ ПРИЕМНИКОВ ГНСС ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИОНОСФЕРЫ

**В. Б. Иванов<sup>1</sup>, А. А. Холмогоров<sup>1</sup>, О. А. Горбачев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Иркутский филиал Московского гражданского технического университета гражданской авиации, г. Иркутск, Российская Федерация

*Работа посвящена исследованию возможностей одночастотных приемников для регистрации нерегулярных событий в ионосфере. Изыскания проводились на примере следующих событий: солнечное затмение 20 марта 2015 года, мощные землетрясения в Чили 27 февраля 2010 года и в Японии 11 марта 2011 года, взрыв Челябинского метеороида 15 февраля 2016 года. Проводилось сравнение полного электронного содержания между спутником и приемником для спокойных суток и суток с возмущением для поиска различных отклонений в его поведении. В результате было установлено, что одночастотные приемники позволяют наблюдать такие эффекты, как: плавное уменьшение, резкий излом на суточном ходе полного электронного содержания, а также волновые структуры на пути приемник-спутник. Полученные результаты сравнивались с данными двухчастотных приемников глобальной навигационной спутниковой системы, как с более точными и широко зарекомендовавшими себя для диагностики ионосферы. Данные двухчастотной диагностики качественно не отличаются от одночастотной диагностики, однако они более точные из-за различных алгоритмов восстановления полного электронного содержания. Основным результатом работы, помимо данных самой диагностики ионосферы, является вывод о применимости одночастотных приемников для диагностики ионосферы.*

*Ключевые слова: ионосфера, мониторинг, одночастотные измерения, GPS.*

Под руководством профессора Э. Л. Афраймовича (Институт солнечно-земной физики СО РАН) было сформировано новое направление диагностики состояния верхней атмосферы Земли на базе обработки сигналов спутниковых радионавигационных систем. Теоретические основы и разнообразные примеры такой диагностики представлены в монографии [1]. В этой работе выполнены исследования посредством GPS-мониторинга эффектов в земной ионосфере, связанных с солнечными затмениями, землетрясениями, геомагнитными возмущениями, мощными тропическими циклонами.

Диагностика ионосферы с использованием глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) осуществляется при помощи измерения полного электронного содержания (ПЭС) и его динамики на луче спутник-приемник. При регистрации сигналов GPS/ГЛОНАСС на двух частотах  $L1$  и  $L2$  возможно измерение временных ходов фазы принимаемых сигналов с точностью до неизвестной аддитивной постоянной – так называемая

фазовая неоднозначность. При этом точность измерения фазы оценивается в сотые доли радиана или, в соответствии с длинами радиоволн, теоретически составляет миллиметры.

Величина полного электронного содержания вдоль луча от фазового центра антенны спутника до антенны приемника определяется известной формулой

$$I = \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + \text{const}], \quad (1)$$

где  $f_1$  и  $f_2$  – частоты радиоволн;  $L_1 \lambda_1$  и  $L_2 \lambda_2$  – фазовые пути на соответствующих частотах. Наличие неизвестной константы  $\text{const}$  в формуле (1) связано именно с фазовой неоднозначностью. Таким образом, имеется возможность измерять не абсолютное значение ПЭС, а только его изменения во времени относительно начального момента регистрации. При этом измерению подлежат вариации ПЭС относительно начального момента вдоль траектории распространения сигнала, то есть наклонное полное электронное содержание. Именно формула (1) используется во всех измерениях с помощью двухчастотных приемников GPS/ГЛОНАСС.

При использовании одночастотных приемников восстановление хода ПЭС возможно за счет вклада ионосферы с противоположными знаками в псевдодалности, вычисленные по фазовым и кодовым измерениям. Тогда вычитание одного из другого дает только удвоенное значение ионосферного запаздывания и шум кодовых измерений. В окончательном виде значение ПЭС, полученное таким способом на одночастотном приемнике (для частоты  $L1$ ), будет иметь вид

$$I = 3,08(C1 - L_1\lambda_1). \quad (2)$$

Для единообразия с формулой (1) вновь использовано произведение  $L_1\lambda_1$ . Под  $C1$  следует понимать псевдодалность, полученную для сигнала кода  $C/A$ , поэтому величины в скобках соотношения (2) могут быть взяты непосредственно из RINEX-файлов. ПЭС, рассчитанное по формуле (2), представлено уже в единицах TECU. При наличии в RINEX-файлах псевдодалностей, полученных для кода повышенной точности  $P1$ , можно вместо  $C1$  использовать и эти данные.

Первым этапом был выполнен анализ влияния на ПЭС полного солнечного затмения, произошедшего 20 марта 2015 года, наиболее четко наблюдавшегося в северо-западной части Европы и над северной Атлантикой [2, 3]. Для анализа рассматриваемого солнечного затмения наиболее подходящей является станция IGSMORP с координатами  $55.2^\circ$  северной широты,  $1.7^\circ$  западной долготы (Великобритания). Для этой станции имело место наибольшее покрытие Солнца лунным диском – около 90 %. Начало затмения в районе станции MORP соответствует примерно 8 часам 40 минутам UTC. Общая длительность затмения около двух часов.

По формуле (1) были произведены расчеты временных изменений наклонных ПЭС для спутников GPS G6, G9, G10 – спутников с наибольшим процентом перекрытия солнечным диском. Начальное время периода анализа соответствует 6 часам 47 минутам UTC. Длительность периода наблюдения составляет 3 часа 50 минут. В последующий период имели место сбои сопровождения фазы несущей, что не позволило выполнить более длительный сеанс анализа. В соответствии с форматом RINEX-файлов шаг по времени в расчетах составляет 30 секунд так, что представлены данные для 460 временных точек. Естественно было ожидать аномального поведения временного хода ПЭС по сравнению с вариациями ПЭС в другие сутки. По этой причине аналогичные расчеты были произведены для предыдущего и последующего дней 19 и 21 марта 2015 года. Поскольку период обращения спутников GPS составляет 11 часов 58 минут, геометрия и конфигурация созвездий наблюдаемых

спутников в двух соседних сутках практически одинаковые.

На рис. 1 представлены графики изменений наклонных ПЭС относительно начального момента для указанных спутников. Вариации ПЭС даны в единицах TECU, составляющих  $10^{16}$  м<sup>-2</sup>. Здесь штриховыми линиями показан ход для дня солнечного затмения, сплошными линиями – для предыдущих суток 19 марта 2015 года и штрихпунктирными – для последующих суток 21 марта 2015 года. Можно видеть, что степень влияния затмения на ПЭС для различных спутников различна. Это объясняется тем, что ионосферные точки для различных направлений могут быть разнесены на сотни километров и попадать в различные степени закрытия солнечного диска. Наибольший эффект отмечается для спутника G10. Здесь глубина максимального отклонения ПЭС, связанного с затмением, относительно контрольных суток составляет около 15 TECU. Из графика вариаций ПЭС можно также видеть, что реакция на солнечное затмение начинается непосредственно с началом закрытия солнечного диска для соответствующей ионосферной точки. Момент начала закрытия над станцией MORP на графиках рис. 1 показан вертикальной прямой.

По представленной выше методике для сигналов спутника G10 одновременно с двухчастотными фазовыми измерениями были проведены измерения по разности псевдодалности и фазового пути на частоте  $L1$ , выполненные по формуле (2). На рис. 2 графики изменений ПЭС в расширенном до длительности 4 часов 40 минут сеансе по одночастотным и двухчастотным данным – сплошная и штриховая линии соответственно.

Несмотря на то, что в одночастотных данных наблюдается, как и ожидалось, значительная зашумленность, видно, что оба графика качественно совпадают.

Вторым этапом было исследование ионосферных эффектов мощных землетрясений [4]. Анализ различных аспектов рассматриваемых далее событий в Чили 2010 года и в Японии 2011 года проведен в том числе в работах [5–7]. Здесь констатируются факты обнаружения реакции ПЭС на землетрясение, представляются количественные характеристики движений перемещающихся ионосферных возмущений квазиволнового характера, а также изломов на временном ходе ПЭС. Даются некоторые физические интерпретации природы таких возмущений.

В частности, в публикации [8] производился поиск эффектов, идентифицируемых в виде появления спустя некоторое время после основного толчка квазипериодических возмущений регулярного временного хода ПЭС. Помимо них присутствуют возмущения, качественно отличные от формирования квазипериодических пакетов. На

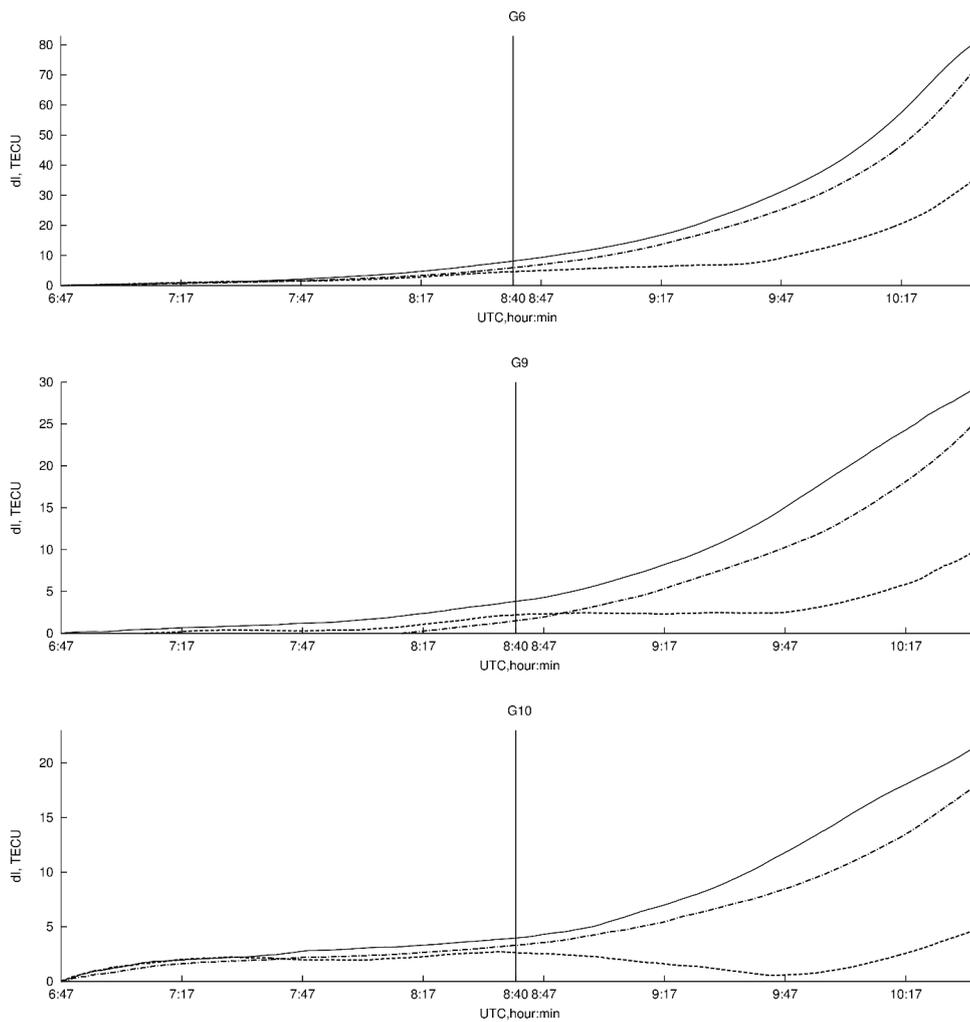


Рис. 1. Относительные временные вариации наклонного ПЭС для дня затмения 20 марта – штриховые линии, предыдущего дня 19 марта – сплошные линии и для последующего дня 21 марта – штрихпунктирные линии для трех спутников GPS

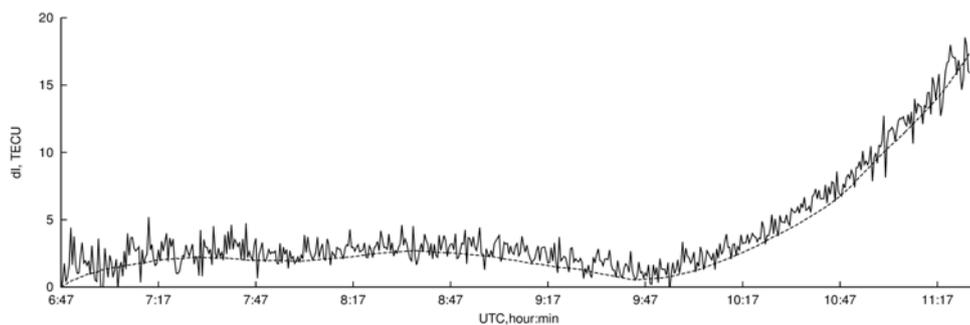


Рис. 2. Временной ход относительных изменений наклонного ПЭС при солнечном затмении. Штриховая линия – двухчастотные измерения, сплошная линия – одночастотные измерения

рис. 3 показаны подобные возмущения, зарегистрированные в Японии для пар станция-спутник: USUD – PRN26 (верхний график), USUD – PRN15 (нижний график). Представлены данные для дня землетрясения 11 марта и двух контрольных дней 9 и 10 марта. Характерной особенностью времен-

ного хода ПЭС является то, что спустя некоторое время после основного толчка регистрируется резкий излом с последующими нерегулярными флуктуациями.

Аналогичные изломы на временном ходе ПЭС отчетливо наблюдаются и на временных ва-

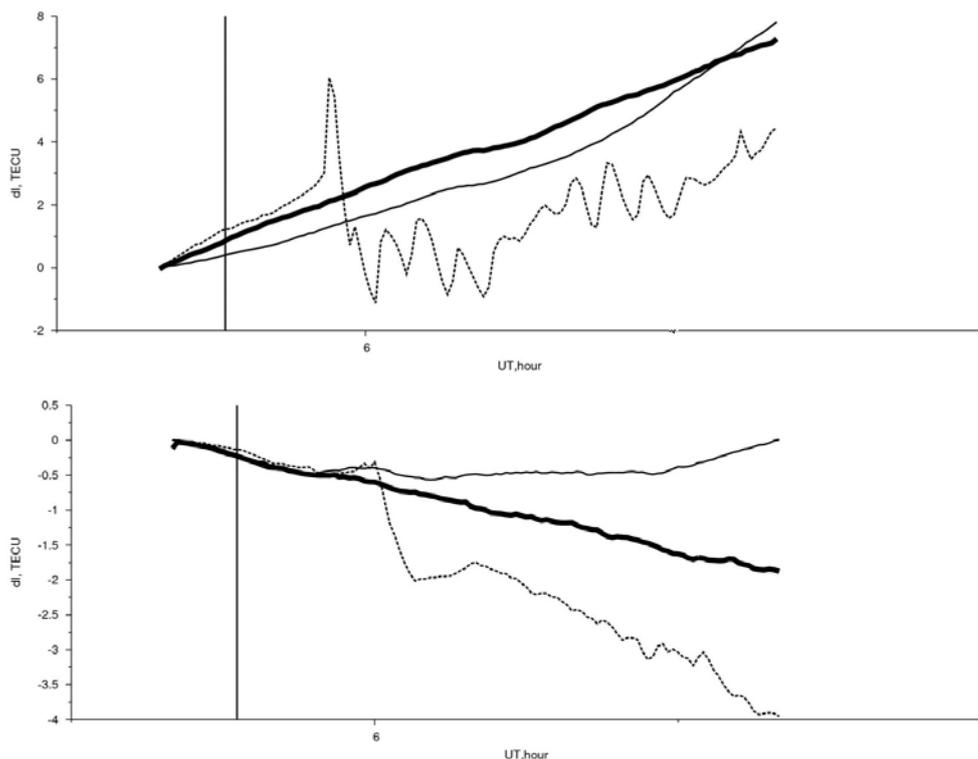


Рис. 3. Возмущения ионосферы, вызванные землетрясением в Японии 11 марта 2011 года на пути луча станция (USUD) – спутник (PRN26 – верхний график, PRN15 – нижний график). День землетрясения 11 марта – пунктирная линия и два контрольных дня 9 (сплошная тонкая линия) и 10 марта (сплошная жирная линия). Вертикальной линией изображено время первичного толчка землетрясения

риациях, представленных в работе [7], в то время как в цитируемой статье [8] они в значительной степени скрыты, возможно, в результате удаления регулярного тренды.

Аналогичная реакция на землетрясение обнаружилась и во время события в Чили, например, для пар станция-спутник: SANT – PRN13, SANT – PRN. Сравнения с временными ходами ПЭС в контрольные дни убедительно свидетельствуют о том, что регистрируется именно реакция на землетрясение.

На рис. 4 приведены графики временного хода ПЭС, определяемого в двухчастотном режиме (сплошная линия) и в одночастотном режиме с использованием C/A-кода (пунктирная линия), соответствующего графикам рис. 3. Несмотря на то, что кодовые измерения существенно более за-

шумлены, можно видеть, что и они вполне уверенно воспроизводят основные относительнодолгопериодические вариации, детектируемые в двухчастотном режиме. В частности, и по кодовым измерениям можно уверенно определять момент начальной реакции ПЭС на толчок землетрясения.

Фиксация времени реакции ПЭС на основной толчок позволяет выполнить оценку скорости распространения возмущений в атмосфере – ионосфере от очага землетрясения до ионосферной точки (300 км). Необходимые для расчетов координаты спутников в требуемые моменты времени были получены с помощью программы WHERESAT из пакета GPSToolkit [9, 10].

Результаты расчетов времени и скорости распространения возмущений представлены в табл. 1. Время после толчка рассчитано с точ-

Таблица 1

Результаты расчетов времени и скорости

Землетрясение	Станция	Номер спутника	Время после толчка, с	Расстояние между ионосферными точками и эпицентром землетрясения, м	Скорость, м/с
Япония 11 марта 2011 г.	USUD	15	727	480637	661
		26	517	310113	600
Чили 27 февраля 2010 г.	SANT	13	643	568809	885
		23	673	450735	670

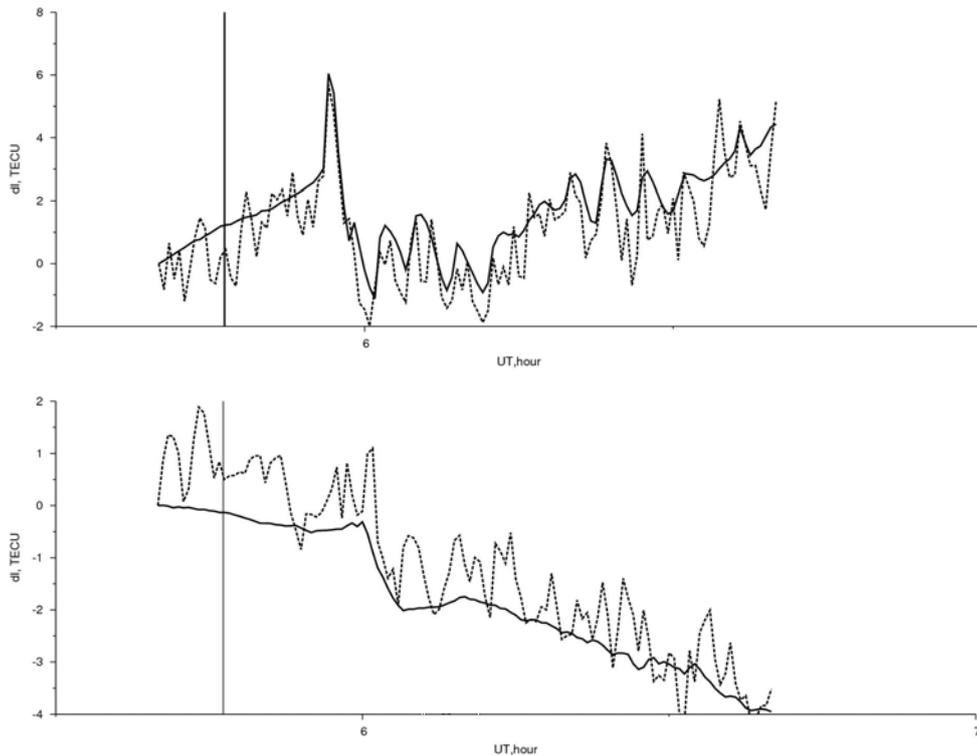


Рис. 4. Сравнение временных вариаций ПЭС, определяемых по двухчастотным фазовым измерениям (сплошная линия) и одночастотным кодовым измерениям, определяемым по C/A коду (пунктирная линия) для землетрясения в Японии 11 марта 2011 года на пути луча станция (USUD) – спутник (PRN26 – верхний график, PRN15 – нижний график)

ностью в 30 секунд, что связано с соответствующей дискретностью данных в формате RINEX-файлов.

Как видим, типичные скорости распространения детектируемых «быстрых» возмущений лежат в диапазоне около 600–900 м/с. Необходимо подчеркнуть, что приведенные оценки относятся к скорости распространения первичного возмущения в нейтральной атмосфере от поверхности Земли до ионосферных высот, в то время как в цитируемых выше статьях основное внимание акцентируется на распространении возмущений собственно в ионосферной плазме. Можно ожидать, что агентом передачи первичного возмущения в нейтральной атмосфере является ударная волна акустической природы. В этом плане можно указать на то, что по данным, представленным, например, в работе [11], скорость звука меняется от примерно 300 м/с в приземной атмосфере до 900 м/с на ионосферных высотах. Указанные в табл. 1 скорости в диапазоне от 600 до 900 м/с вполне соответствуют скоростям звука в верхней атмосфере.

Рассмотренные выше геогелиофизические события, такие как солнечное затмение или мощные землетрясения, являются мощными эффектами, вызывающими соответственно значительную реакцию в ионосфере и сильные возмущения ПЭС. Представляет интерес оценить возможности одночастотной диагностики в условиях менее

мощных первичных факторов, потенциально влияющих на ПЭС, например, отклик ионосферы на падение Челябинского метеороида.

Челябинский метеороид, по оценкам НАСА, является самым крупным из известных космических тел, достигших Земли после 1908 года – падения Тунгусского метеорита. Метеороид массой до 11 тысяч тонн, по разным оценкам, вошел в атмосферу Земли со скоростью около 18 км/с. Основной взрыв произошел на высоте от 21 до 25 км 15.02.2016 в 3:20:30 UTC в точке с координатами 54.84° северной широты и 61.46° восточной долготы. Космическое тело двигалось по основному азимуту 290 градусов. Угол входа в атмосферу составил 20° к горизонту. Траектория была вычислена различными учеными, например астрономами из Колумбии [12], с помощью многочисленных камер видеонаблюдения и видеорегистраторов.

Для мониторинга нерегулярных явлений в ионосфере в настоящее время используется целый ряд различных технологий. Падение Челябинского метеороида удалось сопроводить при помощи радара ЕКВ российского сегмента когерентных радаров декаметрового диапазона сети SuperDarn [13], системы ионозондов [14], спутниковых навигационных систем [15] и пр. Следует отметить, что использование всех вышеупомянутых средств осложняется весьма низкой

плотностью сети инструментов на территории Российской Федерации.

Детектирование эффекта производилось посредством сравнения временных ходов наклонных ПЭС в день события и в два контрольных дня – за одни сутки до события и в последующие сутки. Расчеты проводились для двухчастотного режима по формуле (1) с исключением константы, связанной с фазовой неоднозначностью, так что начальное значение ПЭС принималось равным нулю. На рис. 6 представлено три графика для пар станция-спутник, соответственно, сверху вниз: ARTU – PRN26, NOVМ – PRN30, ZECK – PRN26. Вертикальной прямой на всех графиках отмечено время взрыва Челябинского метеороида, сплошной линией на графиках показано поведение наклонного ПЭС за

сутки до падения, штрихпунктирной линией – день падения, пунктирной линией – день после, для станции NOVМ отсутствовали данные для дня после, поэтому на графике они не представлены.

На приведенных рисунках видно, что ионосферный эффект Челябинского метеороида достаточно уверенно регистрируется в виде появления на временном ходе наклонного ПЭС нерегулярных (квазипериодических) вариаций, начинающихся с некоторого момента времени, продолжающихся значительное время и не наблюдаемых в соседних сутках.

Одной из поставленных задач было изучение возможности регистрации эффекта по данным, полученным на одной частоте L1 – вариаций псевдодальности по коду C1 и фазы несущей на

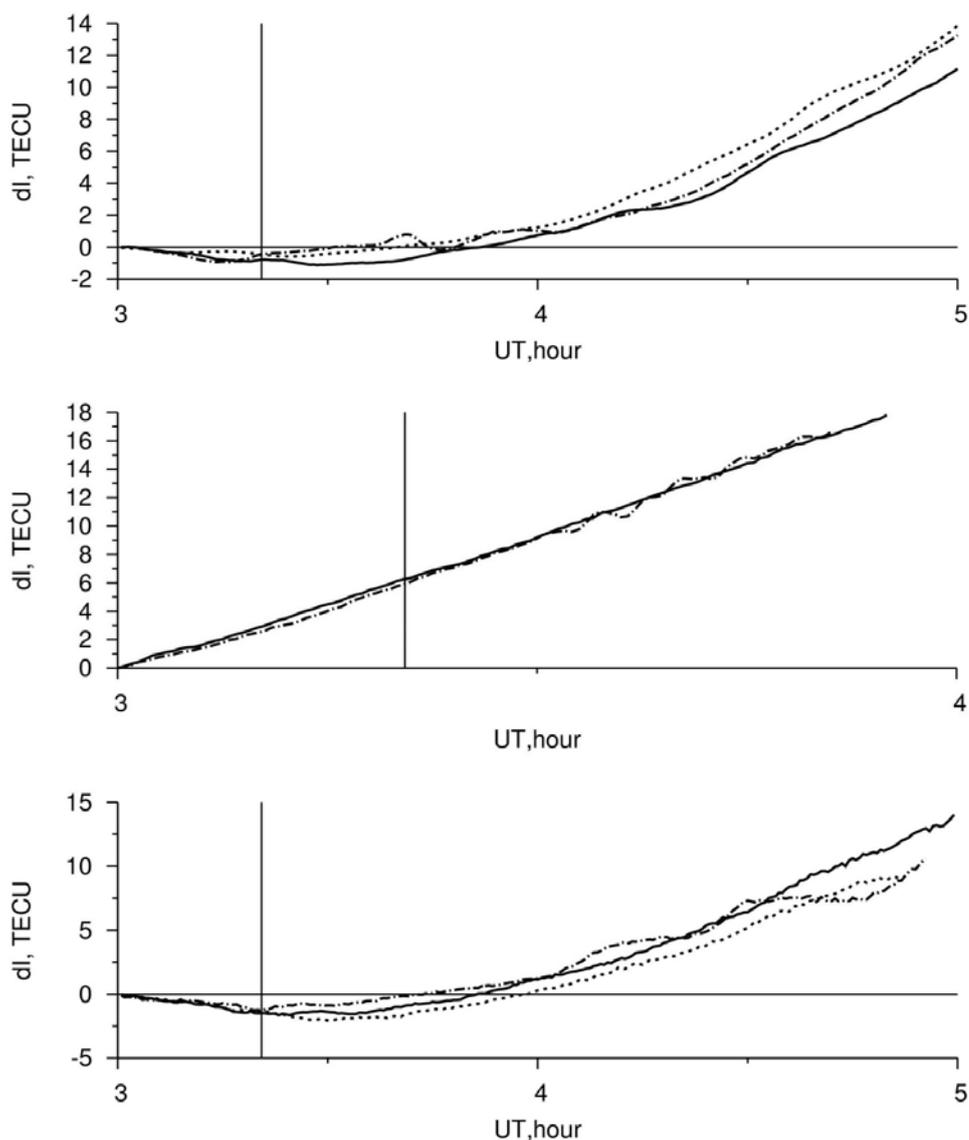


Рис. 5. Сравнение временного хода наклонного ПЭС для пар станция-спутник (сверху вниз): ARTU – PRN26, NOVМ – PRN30, ZECK – PRN26. Вертикальной линией на всех графиках отмечено время взрыва Челябинского метеороида, сплошной линией на графиках показано поведение наклонного ПЭС за сутки до падения, штрихпунктирной линией – день падения, пунктирной линией – день после

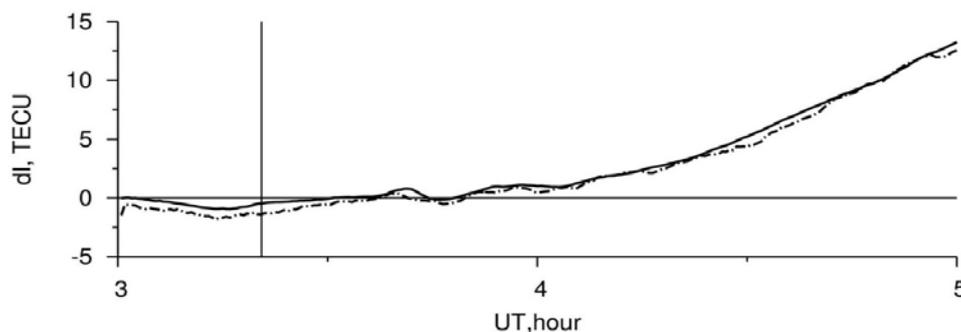


Рис. 6. Сравнение поведение наклонного ПЭС, вычисленного по двухчастотным (сплошная линия) и одночастотным (штрихпунктирная линия) измерениям для пары ARTU – PRN26

136

основной частоте. Поскольку кодовые измерения существенно зашумлены по сравнению с чисто фазовыми (как в двухчастотном режиме), данные одночастотных измерений были подвергнуты предварительной обработке, заключающейся в усреднении, с использованием плавающего среднего с временным интервалом в 7 минут. В результате и для одночастотных измерений были получены временные вариации ПЭС, на котором выявлены аналогичные двухчастотному режиму особенности, связанные с падением метеороида. Типичная ситуация показана на рис. 6. Здесь для пары ARTU – PRN26 представлен временной ход ПЭС в обоих режимах. Сплошной линией показан ход наклонного ПЭС, вычисленного по двухчастотным измерениям, и штрихпунктирной – соответственно по одночастотным измерениям.

Фиксация на временном ходе ПЭС начала отклика ионосферы на событие позволяет оценить среднюю скорость распространения возмущения в верхней атмосфере от точки взрыва до ионосферных высот. Для этого по каждой из рассматриваемых пар станция-спутник рассчитывались соответствующие расстояния до ионосферных точек.

Числовые данные представлены в табл. 2. В ней указаны соответствующие пары станция-спутник, для каждой из которых указано время начала наблюдения эффекта после взрыва в атмос-

фере, расстояние от места взрыва до соответствующей ионосферной точки и скорость реакции.

Таблица 2

Скорость реакции ионосферы на взрыв Челябинского метеороида

Станция	Спутник	Время после взрыва в атмосфере, с	Расстояние от взрыва в атмосфере, км	Скорость реакции, м/с
ARTU	PRN26	927	485	523
NOVM	PRN30	567	430	758
ZECK	PRN26	2367	1749	739

Значения скорости из табл. 2 вполне соответствуют звуковым, что позволяет сделать вывод о том, что первичным агентом передачи возмущения, вероятно, является волна акустической природы.

Проведенные исследования показали, что использование одночастотных приемников сигналов ГНСС позволяет производить диагностику ионосферы, хотя, возможно, и с меньшей точностью, чем при использовании двухчастотных приемников. Полученные результаты показали возможность детектирования таких эффектов, как солнечное затмение, мощные землетрясения и взрывы больших метеороидов.

## Список литературы

1. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск : ГУ НЦ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
2. Горбачев О. А., Иванов В. Б., Холмогоров А. А. Регистрация ионосферного эффекта солнечного затмения 20 марта 2015 г. по данным GPS-мониторинга в одночастотном режиме // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 4. С. 35–39, DOI: 10.12737/12068.
3. Kholmogorov A. A., Ivanov V. B. GPS-Monitoring of the Ionospheric Reaction on Solar Eclipse using Single-Frequency Mode on the Example of Event 20 March 2015 / Proceedings of V International conference ATMOSPHERE, IONOSPHERE, SAFETY, 2016. Kaliningrad, 2016, pp. 161–165.
4. Горбачев О. А., Иванов В. Б., Холмогоров А. А. GPS-регистрация ионосферных эффектов землетрясений в двухчастотном и одночастотном режимах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 5. С. 251–261.
5. Astafyeva E. First ionospheric images of the seismic fault slip on the example of the Tohoku-oki earthquake / E. Astafyeva, P. Lognonne, L. Rolland // Geophysical Research Letters, 2011, vol. 38. L22104, DOI: 10.1029/2011GL049623.

6. Ясюкевич Ю. В., Захаров В. И., Куницин В. Е., Воейков С. В. Отклик ионосферы на землетрясение в Японии 11 марта 2011 г. по данным различных GPS-методик // Геомagnetизм и аэрономия. 2015. Т. 55, № 1. С. 113–122.
7. Kakinami Y. Tsunamigenic ionospheric hole / Y. Kakinami, M. Kamogawa, Y. Tanioka, S. Watanabe, A.R. Gusman, J.-Y. Liu, Y. Watanabe, T. Mogi // Geophysical Research Letters, 2012, vol. 39. L00G27, DOI: 10.1029/2011GL050159.
8. Перевалова Н. П. Исследование ионосферных возмущений, вызванных землетрясением в Японии 11 марта 2011 г., по данным сети GEONET / Н. П. Перевалова, С. В. Воейков, Ю. В. Ясюкевич, А. Б. Ишин, Е. С. Воейкова, В. А. Саныков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 3. С. 172–180.
9. Tolman B. The GPS Toolkit / B. Tolman, R. B. Harris // Linux Journal. September, 2004, p. 72.
10. Harris R. B. GPSTk\_An Open Source GPS Toolkit / R. B. Harris, R. G. Mach // GPS Solutions, March 2007, vol. 11, no. 2, pp. 145–150.
11. Bergardt O. I. Dynamics of vertical ionospheric inhomogeneities over Irkutsk during 06:00–06:20UT 11/03/2011 caused by Tohoku earthquake / O. I. Bergardt, G. V. Kotovich, S. Ya. Mikhailov, A. V. Podlesnyi // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2015, no. 132, pp. 106–115.
12. Zuluaga J. I. A preliminary reconstruction of the orbit of the Chelyabinsk Meteoroid / J. I. Zuluaga, I. Ferrin // <https://arxiv.org/abs/1302.5377>. 2013
13. Бернгардт О. И. Ионосферные эффекты в первые два часа после падения метеорита «Челябинск» / О. И. Бернгардт, В. И. Куркин, Г. А. Жеребцов, О. А. Кусонский, С. А. Григорьева // Солнечно-земная физика. 2013. Вып. 24. С. 3–14.
14. Гивишвили Г. В. Ионосферные эффекты, стимулированные Челябинским метеоритом / Г. В. Гивишвили, Л. Н. Лещенко, В. В. Алпатов, С. А. Григорьева, С. В. Журавлев, В. Д. Кузнецов, О. А. Кусонский, В. Б. Лапшин, М. В. Рыбаков // Астрономический вестник. 2013. Т. 47, № 4. С. 304–311.
15. Тертышников А. В. Региональные возмущения ионосферы и ошибки позиционирования наземного навигационного приемника при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г. / А. В. Тертышников, В. В. Алпатов, Я. В. Глухов, Д. В. Давиденко // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 5. С. 65–73.

*История статьи*

*Поступила в редакцию 1 августа 2017 г.*

*Принята к публикации 4 сентября 2017 г.*

## ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING SINGLE-FREQUENCY GNSS RECEIVERS FOR MONITORING OF THE IONOSPHERE

**<sup>1</sup>V. B. Ivanov, <sup>1</sup>A. A. Kholmogorov, <sup>2</sup>O. A. Gorbachev**

*<sup>1</sup>Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation*

*<sup>2</sup>Irkutsk Branch of the Moscow Civil Technical University of Civil Aviation, Irkutsk, Russian Federation*

*This paper is devoted to the investigation of the capabilities of single-frequency receivers for recording irregular events in the ionosphere. Research was conducted on the example of the following events: solar eclipse on 20 March 2015, powerful earthquakes in Chile on 27 February 2010 and in Japan on 11 March 2011, as well as the explosion of the Chelyabinsk meteoroid on 15 February 2016. Compared the total electron content between the satellite and the receiver for undisturbed days with the perturbation days for search of various deviations in the behavior of it. As a result, it was found that single-frequency receivers allow observing such effects as: smooth decrease, sharp break at the daily total electron content, as well as wave structures on the receiver-satellite path. The obtained results were compared with the data of two-frequency GNSS receivers, both with more accurate and widely proven for ionosphere diagnostics. The data of two-frequency diagnostics do not qualitatively differ from single-frequency diagnostics, however they are more accurate due to various algorithms of total electron content restoration. The main result of the work, in addition to the data of the ionosphere diagnostics, is the conclusion about the applicability of single-frequency receivers for ionosphere diagnostics.*

*Keywords: ionosphere, monitoring, single-frequency measurements, GPS.*

## References

1. Afraimovich E. L., Perevalova N. P. *GPS-monitoring verkhnei atmosfery Zemli* [GPS-monitoring of the upper atmosphere of the Earth]. Irkutsk, 2006, 480 p. (In Russian)
2. Kholmogorov A. A., Ivanov V. B., Kholmogorov A. A. *Registratsiya ionosfernogo effekta solnechnogo zatmeniya 20 marta 2015 g. po dannym GPS-monitoringa v odnochastotnom rezhime* [Registration of the ionospheric effect of 20 marta 2015 g. po dannym GPS-monitoringa v odnochastotnom rezhime]

- the solar eclipse on March 20, 2015 based on GPS monitoring in single-frequency mode]. *Solnechno-zemnayafizika*, 2015, vol. 1, no. 4, pp. 35-39, DOI: 10.12737/12068. (In Russian)
3. Kholmogorov A. A., Ivanov V. B. GPS-Monitoring of the Ionospheric Reaction on Solar Eclipse using Single-Frequency Mode on the Example of Event 20 March 2015. Proceedings of V International conference ATMOSPHERE, IONOSPHERE, SAFETY. 2016, pp. 161–165.
  4. Gorbachev O. A., Ivanov V. B., Kholmogorov A. A. *GPS-registratsiya ionosfernykh effektov zemletryaseni v dvukh-chastotnom i odnochastotnom rezhimakh* [GPS-registration of ionospheric effects of earthquakes in two-frequency and single-frequency modes]. *Sovremennye problem distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, vol. 13, no. 5, pp. 251–261 (In Russian)
  5. Astafyeva E., Lognonne P., Rolland L. First ionospheric images of the seismic fault slip on the example of the Tohoku-oki earthquake. *Geophysical Research Letters*, 2011, vol. 38, L22104, DOI: 10.1029/2011GL049623
  6. Yasyukevich Yu. V., Zakharov V. I., Kunitsin V. E., Voeikov S. V. *Otklik ionosfery na zemletryasenie v Yaponii 11 marta 2011 g. po dannym razlichnykh GPS-metodik* [The response of the ionosphere to the earthquake in Japan on March 11, 2011, according to various GPS techniques]. *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2015, vol. 55, no.1, pp. 113–122. (In Russian)
  7. Kakinami Y., Kamogawa M., Tanioka Y., Watanabe S., Gusman A.R., Liu J.-Y., Watanabe Y., Mogi T. Tsunamigenic ionospheric hole. *Geophysical Research Letters*, 2012, vol. 39, L00G27, DOI: 10.1029/2011GL050159
  8. Perevalova N. P., Voeikov S. V., Yasyukevich Yu. V., Ishin A. B., Voeikova E. S., San'kov V. A. *Issledovanie ionosfernykh vozmushchenii, vyzvannykh zemletryaseniem v Yaponii 11 marta 2011 g., po dannym seti GEONET* [The study of ionospheric disturbances caused by the earthquake in Japan on March 11, 2011, according to the GEONET network]. *Sovremennye problem distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, vol. 9, no. 3, pp. 172–180. (In Russian)
  9. Tolman B., Harris R. B. The GPS Toolkit. *Linux Journal*. September, 2004, p. 72.
  10. Harris R. B., Mach R. G. GPSTk\_An Open Source GPS Toolkit. *GPS Solutions*, March 2007, vol. 11, no. 2, pp. 145–150.
  11. Bergardt O. I., Kotovich G. V., Mikhailov S. Ya., Podlesnyi A. V. Dynamics of vertical ionospheric inhomogeneities over Irkutsk during 06:00–06:20UT 11/03/2011 caused by Tohoku earthquake. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2015, no. 132, pp. 106–115.
  12. Zuluaga J. I., Ferrin I. A preliminary reconstruction of the orbit of the Chelyabinsk Meteoroid. Available at: <https://arxiv.org/abs/1302.5377>
  13. Bergardt O. I., Kurkin V. I., Zherebtsov G. A., Kusonskii O. A., Grigor'eva S. A. *Ionosfernyeeffekty v pervye dva chasa posle padeniya meteorita «Chelyabinsk»* [Ionospheric effects in the first two hours after the fall of the meteorite «Chelyabinsk»]. *Solnechno-zemnayafizika*. 2013, no. 24, pp. 3–14. (In Russian)
  14. Givishvili G. V., Leshchenko L. N., Alpatov V. V., Grigor'eva S. A., Zhuravlev S. V., Kuznetsov V. D., Kusonskii O. A., Lapshin V. B., Rybakov M. V. *Ionosfernye efekty stimulirovannye Chelyabinskim meteoritom* [Ionospheric effects stimulated by the Chelyabinsk meteorite]. *Astronomicheskii vestnik*, 2013, vol. 47, no. 4, pp. 304–311. (In Russian)
  15. Tertshnikov A. V., Alpatov V. V., Glukhov Ya. V., Davidenko D. V. *Regional'nye vozmushcheniya ionosfery i oshibki pozitsionirovaniya nazemnogo navigatsionnogo priemnika pri vzryve Chelyabinskogo (Chebarkul'skogo) meteoroida 15.02.2013 g.* [Regional perturbations of the ionosphere and errors in positioning of the ground navigation receiver during the explosion of the Chelyabinsk (Chebarkul) meteoroid February 15, 2013]. *Geliogeofizicheskie issledovaniya*. 2013, no. 5, pp. 65–73. (In Russian)

**Article history**

Received 1 August 2017

Accepted 4 September 2017

## МЕТОДЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ БОРЬБЫ В ОБЛАСТИ КОСМИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**Р. Б. Ковалёв**

*АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М. Ф. Решетнёва»,  
г. Железнодорожск, Красноярский край, Российская Федерация*

Основным элементом содержания радиоэлектронной борьбы является нарушение радиобмена между радиоэлектронными средствами передачи информации путем постановки помех и фальшицелей. Вплоть до начала Второй мировой войны оно осуществлялось в отдельных средствах с помощью маскирующих помех. Для борьбы с первыми радиоэлектронными средствами извлечения информации (радиолокационными станциями) были разработаны эффективные приемы постановки пассивных помех, имитирующие реальные объекты и способствующие навязыванию противнику ложной информации. С развитием и совершенствованием средств радиоэлектронной борьбы открылись перспективы воздействия на радиоэлектронные средства дезинформирующими активными помехами, и даже если удастся отфильтровать истинную информацию от ложной, наличие последней иногда значительно осложняет оценку обстановки в ходе боевых действий. Кроме того, воздействие на современную радиоэлектронную систему, имеющую в своем составе ЭВМ, может осуществляться внедрением по радиоканалу правдоподобных информационных сообщений, содержащих компьютерные вирусы, которые проникают по сети ЭВМ, вплоть до высших органов управления войсками и оружием. Наряду с этим массированное применение средств постановки помех в локальном районе приводит к изолированию таких радиоэлектронных средств от других. Наконец, современные средства радиоэлектронной борьбы, используя не только маскирующие, но и искажающие, дезинформирующие, блокирующие помехи, позволяют дезорганизовать функционирование радиоэлектронных средств в глобальном масштабе, а реализация организационно-технических мероприятий по постановке различных помех способствует нарушению функционирования как локальных группировок радиоэлектронных средств, так и крупномасштабных радиоэлектронных систем.

*Ключевые слова:* помеха, приемник, орбита, защита, радионавигационный сигнал, мощность, навигационная аппаратура, радиоэлектронная борьба.

По мере все более широкого применения навигационной аппаратуры потребителей (НАП) различного назначения к ней растут требования по обеспечению высокой надежности и помехозащищенности, в том числе защиты как от мощных маскирующих помех (МП), так и от ложных имитационных помех (ИП), подобных реальным навигационным сигналам (НС).

Помехи создают на входе НАП фон, который затрудняет обнаружение радионавигационных сигналов орбитальной группировки и оценивание их параметров. Задача имитирующих помех другая – они должны заменить истинные, излученные спутником НС, ложными так, чтобы обнаружитель системы слежения и определения

координат приемника не заметил подмены. Цель такой имитации – дезинформация противника относительно истинного местоположения. Простая дезинформация приводит к тому, что истинное местоположение заменяется некоторым случайным местоположением. Более амбициозная задача – управлять противником путем специального задания ему ложного маршрута [4].

Очевидны преимущества имитационных помех:

1. При воздействии ИП противник вообще не подозревает о том, что подвергся нападению, и, следовательно, не предпринимает ответных действий. В отличие от этого при выявлении МП у него есть возможность прибегнуть к целому ряду защитных действий:

- отказаться от навигации по глобальным спутниковым навигационным системам и исполь-

зовать автономные навигационные системы, такие как инерциальная навигационная система или магнитный компас;

- осуществлять подавление широкополосных МП с помощью адаптивной антенной решетки (ААР), узкополосных МП на основе алгоритмов спектральной режекции, импульсных МП – временной режекцией;
  - принять организационные меры по физическому уничтожению источников помех.
2. Мощность принимаемой ИП принципиально должна не слишком отличаться от мощности принимаемого навигационного сигнала  $S$ , т.е. отношение помеха/сигнал  $J/S \approx 0...20$  дБ. Для МП это отношение должно составлять  $J/S \approx 50...60$  дБ, а для НАП с ААР еще больше:  $J/S > 90$  дБ. Следовательно, энергетический выигрыш ИП относительно МП огромен и составляет 30...60 дБ или 70...90 дБ для НАП с ААР.
3. Основным средством защиты от помех в НАП является ААР, которая осуществляет подавление помех, мощность которых превышает уровень внутренних шумов приемника. Так как мощность ИП сопоставима с мощностью реального сигнала (уровень шумов), то ИП проходит через ААР без ослабления.

Преимущества ИП относительно МП, приведенные выше, столь значительны, что вызывают постоянный интерес к возможностям и методам создания и применения ИП. Пристальное внимание к ИП особенно обострилось в последнее время (2010–2012 годы) в связи с целой серией публикаций в отечественной и зарубежной прессе, напрямую посвященных применению ИП.

Сегодня технология спутникового координатно-временного обеспечения по средствам навигационных систем ГЛОНАСС/GPS востребована не только для объектов на поверхности Земли и в околоземном пространстве, но и для космических аппаратов, находящихся на орбитах выше, чем орбиты навигационных КА (НКА), т.е. геостационарных и высокоэллиптических (ГСО и ВЭО). Наличие соответствующих навигационных приемников на борту этих КА значительно упрощает определение их местонахождения (рис. 1) [1]. Так же как и любая другая НАП, космическая НАП может быть подвержена воздействию комплексами противоспутниковой радиоэлектронной борьбы, в том числе и ИП.

КА, находящиеся на круговых орбитах с высотами ниже 20 тыс. км (высота орбит НКА), являются более защищенными от ИП, так как их приемные антенны расположены в верхней части КА и для наведения помехи требуются другие КА, летящие над ними, что крайне сложно и дорого для реализации [5]. Приемные антенны КА, находящегося на ГСО, направлены на Землю, так

как улавливают сигналы от НКА перед их заходом и выходом из-за Земли (рис. 1 [1]). Это значит, что бортовая НАП такого КА легко подвергается наведению ложного сигнала с поверхности Земли (рис. 2). В этом случае соответствующий наземный комплекс с имитационной аппаратурой постановки индивидуальной ИП для конкретного объекта с известными координатами может полностью дезориентировать КА и «увести» его из своей рабочей точки стояния с заданными координатами.

Существуют так называемые «простые» методы выявления в НАП ложных НС, которые относительно просто реализуются в современных приемниках и должны учитываться при их создании:

- слежение за абсолютной мощностью каждой несущей частоты НС;
- слежение за скоростью изменения мощности сигнала;
- слежение за относительными мощностями принимаемого сигнала;
- сравнение скоростей динамики кода и фазы;
- проверка целостности полученных данных.

Все эти методы считаются простыми в силу их давнего применения в наземной и околоземной аппаратуре потребителя НС и широкой известности. Однако необходимо учитывать существенное усложнение как самой НАП, так и их программно-математического обеспечения при использовании этих методов.

Кроме указанных способов защиты можно предложить реализуемые уже сегодня относительно более сложные способы различения сигналов НКА и ИП, использующие их пространственные отличия. Они предполагают наличие вместо одной приемной антенны нескольких разнесенных в пространстве. Разнесенные в пространстве антенны позволяют определить углы между осями объекта (условно проведенная прямая через две приемные навигационные антенны) и векторами направления сигнала за счет измерения разности фаз несущего сигнала [2, 3].

Таким образом, проанализировав полученную навигационную информацию о положении НКА (альманах) и вектор прихода сигнала, можно различить сигналы, приходящие от НКА, обусловленные различием их направлений, и от постановщика помех с равным направлением прихода всех сигналов  $\varphi_1^* = \varphi_2^* = \varphi_3^*$  (рис. 2). Единственный способ формирования пространственной радиоволны, подобной радиоволне навигационного сигнала, – это расположение постановщиков ИП на линии визирования от НАП к НКА, причем для имитируемого сигнала от одного НКА требуется свой постановщик ИП. Этот способ довольно сложен в реализации для малоподвижных наземных и околоземных по-

НКА – навигационные спутники;  
 КА – геостационарный спутник;  
 НП – навигационное поле;  
 $R \approx 6378$  км – радиус Земли;  
 $h \approx 20000$  км – высота орбиты НКА  
 ГЛОНАСС/GPS;  
 $H \approx 40000$  км – высота орбиты  
 геостационарного спутника;  
 $h_n \approx 5000$  км – высота единого  
 навигационного поля ГНСС

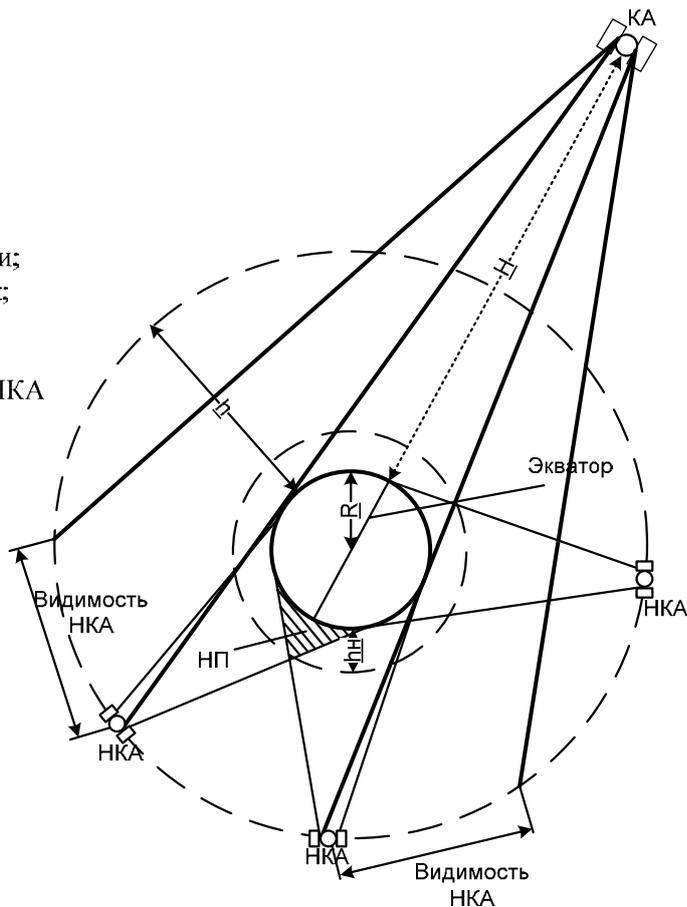


Рис. 1. Зоны видимостей местонахождения КА

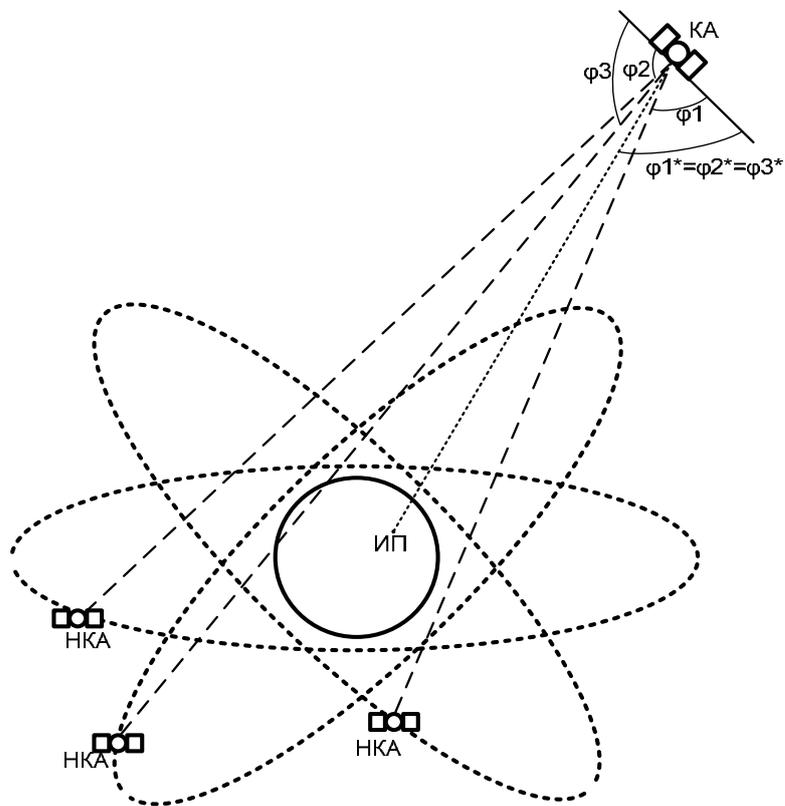


Рис. 2. Позиционирование КА

требителей НС и практически невозможен для КА на ГСО.

Наличие нескольких антенных элементов и возможность определения вектора прихода НС позволяют НАП решать не только навигационные, но и угломерные задачи. То есть становится возможным определять не только координаты, но и пространственное положение объекта относительно навигационных систем ГЛОНАСС/GPS.

Исходя из вышесказанного следует, что внедрение навигационной аппаратуры с разнесенными в пространстве антеннами на борт КА, находящегося на ГСО, позволяет без значительного удорожания и увеличения массогабаритных характеристик бортовой аппаратуры решить проблему помехозащищенности бортовой НАП за счет выявления и исключения ложных НС, а также дополнительно повысить точность пространственной ориентации КА.

## Список литературы

1. Двухсистемный навигационный приемник космического аппарата. Пат. №112401 Российская Федерация / В. А. Зубавичус, А. З. Балабанов, В. А. Комаров [и др.]. № 2011121496/28, заявл. 27.05.2011 ; опубл. 10.01.2012, Бюл. №1.
2. Пичкалев А. В., Кочев Ю. В., Гребенников А. В. Радиоугломерная аппаратура для задач ориентации и стабилизации // Тезисы докладов 2-й Международной научно-технической конференции, посвященной 30-летию запуска на орбиту первого навигационного космического аппарата «Глонасс» (10–14 октября 2012 г., Железногорск) / под общ. ред. Н. А. Тестоедова ; ОАО «Информационные спутниковые системы». Сибирский государственный аэрокосмический ун-т. Красноярск, 2012. С. 142–144.
3. Харисов В. Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. В. Н. Харисова [и др.]. М. : Радиотехника, 2010. 800 с.
4. ГЛОНАСС и защищённость GPS [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dxdt.ru/2009/10/14/2721/>.
5. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В. С. Шешаевич, П. П. Дмитриев, Н. В. Иванцев [и др.] ; под ред. В. С. Шешаевича. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Радио и связь, 1993. 408 с.

*История статьи*

*Поступила в редакцию 14 июля 2017 г.*

*Принята к публикации 4 сентября 2017 г.*

## METHODS OF ELECTRONIC WARFARE IN SPACE NAVIGATION AND PROTECTION OF SPACECRAFTS

**R. B. Kovalyov**

*JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems,  
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation*

*The main element of the electronic warfare content is the radio traffic blackout between the radioelectronic means by means of jamming countermeasures and false targets. It was carried out in separate radioelectronic means of information transmission through masking jamming up to the beginning of the Second World War. Against to the first radioelectronic means of information retrieval (by radar stations) were developed effective methods of passive jamming which simulating real objects and facilitating of false information to the opposition. With the development and improvement of electronic warfare devices were opened the prospects of impact on radioelectronic means by deception active jamming and even if it is possible to filter out true information from false information the presence of the false information sometimes significantly complicates the assessment of the situation during the military operation. In addition, the impact on the modern radioelectronic system which includes a computer can be implemented through the radio channel of plausible information messages containing computer viruses that penetrate to the computer network up to the highest army and weapon controls. Along with this the saturation of jamming countermeasures means in a local area leads to the isolation of such radioelectronic means from others. Finally, modern electronic warfare devices which using not only masking but also distorting, deception and blocking jamming they allow the disorganization of the radioelectronic means operation on a global scale, and the implementation of organizational and technical measures to establish various jamming contributes to the disruption of the functioning not only local groups radioelectronic means but also large-scale radioelectronic systems.*

*Keywords: jamming, receiver, orbit, protection, radio navigation signal, power, navigation equipment, electronic warfare.*

## References

1. Zubavichus V. A., Balabanov A. Z., Komarov V. A., Marareskul D. I., Furmanov V. V., Tsvetkova O. I., Yudin V. A., Ankudinov A. V. *Dvuhsistemnyj navigacionnyj priemnik kosmicheskogo apparata* [Two-system navigation receiver of the spacecraft]. Patent RF, no. 112401, 2012.
2. Pichkalev A. V., Kochev Yu. V., Grebennikov A. V. *Radioglomernaya apparatura dlya zadach orientacii i stabilizacii* [Radioglobelic apparatus for orientation and stabilization problems]. *Tezisy dokladov 2-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, posvyashchennoj 30-letiyu zapuska na orbitu pervogo navigacionnogo kosmicheskogo apparata "Glonass"* [Abstracts of the 2nd International Scientific and Technical Conference dedicated to the 30th anniversary of the launch of the first navigation spacecraft "Glonass"]. Siberian State Aerospace University, Krasnoyarsk, 2012, pp. 142–144.
3. Kharisov V. N., Perov A. I., Boldin V. A. *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya*. [GLONASS. Construction principles and operation]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010, 800 p. (In Russian)
4. GLONASS and GPS security. Available at: <https://dxdt.ru/2009/10/14/2721/> (accessed 09.07.2017).
5. Shebshaevich V. S., Dmitriev P. P., Ivantsevich N. V., Kalugin A. V., Kovalevsky E. G., Kudryavtsev I. V., Kutikov V. Yu., Molchanov Yu. B., Maksyutenko Yu. A. *Setevye sputnikovye radionavigacionnye sistemy* [Network satellite radio navigation systems]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1993, 408 p. (In Russian)

*Article history*

*Received 14 July 2017*

*Accepted 4 September 2017*

## ПРИМЕНЕНИЕ СПОСОБА БЕСКОНТАКТНОЙ ПАЙКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОНАДЕЖНЫХ ПРЕЦИЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ УСТРОЙСТВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**Н. В. Луконин<sup>1</sup>, О. А. Белов<sup>1</sup>, Д. М. Доронкин<sup>1</sup>,  
А. Н. Коробкин<sup>1</sup>, И. Я. Шестаков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М. Ф. Решетнёва»,  
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий  
им. академика М. Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Российская Федерация

*В статье рассматривается применение способа бесконтактной пайки для создания высоконадежных прецизионных соединений антенно-фидерных устройств космических аппаратов негерметичного исполнения с увеличенными сроками активного существования. Переход к разработке и использованию приемопередающих устройств, работающих в сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн для связи космических аппаратов с Землей, позволяет существенно снизить массо-габаритные показатели антенно-фидерных систем за счет уменьшения геометрических размеров составных частей антенно-фидерных систем – антенно-фидерных устройств: антенн, фильтров, волноводов, переходов, делителей, соединений и др. при сохранении требуемых радиотехнических и эксплуатационных характеристик.*

*В связи с уменьшением размеров антенно-фидерных систем космических аппаратов нового поколения требуется создание малогабаритных антенно-фидерных устройств с повышенной точностью конструктивно-технологического исполнения, высоконадежными паяными соединениями, но предъявляет дополнительные требования к конструкции и технологии сборки, точности совмещения деталей между собой, получению высоконадежных, в том числе и прецизионных паяных, соединений с длительными сроками использования в условиях воздействия факторов открытого космоса.*

*Использование традиционных контактных способов пайки для соединения деталей в таких антенно-фидерных устройствах и обеспечение задаваемых радиотехнических характеристик затруднительно или невозможно. Применение нового способа позволяет исключить контакт паяемых деталей и паяльных материалов с устройством нагрева, улучшить прочностные характеристики паяного шва, улучшить технологичность сборки, улучшить точность соединения деталей.*

*Ключевые слова: космический аппарат, антенно-фидерные устройства, пайка, температурный режим.*

Разработка и использование приемопередающих устройств, работающих в сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн, для связи космического аппарата (КА) с Землей позволяет существенно снизить массо-габаритные показатели антенно-фидерных систем (АФС), обеспечить использование КА по целевому назначению с требуемыми радиотехническими характеристиками (РТХ). Миниатюризация АФС КА предъявляет повышенные требования к конструкции и техно-

логии сборки составных частей АФС антенно-фидерных устройств (АФУ): антенн, фильтров, волноводов, переходов, соединений и др., точности совмещения деталей между собой, требует создания высоконадежных, в том числе и прецизионных паяных, соединений с длительными сроками использования в условиях воздействия факторов открытого космического пространства.

Соединение крупных деталей АФУ между собой пайкой паяльником с использованием твердых припоев является широко распространенным и технологичным способом, детали требуют предварительного облуживания, при этом нагрев зоны пайки осуществляется контактным спосо-

бом путем передачи тепла от нагретого выше ликвидуса припоя до температуры от плюс 75 °С до плюс 125 °С жала паяльника к паяемым деталям и паяльным материалам до момента расплавления припоя [1]. С уменьшением размеров паяемых деталей пайка может стать трудноуправляемым процессом, применение типовых технологических процессов пайки затруднительным, снижается повторяемость и технологичность выполнения операций, обеспечивать задаваемые РТХ АФУ становится труднее, изменение зазоров между деталями при контактировании с нагретым жалом паяльника требует выполнения подстройки РТХ, а в некоторых случаях и выполнения распайки деталей с повторной пайкой, при соединении деталей сложной формы возникают проблемы.

Образование паяного соединения происходит в результате развития ряда процессов: теплового воздействия пайки на паяемый металл Мк, физико-химического взаимодействия Мк с припоем Мп и вспомогательными материалами Мвсп; термического и химического взаимодействия Мк, Мп, Мвсп с окружающей газовой средой и материалом оснастки и др. Вышеперечисленные процессы влияют на свойства и качество паяных соединений и изделий. На протекание этих процессов оказывают существенное воздействие конструкция изделия и паяных соединений, масштабный фактор и масса изделий, а также особенности нагревательного оборудования и инструмента, режим и термический цикл пайки. Поэтому выбор оптимальной технологии пайки изделия весьма непрост и требует учета влияния всех этих факторов [2].

При пайке образуются интерметаллические соединения, располагающиеся тонкими прослойками между покрытием и припоем и являющиеся соединяющей их фазой. Эти соединения обладают повышенной хрупкостью, поэтому разрушение происходит по слою интерметаллидов. Толщина и конфигурация интерметаллидных прослоек зависят от температуры и продолжительности взаимодействия жидкой и твердой фаз, скорости последующего охлаждения. Экспериментальным путем установлено, что максимальное значение прочности соединений достигается, если ширина диффузионной зоны соответствует 0,9–1,1 мкм, при этом в процессе лужения уже начинает формироваться диффузионная зона, которая затем во время пайки продолжает расти. Поэтому при определении общей продолжительности процесса пайки рекомендуется учитывать и время предварительного лужения припоем [3]. Желательно вообще отказаться от операции предварительного лужения поверхностей, подлежащих пайке.

Выделение интерметаллидов происходит вдоль межфазных границ и носит диффузионный характер. Их влияние на прочностные свойства

паяных соединений становится существенным при толщине прослойки более 1 мкм [2]. В зависимости от температуры пайки в интервале от плюс 200 °С до плюс 250 °С скорость растворения металлов, например в припое ПОС 61, возрастает (рис. 1).

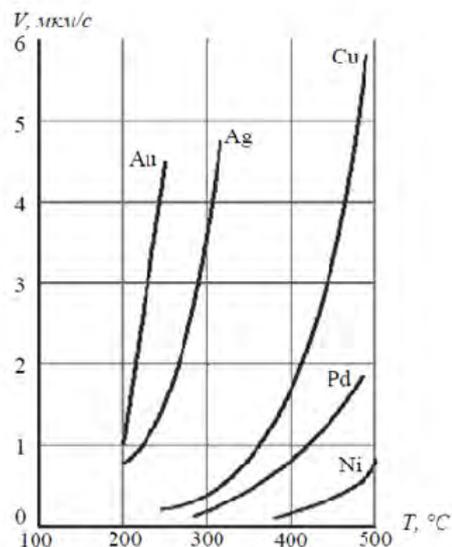


Рис. 1. Зависимость скорости растворения металлов от температуры в припое ПОС 61

В 2013–2016 годах в АО «ИСС» в рамках опытно-конструкторских работ (ОКР) при создании перспективных КА негерметичного исполнения при проведении наземной экспериментальной отработки (НЭО) АФУ было принято решение о разработке нового способа пайки, лишенного указанных недостатков, с использованием низкотемпературных паяльных паст, которые содержат в своем составе слабоактивированные некоррозионные флюсы, исключающего контакт паяемых деталей и паяльных материалов с устройством нагрева, улучшающего прочностные характеристики паяного шва за счет уменьшения количества интерметаллических соединений путем снижения температуры и времени пайки, исключающего лужение, улучшающего точность соединения деталей, за счет исключения механического воздействия на детали при пайке и проведении отработки нового способа в рамках программы экспериментальной отработки технологии.

Для решения задачи разработан способ [4], позволяющий выполнить бесконтактный двухступенчатый нагрев зоны пайки термовоздушным способом без применения паяльника, без предварительного облуживания поверхностей сопрягаемых деталей. Процесс пайки осуществляется в три этапа, на первом на паяемые детали в необходимом количестве наносится паяльная паста, содержащая шарики припоя (припой) и флюсую-

Таблица 1

Состав, свойства, температуры плавления и пайки паяльных паст [5]

Марка припойной пасты	Состав припоя, %	Температура плавления, °С	Температура нагрева первого этапа, °С	Температура нагрева второго этапа, °С
7070	Sn50/Pb32/Cd18	142–145	110	165
7020	Sn62/Pb36/Ag2	179	110	205
ППК-62-3-90А	Sn62/Pb36/Ag2	179	120	205
ППК-62-4-90А	Sn62/Pb36/Ag2	179	120	205

Таблица 2

Ускоренные климатические испытания

Вид воздействующего фактора	Характеристика воздействующего фактора	Значения	Количество циклов
Влажность	Относительная влажность, %	95 (±3)	9
	Температура, °С	+30 (±5)	
	Время выдержки, сут.	3	

Таблица 3

Режим ТЦ в вакууме для образцов с пастой ППК-62

Диапазон температур, °С	Скорость изменения температуры, °С/мин, не более	Выдержка на максимальных температурах, мин	Количество циклов	Среда
От –160 до +160	5÷10	30	100	Вакуум не менее $6,7 \cdot 10^3$ Па

Таблица 4

Режим ТЦ в вакууме для образцов с пастой 7070

Диапазон температур, °С	Скорость изменения температуры, °С/мин, не более	Выдержка на максимальных температурах, мин.	Количество циклов	Среда
От –130 до +130	5÷10	30	100	Вакуум не менее $6,7 \cdot 10^3$ Па

ший состав (флюс), зона пайки нагревается бесконтактным термовоздушным способом до температуры, при которой флюс не активируется, а припой не расплавляется, на втором этапе зона пайки нагревается бесконтактным термовоздушным способом до температуры, при которой сначала активируется флюс, снимая окислы в зоне пайки, предохраняя паяемые поверхности от окисления, затем расплавляется припой, заполняя паяльный зазор, на третьем этапе осуществляется охлаждение паяемых деталей с образованием паяного шва. В качестве паяльных паст целесообразно использовать пасты на основе эвтектических низкотемпературных сплавов с флюсующей составляющей, не оказывающей коррозионного воздействия на металлы и металлопокрытия. В табл. 1 приведены физико-химические свойства и технологические режимы применения некоторых паяльных паст.

Применение паяльных паст потребовало:

- проведения ускоренных климатических испытаний (УКИ) образцов на воздействие факторов длительного хранения на общий гарантийный срок не менее 24 лет, табл. 2;

- термоциклирования (ТЦ) в вакууме на определение рабочего диапазона температур припойных паст;
- определения механических характеристик при различных температурах.

ТЦ в вакууме образцов паяных соединений проводилось по режиму, приведённому в табл. 3 и 4.

Определение предела прочности паяных соединений проводилось после УКИ и ТЦ при различных температурах, представленных в табл. 5.

Таблица 5

Температуры при определении предела прочности

Обозначение	Температура испытания, °С
ЭР.1440-640-10	+20
	+70
	+150
ЭР.1440-640-30	+20
	+70
	+120

Таблица 6

Результаты испытаний по определению предела прочности образцов  
ЭР.1440-640-10 и ЭР.1440-640-30 после проведения УКИ и ТЦ

Используемая припойная паста	Условное обозначение паяного соединения, №	Температура испытания, °С	Предел прочности, кгс/мм <sup>2</sup>	Разрушающая нагрузка, кгс	Среднее значение предела прочности, кгс/мм <sup>2</sup>
ППК-62	31	+20	2,2	495,5	2,16
	32		2,2	503,04	
	33		2,3	513,06	
	34		1,8	414,32	
	35		2,3	524,18	
	36	+70	2,0	456,32	1,96
	37		2,0	447,39	
	38		1,9	438,97	
	39		2,0	455,53	
	40		1,9	451,3	
	41	+150	1,3	296,22	1,34
	42		1,3	317,01	
	43		1,3	295,19	
	44		1,4	318,32	
	45		1,4	320,4	
7070	31	+20	—*	505	1,16
	32		—*	413	
	33		—*	384	
	34		—*	408	
	35		1,16	260	
	36	+70	—*	465	—
	37		—*	461	
	38		—*	434	
	39		—*	408	
	40		—*	430	
	41	+120	—*	328	—
	42		—*	287	
	43		—*	356	
	44		—*	327	
	45		—*	322	

\*При определении предела прочности часть образцов разрушились по основному материалу.

Контроль внешнего вида паяных швов проводился визуальным осмотром невооруженным глазом на наличие коррозии на образцах до начала испытаний, после каждого вида испытания и на разрушенных образцах на соответствие ОСТ92-1190 [1]. На рис. 2 показан внешний вид разрушенных образцов после УКИ и ТЦ.

Припойная паста ППК-62 в составе паяных соединений прошла квалификационные испытания на общий гарантийный срок хранения 24 года и диапазон рабочей температуры  $\pm 150$  °С.

Припойная паста 7070 в составе паяных соединений прошла квалификационные испытания на общий гарантийный срок хранения 24 года и диапазон рабочей температуры  $\pm 120$  °С.

Температурный режим выбирается в соответствии с требуемым температурным профилем

оплавления паяльной пасты с учетом рекомендаций [2]. Применение двухступенчатого нагрева зоны пайки позволяет снизить температуру пайки до значений от плюс 25 °С выше ликвидуса паяльной пасты (припоя), что в абсолютных значениях температуры может не превышать плюс 205 °С, а в некоторых случаях не более плюс 165 °С, при этом достигается оптимальная ширина диффузионной зоны и наилучшие физико-механические свойства паяного соединения. В качестве устройств нагрева можно применять термовоздушные паяльные системы с требуемым диапазоном температур и формой сопел, соответствующих формам и размерам паемых деталей.

Отработка экспериментальной технологии выполнялась при изготовлении фильтра нижних частот (ФНЧ) коаксиального типа (рис. 3).



Рис. 2. Разрушенные образцы после УКИ и ТЦ

Паяемые детали из состава ФНЧ проводник и шайбы представлены на рис. 4.

При определении дозы паяльной пасты, наносимой на первом этапе для формирования паяльного шва необходимого объема и образования галтели заданной формы, следует учитывать уменьшение объема паяльной пасты после оплавления из расчета уменьшения от 10 до 30 % в зависимости от типа паяльной пасты. В качестве устройства дозирования можно применять пневматические или шнековые дозаторы с насадками необходимого диаметра или формы.

После изготовления ФНЧ для подтверждения надежности и долговечности паяных соединений была выполнена квалификация нового способа пайки путем проведения специспытаний, имитирующих воздействия на ФНЧ в составе АФС КА этапа выведения и эксплуатации КА на целевой орбите. В качестве подтверждения был применен метод оценки изменения РТХ после испытаний на воздействие широкополосной вибрации, синусоидальной вибрации, механических ударов однократного действия, термоциклирования при эксплуатационных температурах от минус 70 °С до плюс 95 °С.

В процессе и по завершении специспытаний РТХ ФНЧ остались в заданных пределах. Внешний осмотр паяных соединений с использованием оптических устройств повышенной кратности, рентгеновского контроля после разборки ФНЧ подтвердил отсутствие дефектов в паяных



Рис. 3. Внешний вид ФНЧ



Рис. 4. Паяемые детали проводник, шайбы

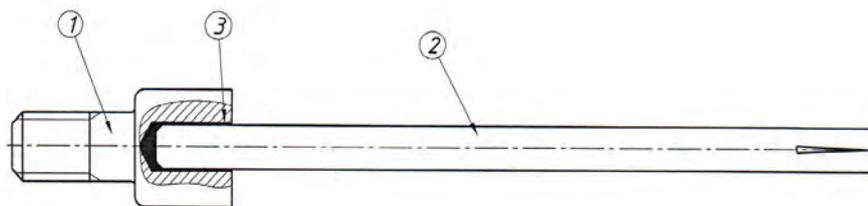


Рис. 5. Втулка – 1, цанга – 2, паяльная паста – 3

соединениях, что говорит о надежности нового способа и позволяет осуществлять гарантированную эксплуатацию ФНЧ в составе АФС по целевому назначению не менее 15 лет.

Применение бесконтактной пайки для соединения деталей, являющихся замыкающим звеном размерных цепей, позволяет отказаться от высоких классов посадочных поверхностей деталей. Пример выполнения пайки втулки и цанги из состава разветвителя 3/3 в недоступном для контактного способа пайки месте приведен на рис. 5. Отклонение от номинального положения деталей втулка и цанга (соосность деталей) не более 0,02 радиуса.

Применение бесконтактного способа пайки обеспечивает высоконадежное соединение деталей антенно-фидерных устройств различных геометрических форм и размеров, в том числе выполнение паяных соединений в труднодоступных или недоступных для контактных видов пайки местах, что позволяет реализовывать различные конструкции антенно-фидерных устройств с высокой размерной точностью, оптимальной технологией изготовления. Процесс пайки может быть дополнительно автоматизирован с использованием устройств, позволяющих устанавливать заданный

Таблица 7  
Сравнительные замеры РТХ двух образцов ФНЧ до и после испытаний

Наименование параметра	Значение параметра фактическое			
	ФНЧ № 1		ФНЧ № 2	
	после изготовления	после испытаний	после изготовления	после испытаний
КСВ, относит. ед., не более	1,2	1,22	1,24	1,24
Затухание, дБ, не более	0,16	0,04	0,18	0,05
Затухание, дБ, не менее	86,2	87,9	88,1	86,5

термопрофиль оплавления паяльной пасты с требуемой точностью.

Способ может быть использован в других областях техники, где изготавливают и применяют антенно-фидерные устройства с повышенными требованиями к радиотехническим характеристикам, прочности, сроку использования (эксплуатации), высокой повторяемости параметров, точности и технологичности сборки.

## Список литературы

1. ОСТ 92-1190-88. Соединения паяные металлические и керамические. Типовые технологические процессы.
2. Лашко С. В., Лашко Н. Ф. Пайка металлов. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.
3. Аллас А. А. Лазерная пайка в производстве радиоэлектронной аппаратуры. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. 134 с.
4. Заявка 2016141223 Российская Федерация. Способ бесконтактной пайки антенно-фидерных устройств / Луконин Н. В., Михнёв М. М., Матюшенко М. В., Корж И. Н., АО «ИСС имени академика М. Ф. Решетнёва», заявл. 19.10.2016.
5. ОСТ 4Г 0.033.200. Припой и флюсы для пайки, припойные пасты. Марки, состав, свойства и область применения. Редакция 1-78. М., 2011.

### История статьи

Поступила в редакцию 4 сентября 2017 г.

Принята к публикации 22 сентября 2017 г.

## THE USE OF NON-CONTACT SOLDERING TO CREATE A HIGHLY RELIABLE PRECISION CONNECTION OF ANTENNA-FEEDER DEVICES OF SPACECRAFT

**N. V. Lukonin<sup>1</sup>, O. A. Belov<sup>1</sup>, D. M. Doronkin<sup>1</sup>,  
A. N. Korobkin<sup>1</sup>, I. Y. Shestakov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

<sup>2</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation

150

*The article discusses the application of non-contact soldering to create a highly reliable precision connection of antenna-feeder devices of spacecraft nonpressurized design with increased active lifetime. The transition to the development and use of transceiving devices operating in the centimeter and millimeter ranges of radio waves for communications spacecraft from Earth can significantly reduce the weight and size parameters of antenna-feeder systems by reducing the geometric dimensions of the component parts of the antenna-feeder system – antenna-feeder devices: antennas, filters, waveguides, transitions, splitters, connections, etc. while maintaining the required electronic and operational characteristics.*

*In connection with reduction of the sizes of antenna-feeder systems of space vehicles of new generation requires the development of compact antennas with high accuracy constructive-technological performance, highly reliable solder connections, but imposes additional requirements for construction and Assembly technology, precision alignment of the parts among themselves, obtaining a highly reliable, including precision brazed joints, with long-term use in the conditions of influence of factors of open space.*

*The use of traditional contact soldering methods for joining parts in such antenna-feeder devices and software-defined radio characteristics difficult or impossible. Application of a new method eliminates the contact soldered parts and the solder material with a heating device, to improve the strength characteristics of the solder joint, to improve the manufacturability of the Assembly, to improve the accuracy of connection of details.*

*Keywords: spacecraft, antenna-feeder devices, soldering, temperature.*

### References

1. OST 92-1190-88. Connection brazed metal and ceramic. Typical processes. (In Russian)
2. Lasko S. V., Lasko N. F. *Pajka metallov* [Brazing of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 376 p. (In Russian)
3. Allas A. A. *Lazernaya pajka v proizvodstve radioelektronnoj apparatury* [Laser soldering in manufacturing of electronic equipment]. St. Petersburg, St. Petersburg state University Publ., 2007, 134 p. (In Russian)
4. RF, Appl. 2016141223, Non-contact soldering of antenna-feeder devices, Lukonin N. V.; Mikhnev M. M.; Matyushenko, V. M.; Korzh, I. N., JSC Academician M. F. Reshetnev "Information satellite systems", 19.10.2016.
5. OST 4G 0.033.200. Solders and fluxes for soldering, solder paste. The type, composition, properties, and applications. Edition 1-78. M. 2011. (In Russian)

**Article history**

*Received 4 September 2017*

*Accepted 22 September 2017*

## Сведения об авторах

*Белов Олег Александрович* – начальник отдела разработки антенных систем и сборки полезных нагрузок АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М. Ф. Решетнёва». Область профессиональных и научных интересов: перспективные конструкции антенн и перспективные решения компоновки антенных систем, разработка антенн со сложным механическим интерфейсом из композиционных материалов, разработка пассивного ретрансляционного каналаобразующего оборудования (мультиплексоры, фильтры и т.д.), отработка и внедрение перспективных технологий изготовления в/ч приборов бортовой аппаратуры и в/ч элементов трактов АФС, а также эффективные модели управления проектами и организации работ.

*E-mail: bel@iss-reshetnev.ru*

*Горбачев Олег Анатольевич* – доктор физико-математических наук, доцент, директор Иркутского филиала Московского гражданского технического университета гражданской авиации. Окончил Иркутский государственный университет в 1982 году. Область научных интересов: физика ионосферной плазмы, спутниковые навигационные системы.

*E-mail: gorbachev\_oa@mail.ru*

*Доронкин Дмитрий Михайлович* – начальник группы сборки полезных нагрузок АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва». Окончил Сибирскую аэрокосмическую академию им. академика М. Ф. Решетнёва в 1994 году. Область профессиональных и научных интересов: монтаж волноводных трактов антенно-фидерных систем и бортовых ретрансляционных комплексов космических аппаратов, разработка конструкции волноводов и пассивного ретрансляционного каналаобразующего оборудования.

*E-mail: DDM@iss-reshetnev.ru*

*Зюзликов Валерий Петрович* – кандидат технических наук, доцент, профессор Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. Окончил Ленинградский механический институт в 1960 году. Область научных интересов: проектирование стартовых комплексов, акустика старта.

*E-mail: zuyzl01@gmail.com*

*Иванов Всеволод Борисович* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиоп физики и радиоэлектроники Иркутского государственного университета. Окончил Иркутский государственный университет в 1972 году. Область научных интересов: околоземное космическое пространство, физика

плазмы, распространение радиоволн, компьютерные технологии.

*E-mail: ivb@ivb.baikal.ru*

*Керножицкий Владимир Андреевич* – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры систем управления и компьютерных технологий Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, почетный изобретатель Российской Федерации. Окончил Рижское Краснознаменное высшее инженерно-авиационное военное училище им. Ленинского комсомола в 1960 году. Область научных интересов: ракетно-космическая и авиационная техника.

*E-mail: vakern@mail.ru*

*Ковалёв Роман Борисович* – инженер АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М. Ф. Решетнёва».

*E-mail: kovalyovrb@iss-reshetnev.ru*

*Кольчев Алексей Васильевич* – кандидат технических наук, старший преподаватель, старший научный сотрудник Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. Окончил БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова в 2009 году. Область научных интересов: ракетно-космическая и авиационная техника.

*E-mail: vakern@mail.ru*

*Коробкин Александр Николаевич* – начальник группы материалов АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М. Ф. Решетнёва». Окончил Институт цветных металлов и материаловедения СФУ в 2010 году. Область научных интересов: обработка металлов давлением, разработка новых материалов для ракетно-космической техники, развитие аддитивных технологий.

*E-mail: korobkinav@iss-reshetnev.ru*

*Луконин Николай Владимирович* – начальник бюро технологий приборного производства АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М. Ф. Решетнёва», аспирант СибГУ. Окончил Красноярское высшее командное училище радиоэлектроники ПВО в 1984 году. Область научных интересов: перспективные технологии производства бортовой и наземной радиоэлектронной аппаратуры на основе высокоинтегрированной элементной базы, высоконадежная прецизионная пайка приборов АФУ, разработка способов изготовления электронагревателей повышенной эффективности и другие.

*E-mail: nik-ip@yandex.ru*

*Пинчук Антон Владимирович* – магистр физических технологий, директор научно-исследовательского центра «Протей». Область научных интересов: физика, энергетика, радиосвязь, телефония.

*E-mail: avp@protei.ru*

*Пинчук Владимир Афанасьевич* – доктор технических наук, профессор. Область научных интересов: физика, двигателестроение, энергетика. Место работы: Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова.

*E-mail: vap@vp7550.spb.edu*

*Ракитская Мария Валентиновна* – кандидат технических наук, доцент, доцент Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. Окончила БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова в 1995 году. Область научных интересов: газодинамика старта, алгоритмы построения расчетных сеток.

*E-mail: mariyarakitskaya@mail.ru*

*Синильщиков Борис Евгеньевич* – старший научный сотрудник Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Окончил Ленинградский механический институт в 1962 году. Область научных интересов: проектирование стартовых комплексов, газодинамика старта.

*E-mail: vbsin@rambler.ru*

*Синильщиков Валерий Борисович* – кандидат технических наук, доцент, доцент Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. Окончил Санкт-Петербургский механический институт им. Д. Ф. Устинова в 1993 году. Область научных интересов: газодинамика старта, ударовиброзащита.

*E-mail: vbsin@mail.ru*

*Холмогоров Андрей Александрович* – аспирант кафедры радиофизики и радиоэлектроники Иркутского государственного университета. Окончил Иркутский государственный университет в 2014 году. Область научных интересов: околоземное космическое пространство, спутниковые технологии, распространение радиоволн.

*E-mail: varagon007@yandex.ru*

*Шестаков Иван Яковлевич* – профессор кафедры электронной техники и телекоммуникаций Сибирского государственного университета науки и технологии им. академика М. Ф. Решетнёва, доктор технических наук, доцент. Область научных интересов: конструирование и производство летательных аппаратов, электрохимическая обработка материалов, разработка способов очистки воды, моделирование теплообменных процессов.

*E-mail: yakovlevish@mail.ru*

## **Требования к оформлению статей для опубликования в журнале «Исследования наукограда»**

**Редакция принимает в журнал статьи, соответствующие следующим темам:**

- ◀ ракетно-космическая техника
- ◀ новые материалы и технологии в космической технике
- ◀ космическое приборостроение
- ◀ космические услуги
- ◀ инновации и экономика космической отрасли

**Статья должна быть подготовлена в формате Документ Word 97–2003 и направлена на электронную почту редакции [isercit@gmail.com](mailto:isercit@gmail.com).**

Вместе со статьёй необходимо предоставить акт экспертного заключения с печатью и заключение комиссии экспортного контроля (КЭК) о возможности опубликования или, в случае отсутствия КЭК в организации, письмо за подписью руководителя организации с печатью, что данные сведения не подлежат экспортному контролю.

После принятия материалов автору будет выслан лицензионный договор и акт на право использования редакцией научной статьи при размещении в журнале и электронных базах данных.

Подписанный автором лицензионный договор и акт, а также оригиналы акта экспертного заключения и заключение КЭК должны быть высланы почтой на адрес редакции: 662972, Красноярский край, ЗАТО г. Железногорск, ул. Ленина 52, Охоткину Кириллу Германовичу.

При подготовке статьи авторы должны следовать этическим принципам, принятым в научном сообществе и редакцией журнала.

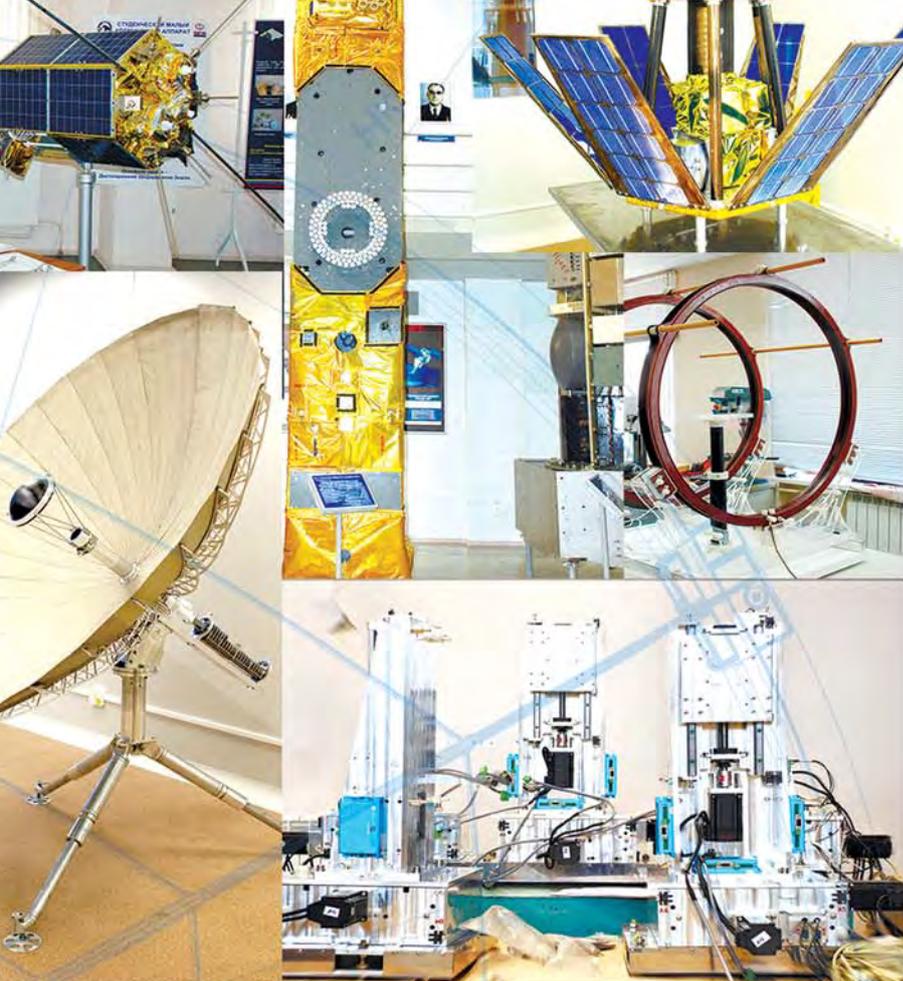
Авторы должны руководствоваться приведёнными ниже правилами. Статьи, оформленные без соблюдения этих правил, могут быть возвращены авторам на доработку.

**Требования к составу и расположению элементов оформления научной статьи:**

- ◀ Индекс УДК располагают отдельной строкой слева.
- ◀ На следующей строке размещается заголовок, который центрируют и набирают строчными буквами (как в предложении, начиная с прописной). Шрифт Times New Roman, 14 кегль, начертание – полужирное. Перенос слов в заголовке недопустим.
- ◀ Под заголовком по центру указываются фамилия и инициалы автора(ов). Шрифт Times New Roman, 14 кегль, по центру, полуторный интервал.
- ◀ Под ФИО автора(ов) по центру указываются: полное название учреждения (место работы), в котором выполнена работа (в именительном падеже), затем город (населённый пункт), область (край), страна. Шрифт Times New Roman, 14 кегль, по центру, полуторный интервал.
- ◀ Аннотация к статье.
- ◀ Ключевые слова (4–7 слов или словосочетаний).
- ◀ Текст, оформленный в соответствии с нижеприведенными требованиями.
- ◀ Пристатейный библиографический список, оформленный в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008.
- ◀ Следом необходимо привести заголовок, ФИО автора(ов), организацию, аннотацию, ключевые слова и библиографический список на английском языке.
- ◀ В конце документа необходимо привести сведения о каждом авторе (должность и место работы, научные степень и звание, что и когда окончил, область научных интересов, e-mail).

**Требования к представляемому тексту, иллюстрациям и пристатейному библиографическому списку:**

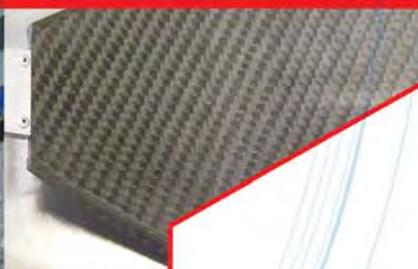
- ◀ Объем статьи, включая иллюстрации и список литературы, 8–20 страниц формата А4 (210 x 297 мм).
- ◀ Поля – 2,5 см.
- ◀ Шрифт Times New Roman, 14 кегль, полуторный интервал, красная строка 1,27 см.
- ◀ Заголовок и аннотация статьи не должны содержать нерасшифрованных сокращений (аббревиатур) и ссылок на литературу. Объем аннотации: 200–250 слов (равнение на английский вариант аннотации).
- ◀ При использовании в тексте сокращённых названий необходимо давать их расшифровку, следует ограничиваться общепринятыми сокращениями и избегать новых без достаточных на то оснований.
- ◀ Для использования переносов в словах необходимо пользоваться командой «автоматическая расстановка переносов». Для форматирования текста не использовать пробелы (нигде в тексте не должно быть рядом стоящих двух пробелов).
- ◀ Для набора сложных математических формул и выражений используется MathType, дробные выражения в формулах рекомендуется по возможности заменять выражениями с отрицательными степенями либо использовать косую черту. Размер шрифта в формулах установить по умолчанию (12).
- ◀ Допускаются рисунки и таблицы без заголовков, подписей и слов «Таблица» и «Рис.» в случае одной таблицы/рисунка. Если имеется несколько рисунков или таблиц, используются слова «Таблица» или «Рис.» с указанием номера таблицы или рисунка. Не рекомендуется загромождать рисунок ненужными деталями: надписи должны быть вынесены в подпись к рисунку, а на рисунке заменены цифрами или буквами. Желательно не перегружать текст графическим материалом. Размер шрифта в таблицах 12 кегль. Межстрочный интервал – одинарный. Схемы, рисунки и другие графические элементы должны быть представлены дополнительно отдельным файлом в графическом формате.
- ◀ В тексте ссылки на цитируемую литературу даются в квадратных скобках в конце предложения перед точкой (например: [1], [1, 2] или [1–3] и т.д.). Библиографический список следует оформлять в порядке ссылок на неё по тексту, в списке должны быть только те источники, на которые есть ссылки в тексте. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Для книг: фамилия и инициалы автора, полное название книги, место издания, издательство, год, том или выпуск, общее количество страниц. Для периодических изданий: фамилия и инициалы автора, название статьи, название журнала, год издания, том, номер, первая и последняя страницы статьи. Литература нумеруется арабскими цифрами без использования автоматической нумерации. Рекомендуется использование не менее 15 источников не старше 5 лет.



## РЕСУРСНЫЙ ЦЕНТР КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ И СИСТЕМЫ



**НИОКТР И  
КОМПЛЕКСНЫЙ  
ИНЖИНИРИНГ**



СибГУ им. М.Ф. Решетнева  
г. Красноярск, ул. Семафорная 433/1  
тел./факс: (391)291-90-95  
e-mail: info@rckas.pro  
сайт: rckas.pro