



ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ

ISSN:
2949-4575

ДЛЯ
СИСТЕМ

№ 1 (03)

ЯНВАРЬ–МАРТ

2024

www.cniihm.ru

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

Учредитель и издатель:

Государственный научный центр Российской Федерации
Федеральное государственное унитарное предприятие
«Центральный научно-исследовательский институт химии
и механики им. Д.И. Менделеева»
(ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИХМ им. Д.И. Менделеева»)
115487, Москва, ул. Нагатинская, д. 16А

Выходит ежеквартально

Главный редактор:

С.А. Бобков, генеральный директор ФГУП «ЦНИИХМ»,
д-р техн. наук, доцент, действительный член РАН
(академик)

Заместитель главного редактора:

А.А. Дегтярев, канд. физ.-мат. наук

Ответственный секретарь:

В.В. Абрамов

Над номером работали:

В.В. Простаков, выпускающий редактор
А.В. Сигунов, верстка и графика
М.И. Рукатикина, дизайнер
О.С. Зотова, корректор

Редакционный совет:

А.М. Аверченко, д-р техн. наук, проф., член-кор. РАН
Э.А. Бардаев, д-р техн. наук, проф.
С.А. Бобков, д-р техн. наук, доц., действ. член РАН
(председатель редакционного совета)
В.И. Верхотуров, д-р техн. наук, проф.
А.В. Виноградов, д-р техн. наук, доц.
А.И. Григорьев, д-р техн. наук, проф.
В.Т. Калугин, д-р техн. наук, проф.
В.П. Кутахов, д-р техн. наук, проф., действ. член РАН
С.М. Мужичек, д-р техн. наук, проф.
С.П. Никитаев, д-р техн. наук, проф.
И.Б. Петров, д-р физ.-мат. наук, член-кор. РАН
А.В. Родин, д-р физ.-мат. наук
В.В. Сазонов, д-р физ.-мат. наук, доц.
М.В. Сахаров, д-р техн. наук, проф.
С.С. Симаков, д-р физ.-мат. наук, доц.
С.В. Соколов, д-р физ.-мат. наук
Н.Н. Сысоев, д-р физ.-мат. наук, проф.,
действ. член РАН
И.Н. Торгун, д-р техн. наук, проф., действ. член РАН
С.Ю. Улыбышев, д-р техн. наук
А.А. Фасоля, д-р пед. наук, канд. техн. наук, проф.
(секретарь редакционного совета)

Научно-практический журнал

«Перспективные технологии для систем безопасности»
зарегистрирован в Министерстве печати
и информации Российской Федерации.
Регистрационное свидетельство:
ПИ № ФС77-83949 от 16 сентября 2022 г.

Издание зарегистрировано в базе данных
Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Адрес редакции:

115487, Москва, ул. Нагатинская, д. 16А
Телефоны: (499) 611-80-26, 616-98-22
Факс: (499) 782-23-21
E-mail: redaction@cniihm.ru

Электронная почта ФГУП «ЦНИИХМ»:
mail@cniihm.ru

Электронная версия журнала:
<https://cniihm.ru>

Подписано в печать 29.03.2024

Формат 60×90/8 Усл.-печ. л. 19,25
Бумага мелованная Тираж 220 экз.
Печать цифровая Заказ № 115

Отпечатано в типографии ФГУП «ЦНИИХМ»
115487, Москва, ул. Нагатинская, д. 16А

СОДЕРЖАНИЕ

От редакции

Небо очень черное. Земля голубая. Все видно очень ясно 3

Космические технологии

Инфракрасные приемные системы США орбитального слежения
за пусками ракет 4
В.Н. Точенов

Спутниковые системы

Определение параметров движения космических аппаратов
многоспутниковой группировки 26
С.Ю. Улыбышев, С.М. Храмов, А.А. Лысенко

Энергоустановки летательных аппаратов

Способ оценки теплового излучения
факела плазменного ракетного двигателя в диапазоне радиочастот 40
Е.П. Колесников, М.Н. Кутин, И.В. Червяков

Машинное обучение

Создание «интеллектуальной» навигации для автономных
необитаемых подводных аппаратов 64
И.А. Смирнов, Н.В. Судаков

Наноматериалы

Особенности травления толстых слоев алюминия
в хлорсодержащей плазме 78
Д.Ю. Обижаев, С.Ю. Суздальцев, С.А. Жукова, С.А. Ульянов

Информационная безопасность

Защита химических предприятий от кибератак 88
И.В. Егоров, С.А. Чекарев, П.А. Щавелев, В.М. Волков

Технология неорганических веществ

Исследование режимов получения порошка хлорида калия
с заданными свойствами 104
Л.Л. Хименко, Р.А. Бердников, В.И. Малинин, А.В. Елькин

Приборы и методы измерения

Снижение порогов регистрации α - и β -излучающих
радионуклидов в воде 112
С.П. Никитаев, С.А. Чернов, М.Б. Казакова

Технологии двойного назначения

Экономичный инструмент для эффективной резки пород
и железобетонных конструкций 124
*С.И. Дорошенко, А.С. Иванов, В.А. Малых, П.А. Романенков, Н.П. Михайлов,
А.В. Скрипка, В.А. Коршунова*

Методы и средства защиты

Технология бездетонационного разрушения
взрывоопасных предметов и устройств 136
С.А. Душенок, Г.В. Семашкин, В.Д. Васильев, Ю.А. Фроленков

История

По следам секретных материалов великого ученого 144



ISSN:
2949-4575

P R O M I S I N G TECHNOLOGIES FOR SECURITY S Y S T E M S

№ 1 (03)

JANUARY–MARCH

2024

www.cniihm.ru

SCIENTIFIC AND PRACTICAL
JOURNAL

Founder and Publisher:

State Scientific Center of the Russian Federation
Federal State Unitary Enterprise «D.I. Mendeleev
Central Research Institute of Chemistry and Mechanics»
(SSC FSUE CRICM im. D.I. Mendeleeva)
16A, st. Nagatinskaya, MOSCOW 115487, Russia

Published quarterly

Chief Editor:

S.A. Bobkov, General Director FGUP TsNIIKhM, Grand PhD
in Engineering, Assoc. Prof., member of RARAN (Academician)

Deputy Chief Editor:

A.A. Degtyarev, PhD of Physics and Mathematics

Executive Secretary:

V.V. Abramov

Worked on the magazine:

V.V. Prostakov, editor-in-chief
A.V. Sigunov, layout and graphics
M.I. Ruyatkina, designer
O.C. Zotova, proofreader

Editorial Council:

A.M. Averchenko, Grand PhD in Engineering, Prof.,
Corresponding Member RARAN
E.A. Bardaev, Grand PhD in Engineering, Prof.
S.A. Bobkov, Grand PhD in Engineering, Assoc. Prof.,
Member of RARAN (*chairman of the editorial board*)
V.I. Verkhoturov, Grand PhD in Engineering, Prof.
A.V. Vinogradov, Grand PhD in Engineering, Assoc. Prof.
A.I. Grigoriev, Grand PhD in Engineering, Prof.
V.T. Kalugin, Grand PhD in Engineering, Prof.
V.P. Kutakhov, Grand PhD in Engineering, member of RARAN
S.M. Muzhichuk, Grand PhD in Engineering, Prof.
S.P. Nikitaev, Grand PhD in Engineering, Prof.
I.B. Petrov, Grand PhD of Physics and Mathematics,
Corresponding Member, RAN
A.V. Rodin, Grand PhD of Physics and Mathematics
V.V. Sazonov, Grand PhD of Physics and Mathematics,
Assoc. Prof.
M.V. Sakharov, Grand PhD in Engineering, Prof.
S.S. Simakov, Grand PhD of Physics and Mathematics,
Assoc. Prof.
S.V. Sokolov, Grand PhD of Physics and Mathematics
N.N. Sysoev, Grand PhD of Physics and Mathematics, Prof.,
Member of RARAN
I.N. Torgun, Grand PhD in Engineering, Member of RARAN
S.Yu. Ulybyshev, Grand PhD in Engineering
A.A. Fasolya, Grand PhD in Pedagogical, PhD in Engineering,
(*editorial board secretary*)

Scientific and practical journal

«Promising Technologies for Security Systems»

is registered with the Ministry of Press
and information of the Russian Federation.
Registration certificate:

ПИ № Ф077-83949 dated September 16, 2022

The publication is registered in the database
of the **Russian Science Citation Index (RSCI)**

Editorial address:

16A, st. Nagatinskaya, MOSCOW 115487, Russia
Tel: (499) 611-80-26, 616-98-22
Fax: (499) 782-23-21
E-mail: redaction@cniihm.ru

Email FSUE CRICM:

mail@cniihm.ru

Electronic version of the journal:

<https://cniihm.ru>

Signed for print 29.03.2024

Format 60×90/8
Paper coated
Digital printing

Conditional printed sheets 19,25
Circulation of 220 copies
Order № 115

Printed in a printing house of FSUE CRICM:
16A, st. Nagatinskaya, MOSCOW115487, Russia

CONTENT

From the editorial office

The sky is very black. The earth is blue. Everything can be seen very clearly 3

Space technologies

U.S. infrared sensors systems for orbital tracking of rocket launches 4
V.N. Tochenov

Satellite systems

Determination of motion parameters of multi-satellite spacecraft 26
S.Yu. Ulybyshev, S.M. Khramov, A.A. Lysenko

Aircraft power plants

A method for estimating the thermal radiation of a torch plasma
rocket engine in the radio frequency range 40
E.P. Kolesnikov, M.N. Kupin, I.V. Chervyakov

Machine learning

Creation of «intelligent» navigation for autonomous uninhabited
underwater vehicles 64
I.A. Smirnov, N.V. Sudakov

Nanomaterials

Feature of thick aluminum layers etching
In chlorine substance plasma 78
D.YU. Obizhaev, S.YU. Suzdaltsev, S.A. Zhukova, S.A. Ylyanov

Information security

Protection of chemical enterprises from cyberattacks 88
I.V. Egorov, S.A. Chekarev, P.A. Shchavelev, V.M. Volkov

Inorganic substances technology

Investigation of the modes of obtaining potassium chloride powder with
specified physico-chemical properties 104
L.L. Khimenko, R.A. Berdnikov, V.I. Malinin, A.V. Yelkin

Instruments and methods of measurement

Lowering detection thresholds of α - and β -emitting
radionuclides in water 112
S.P. Nikitaev, S.A. Chernov, M.B. Kazakova

Dual-use technologies

An economical tool for effective destruction of rocks
and reinforced concrete structures 124
*S.I. Doroshenko, A.A. Ivanov, V.A. Malykh, P.A. Romanenkov, N.P. Mikhailov,
A.V. Skripka, V.A. Korshunova*

Methods and means of protection

Technology of non-detonation destruction
of explosive objects and devices 136
S.A. Dushenok, G.V. Semashkin, V.D. Vasilyev, U.A. Frolenkov

History

On the trail of the secret materials of the great scientist 144

«НЕБО ОЧЕНЬ ЧЕРНОЕ. ЗЕМЛЯ ГОЛУБАЯ. ВСЕ ВИДНО ОЧЕНЬ ЯСНО»

Эта эмоциональная фраза, принадлежащая первому космонавту планеты Юрию Алексеевичу Гагарину, сказанная им во время полета, может служить неплохим эпиграфом к очередному номеру журнала «Перспективные технологии для систем безопасности» (ПТСБ).

Многие вещи, которые происходят сегодня на орбите, весьма тесно связаны с событиями на поверхности планеты. Разумеется, с точки зрения международной безопасности. Собственно, эта тема и сподвигла одного из наших авторов пристально взглянуть на инфракрасные приемные системы американских спутников орбитального слежения за пусками ракет. В статье представлен анализ характеристик и относительных преимуществ различных комбинаций космической аппаратуры обнаружения и отслеживания ракет с орбит – от геостационарной до низкой околоземной.

Тема космических технологий поднимается и в статье, посвященной оценке теплового излучения плазмы факела ракетного двигателя в диапазоне радиочастот. Авторами разработаны термодинамическая и радиотехническая модели пламени силовой установки.

В рубрике «Технология неорганических веществ» представлены сразу две статьи с исследованиями свойств некоторых химических элементов и предложены способы их применения. В частности, изучены режимы получения порошка-иммитатора хлорида калия с заданными размерами и формой частиц для обкатки перспективного ракетно-прямоточного двигателя. Подобран оптимальный вариант, пригодный для наработки требуемого вещества в лабораторных условиях. Методом сканирующей электронной микроскопии определена форма частиц полученного порошка.

Впрочем, на Земле тоже есть свой космос, и называется он – океан. Современные технологии добрались и в эту стихию. В статье «Создание «интеллектуальной» навигации для автономных необитаемых подводных аппаратов» рассматриваются варианты применения алгоритмов машинного обучения систем управления морских беспилотников. Приведен обзор существующих прикладных методов искусственного интеллекта. Выявлен спектр перспективных и актуальных задач, не нашедших решения на сегодняшний день, а также ключевые конструктивные и программно-аппаратные характеристики и параметры, относительно которых могут быть применены алгоритмические подходы анализа данных.

Кроме того, в новом выпуске ПТСБ опубликованы статьи, представляющие технологии, связанные с применением ударно-волновой резки при сносе сооружений и проведении спасательных операций, бездетонационного разрушителя взрывоопасных предметов и устройств, а также с решением актуальной технической задачи по выбору оптимальной конструкции специализированного устройства детектирования α - и β -радионуклидов.

Надеемся, что все представленные публикации, будут полезны нашим читателям. И, коль скоро главная тема этого номера связана с космосом, то закончить наш короткий анонс хотелось бы словами Фреда Хойла – английского астронома, сформулировавшего теорию звездного нуклеосинтеза: «Космос вовсе не так уж далек. До него всего час езды, если только ваш автомобиль способен ехать вертикально вверх».

УДК 629.78; 629.7.054:535.214.4; 623.764; 629.4.052.5; 327.8

ИНФРАКРАСНЫЕ ПРИЕМНЫЕ СИСТЕМЫ США ОРБИТАЛЬНОГО СЛЕЖЕНИЯ ЗА ПУСКАМИ РАКЕТ

В.Н. ТОЧЕНОВ,
ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики»

U.S. INFRARED SENSORS SYSTEMS FOR ORBITAL TRACKING OF ROCKET LAUNCHES


V.N. TOCHENOV,
ISSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics»

Изображение: nated-science.ru

Введение

Космические аппараты (КА) обнаружения ракет и раннего предупреждения обеспечивают постоянное слежение за планетой с помощью высокочувствительных инфракрасных приемных систем, настроенных на обнаружение пус-

ков и шлейфов ракет. Их основная задача – зафиксировать запуск выпущенной ракеты до начала отслеживания, чтобы определить ее тип и курс. Использование инфракрасных (ИК) приемных систем космического базирования позволяет максимально эффективно справиться с



Аннотация. Представлен систематический анализ характеристик и относительных преимуществ различных комбинаций космической аппаратуры обнаружения и отслеживания ракет с орбит – от геостационарной до низкой околоземной. Проведена оценка эффективности инфракрасных приемных элементов американской системы противоракетной обороны отдельно или во взаимодействии с другими средствами в рамках многоуровневой архитектуры противоракетной обороны.

Ключевые слова: ИНФРАКРАСНАЯ ПРИЕМНАЯ СИСТЕМА; КОСМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА; КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ; ОРБИТА; ОРБИТАЛЬНОЕ СЛЕЖЕНИЕ; ПРОТИВОРАКЕТНАЯ ОБОРОНА; СПЕКТРАЛЬНЫЙ ДИАПАЗОН; ФОТОПРИЕМНАЯ МАТРИЦА.

Для цитирования: Точенов В.Н. Инфракрасные приемные системы США орбитального слежения за пусками ракет // Перспективные технологии для систем безопасности. 2024. № 1 (3). С. 4–25.

Abstract. The article presents a systematic analysis of the characteristics and relative advantages of various combinations of space-based sensors for detecting and tracking rockets from geostationary to low-Earth orbits. The infrared sensors of the American ballistic missile defense system elements were assessed alone and in concert with other assets as part of the layered missile defense architecture.

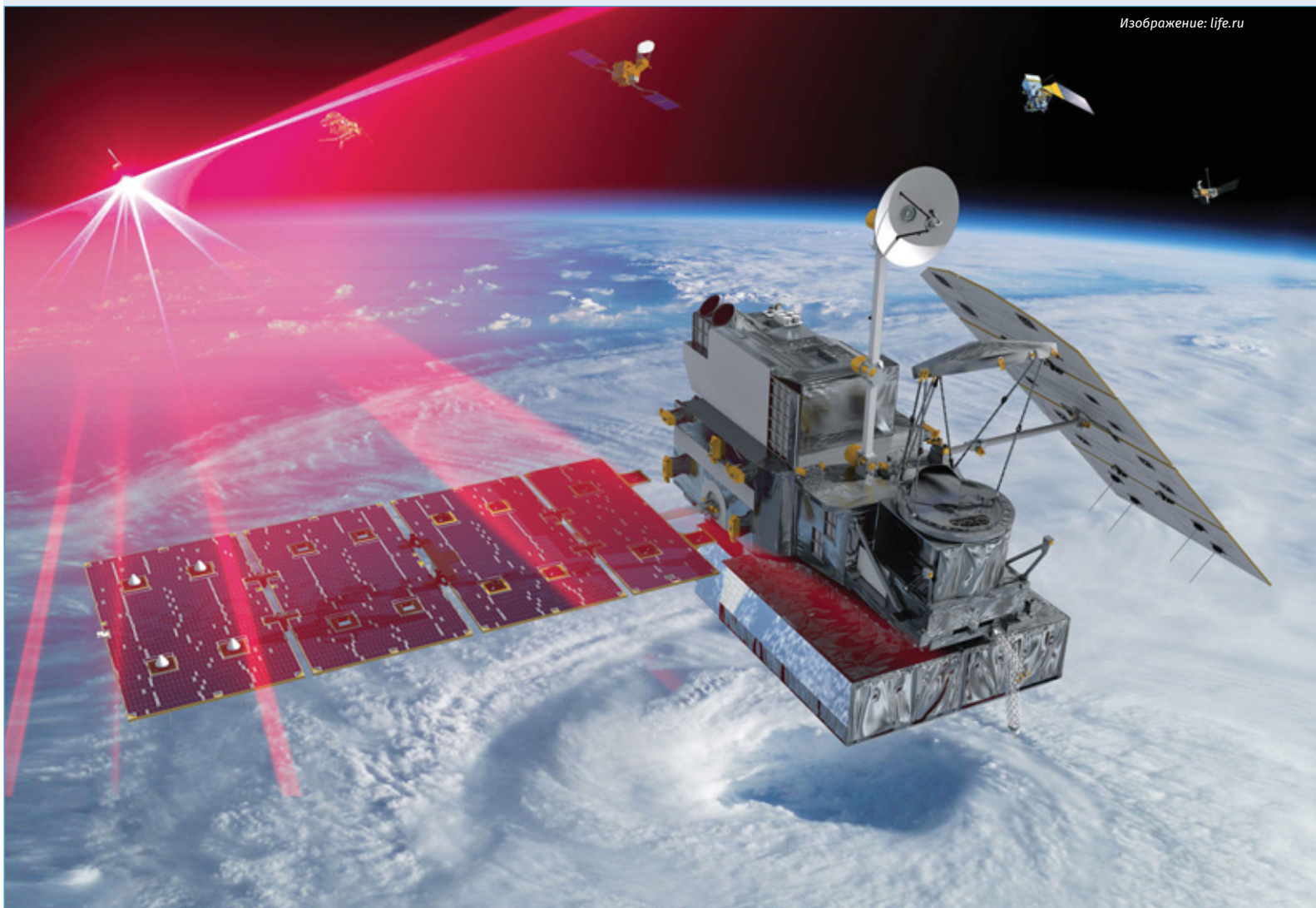
Keywords: INFRARED SENSOR; SPACE-BASED SYSTEM; SATELLITE; ORBIT; ORBITAL TRACKING; BALLISTIC MISSILE DEFENCE; SPECTRAL RANGE; FOCAL PLANE ARRAY.

For citation: Tochenov V.N. U.S. infrared sensors systems for orbital tracking of rocket launches. *Perspektivnye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti* [Promising technologies for security systems], 2024, N 1 (3), pp. 4–25. (In Russ.).

этой задачей, тем самым выигрывается время для принятия защитных мер и противодействия угрозе.

США начали экспериментировать со спутниками обнаружения ракет в рамках программы противоракетной обороны MIDAS начала 1960-х гг., в которой ис-

пользовались спутники на низкой околоземной орбите. На смену ей пришла геостационарная интегрированная система раннего предупреждения о ракетном нападении IMEWS, позже переименованная в программу поддержки обороны DSP (Defense Support Program). В период с



Инфракрасные приемные системы космического базирования обеспечивают наилучшую возможность обнаруживать и отслеживать баллистические ракеты, а также определять результаты их перехвата.

1970 по 2007 г. было развернуто в общей сложности 23 КА DSP, прослуживших в американской сети противоракетной обороны на протяжении большей части холодной войны.

В 2011 г. DSP трансформировалась в систему космического базирования SBIRS (Space-based Infrared System) современного поколения. В настоящее время на гео-

стационарной орбите находятся шесть КА SBIRS-GEO. Кроме того, КА SBIRS-NEO (Improved Trumpet) дополняет эти спутники ИК приемными системами, размещенными на спутниках Национального разведывательного управления NRO на эллиптических орбитах «Молния», чтобы обеспечить лучшее покрытие полюсов Земли.

КА SBIRS-GEO-6 стал последним в программе SBIRS и на смену ей должна прийти система – преемница постоянного ИК-наблюдения за пусками ракет следующего поколения.

ИК приемные системы космического базирования обеспечивают наилучшую возможность обнаруживать и отслеживать баллистические ракеты, а также определять результаты их перехвата. Эти ИК-системы обеспечивают значительные преимущества по дальности перед своими наземными аналогами.

На протяжении длительного времени в космическом пространстве насчитывалось несколько группировок аппаратов США с приемниками ИК-наблюдения за пусками ракет с поверхности Земли, например, КА DSP, SBIRS, STSS (Space Tracking and Surveillance System). Также в этих целях немалый срок на низкой околоземной орбите высокоэффективно проработал КА NFIRE (Near Field Infrared Experiment).

КА системы SBIRS и программы поддержки обороны DSP обеспечивают начальное предупреждение о ракетах и раннее слежение, что запускает сложную сеть наземных и морских радаров для определения положений, траекторий и сигнатур ракет. Поступающая информация объединяется в единую картину для осуществления эффективного перехвата. Оператором этих КА, работающих на околоземных орбитах, является Агентство противоракетной обороны MDA (Missile Defense Agency) США.

Данная статья носит обзорный характер. В ней приводится анализ характеристик и относительных преимуществ различных комбинаций космических приемников обнаружения и отслеживания ракет с орбит – от геостационарной до низкой околоземной; даются примеры современных КА США с аппаратурой обнаружения, слежения и съемки ИК-диа-

пазона, работающих на геостационарной, высокоэллиптических и низких околоземных орбитах.

Данные по представленным КА на моменты вывода их на орбиты отражены в табл. 1. Кроме того, в статье впервые анализируются характеристики ИК-аппаратуры современных КА, их ИК приемных систем с фотоприемными матрицами, рассматривается концепция совместного применения систем слежения КА, их особенности по обнаружению и слежению за объектами, а также проводимые этими КА орбитальные наблюдения.

Космические аппараты на низких околоземных орбитах

В 2001 г. Агентство противоракетной обороны MDA приступило к работе над проектом, который первоначально был частью программы SBIRS – спутниковая группировка на низкой околоземной орбите (SBIRS-Low). Собственно, из него и появилась так называемая система космического слежения и наблюдения STSS [1–4], которая обеспечила улучшенные возможности КА с ИК приемными системами по сравнению с SBIRS-Low.



Изображение: cryptofeed.ru

Современные КА США с аппаратурой слежения

Наименование КА	Перигей, км	Апогей, км	Эксцентриситет	Наклонение, град.
STSS Demo-1 (Space Tracking and Surveillance System Demonstrator, USA-208)	1 347	1 352	3,24E-04	58
STSS Demo-2 (USA-209)	1 339	1 351	7,78E-04	58
STSS ATRR (Space Tracking and Surveillance System Advanced Technology Risk Reduction Satellite, USA 205)	867	879	8,28E-04	98,93
NFIRE (Near Field InfraRed Experiment)	398	405	5,17E-04	48,2
DSP 20 (USA 149) (Defense Support Program)	35 897	35 909	1,42E-04	4,08
DSP 21 (USA 159)	35 765	35 810	5,34E-04	3,68
DSP 22 (USA 176)	35 741	35 832	1,08E-03	1,41
SBIRS GEO 1 (Space Based Infrared System Geosynchronous 1, USA 230)	35 778	35 795	2,02E-04	6,45
SBIRS GEO 2 (USA 241)	35 770	35 790	2,37E-04	6,45
SBIRS GEO 3 (USA 273)	35 779	35 785	7,12E-05	5,9
SBIRS GEO 4 (USA 282)	35 758	35 815	6,76E-04	6,3
SBIRS GEO 5 (USA 315)	35 778	35 797	2,25E-04	7,9
SBIRS GEO 6 (USA 336)	35 773	35 797	2,85E-04	6,5
SBIRS HEO-1, Twins 1 (USA 184, Improved Trumpet 4, National Reconnaissance Office Launch-22, NROL-22)	1 111	37 564	7,09E-01	63
SBIRS HEO-2, Twins 2 (USA 200, Improved Trumpet 5, NRO Launch-28, NROL-28)	1 112	37 580	7,09E-01	63,56
SBIRS HEO-3 (USA 259, Improved Trumpet 6, NROL-35)	2 103	37 746	6,78E-01	62,85
SBIRS HEO-4, (USA 278, Improved Trumpet 7, NROL-42)	1 738	38 111	6,92E-01	63,8
WFOV Testbed (Wide Field of View Testbed, USSF 12)	36 236	36 343	1,25E-03	0
GSSAP 2 (Geosynchronous Space Situational Awareness Program, USA 254)	35 826	35 832	7,11E-05	0,02
GSSAP 3 (USA 270)	35 749	35 820	8,42E-04	0,03
GSSAP 4 (USA 271)	35 769	35 899	1,54E-03	0,01
GSSAP 5 (USA 324)	35 781	35 787	7,12E-05	0,11
GSSAP 6 (USA 325)	35 703	35 754	6,06E-04	0,11
1HOPSAT-TD (1st-generation High Optical Performance Satellite)	566	576	7,20357E-04	36,9

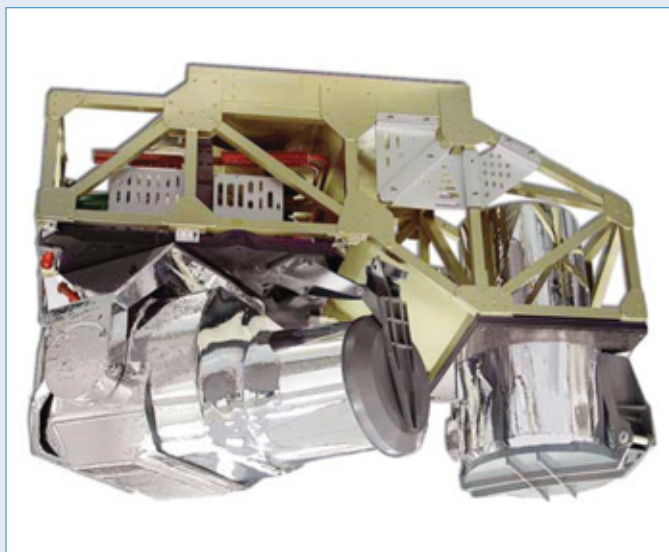
Примечание: *Большинство тепловизионных систем работают в одном, двух и – значительно реже – в нескольких диапазонах ИК-области NWIR (Near Wave Infrared) – ближневолновый (БВИК) 0,7...0,9 мкм; SWIR (Short Wave Infrared) – коротковолновый (КВИК) 0,9...3,0 мкм;

Таблица 1

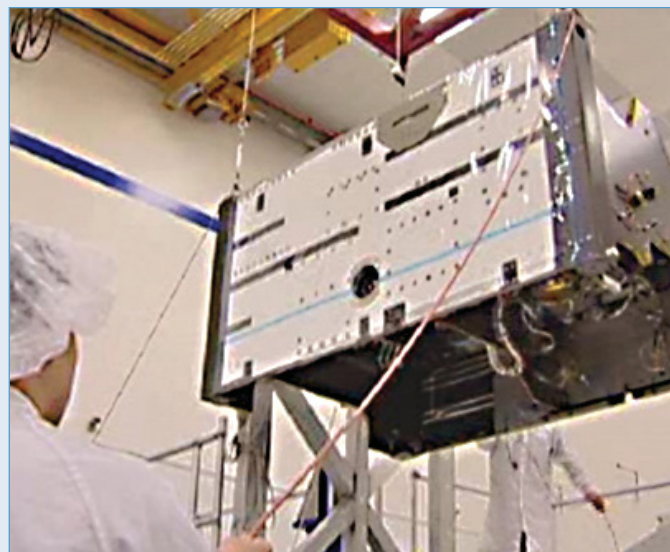
и съемки ИК-диапазона*

Период, мин	Масса запуска, кг	Дата запуска	Контрактор	Номер COSPAR	Номер NORAD
112,68	2 240	25.09.2009	Northrop Grumman	2009-052A	35937
112,58	2 240	25.09.2009		2009-052B	35938
102,41	–	05.05.2009		2009-023A	34903
97,6	494	24.04.2007	General Dynamics	2007-014A	31140
142,08	2 380	18.05.2000	TRW and	2000-024A	26356
1436,14	2 380	06.08.2001	Aerojet Electronics	2001-033A	26880
1436,12	2 380	14.02.2004	Systems	2004-004A	28158
1436,11	4 500	07.05.2011	–	2011-019A	37481
1436,11	4 500	19.03.2013	–	2013-011A	39120
1436,11	4 500	20.01.2017	Lockheed Martin Space	2017-004A	41937
1436,1	4 500	19.01.2018	Systems	2018-009A	43162
1436,1	4 850	18.05.2021	–	2021-042A	48618
1436,1	4 850	04.08.2022	–	2022-092A	53355
684	4 000	28.06.2006	National	2006-027A	29249
684	4 200	13.03.2008	Reconnai- ssance Laboratory	2008-010A	32706
707,55	4 200	13.12.2014	–	2014-081A	40344
707,7	8 000	24.09.2017	–	2017-056A	42941
1436,1	3 000	01.07.2022	Millennium Space Systems	2022-073A	52941
1438,3	–	28.07.2014	Orbital Sciences Corp.	2014-043B	40100
1436,02	–	19.08.2016	Orbital ATK	2016-052A	41744
1438,54	500	19.08.2016	Orbital ATK	2016-052B	41745
1438	–	21.01.2022	Northrup Grumman	2022-006A	51280
1438	–	21.01.2022	Northrup Grumman	2022-006B	51281
96,08	22	11.12.2019	Hera Systems	2019-089H	44859

оптического спектра. В принятых за рубежом обозначениях этими диапазонами с соответствующими граничными длинами волн являются: MWIR (Middle Wave Infrared) – средневолновый (СВИК) 3...5 мкм; LWIR (Long Wave Infrared) – длинноволновый (ДВИК) 8...14 или 8...12 мкм.



а



б

Главными подрядчиками STSS стали американские военно-промышленные компании Northrop Grumman и Raytheon.

КА программы STSS. Со стартового комплекса LC-17В станции ВВС США Мыс Канаверал (шт. Флорида) 25 сентября 2009 г. американцы осуществили пуск ракеты носителя (РН) Delta 2 модификации 7920-10С. На низкую орбиту были выведены два КА военного назначения STSS DEMO-1 (USA-208) и STSS DEMO-2 (USA-209). По принятой в США системе сквозной нумерации эти КА обозначены USA-208 и USA-209. КА STSS-D представляют собой низкоорбитальную составляющую космического сегмента SBIRS LEO США. Внешний вид КА STSS-D и его ИК-камер съемки представлен на рис. 1.

КА STSS-D предназначены для оценки характеристик приемных систем по обнаружению воздушных и наземных объектов на малой и большой дальностях. Они способны обнаруживать объекты по излучению в ИК и видимом диапазонах спектра, осуществлять слежение за ними и передавать данные в систему управления. КА STSS-D имеют между собой

связь по лазерным и радиотехническим каналам и передают информацию в командный центр.

Задача низкоорбитальной спутниковой группировки STSS – отслеживать баллистическую ракету на всех фазах ее полета (запуск, разгонный и маршевый участки и терминальный этап), различать боеголовки и ложные цели среди ракетных обломков, передавать полученные данные другим системам противоракетной обороны.

Слежение за баллистической ракетой является непростой задачей. Особенно она сложна на маршевом участке. Это связано с тем, что двигатели ракеты больше не работают, падает уровень ИК-излучения и необходимо отслеживать холодный объект на фоне холодного космического пространства. Кроме того, выделение боеголовок среди ложных целей и ракетных обломков также является технически трудной задачей. Поэтому система STSS использует приемные системы видимого и инфракрасного спектра.

На КА STSS-D размещены камеры постоянного обзора и точного слежения, раз-

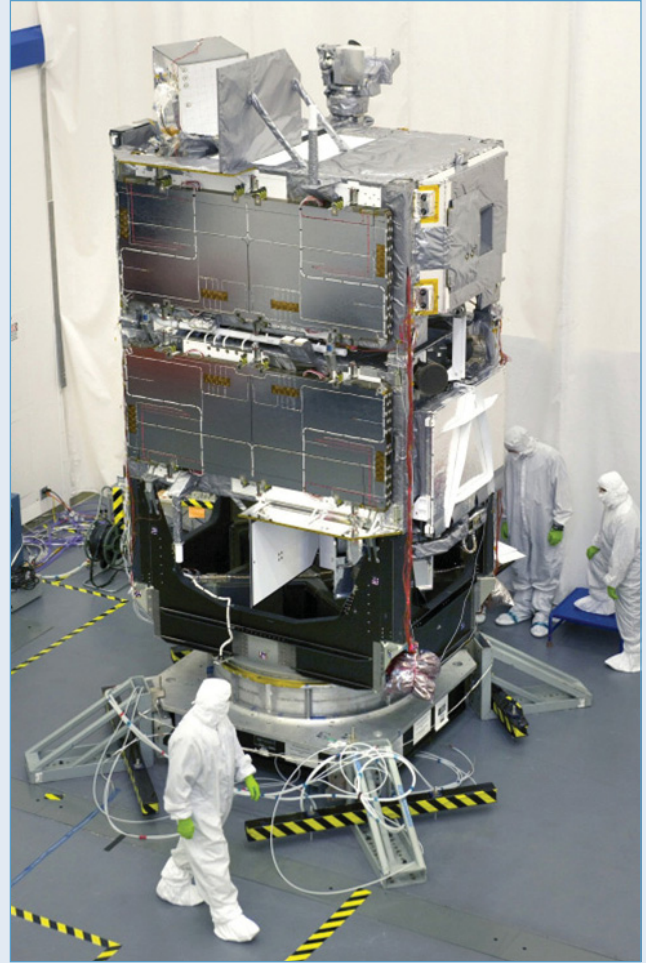


6

работанные компанией Raytheon, а также подсистема обработки сигналов и данных. Сухая масса КА STSS-D 1100 кг, высота орбиты 1350 км, наклонение орбиты 58°.

Камера постоянного обзора (КПО) с широким полем зрения обнаруживает объекты и передает их координаты на камеру точного слежения (КТС). КТС с узким полем зрения разворачивается и направляется на заданные объекты по данным КПО для их сопровождения.

КПО (широкого захвата) обнаруживает баллистическую ракету сразу после запуска, когда ее двигатели горячие. Эта широкозахватная камера обеспечивает обнаружение и захват цели и состоит из широкоформатного сканирующего линзового телескопа и инфракрасной коротковолновой матрицы в фокальной плоскости. Как только ракета завершила разгон и перешла в маршевую фазу полета, КТС (узкого обзора) захватывает и сопровождает угрозу по мере ее движения в космическом пространстве. Телескоп КТС за счет высокой чувствительности обеспечивает обнаружение боеголовки с очень низким уровнем сигнала.



2

Рис. 1. КА программы STSS-D: а – камеры слежения и съемки КА; б – платформа КА; в – КА на орбите; г – КА STSS-D в паре перед запуском

Подсистема обработки сигналов и данных принимает и фильтрует информацию от камер широкого и узкого обзора со скоростью около 2,1 Гбит в секунду. Эта подсистема может обнаруживать и отслеживать более 100 объектов в близком к реальному времени и определять, какие объекты в космосе являются ракетами или боеголовками, а какие – ложными целями или космическим мусором. Затем эта информация передается в наземные командные центры, размещенные по всему миру.

Каждый из двух демонстрационных КА космической системы STSS содержит пассивно охлаждаемую широкоугольную камеру обнаружения КВИК-диапазона с линзой оптикой и сканирующей призмой и приемником на КРТ (кадмий-ртуть-теллур – HgCdTe), а также узкоугольную камеру сопровождения ИК и видимого диапазона с криогенно охлаждаемыми до температуры 40 К КРТ-матрицей ДВИК-диапазона и двухспектральной КРТ-матрицей среднего/дальнего ИК (СВИК/ДВИК) диапазонов формата 128×128 элементов, активно охлаждаемой оптикой, а также неохлаждаемой матрицей видимого диапазона формата 256×256 элементов.

Две камеры съемки КА STSS-D осуществляют слежение за объектами с помощью приемников длинноволнового, средневолнового и коротковолнового ИК (соответственно ДВИК, СВИК и КВИК – LWIR, MWIR и SWIR) диапазонов, а также видимого диапазона, что обеспечивает слежение за объектами на разных участках траектории их полета.

Основные особенности КА STSS-D фирмы Northrop Grumman по обнаружению и слежению за объектами совместно с системами SBIRS и DSP (Defense Support Program) показаны на рис. 2.

Камера обнаружения с КРТ-приемником КВИК-диапазона и с фиксированной скоростью сканирования служит для обнаружения и сопровождения объектов на фоне Земли в начальной фазе их траектории. Она имеет пассивное охлаждение.

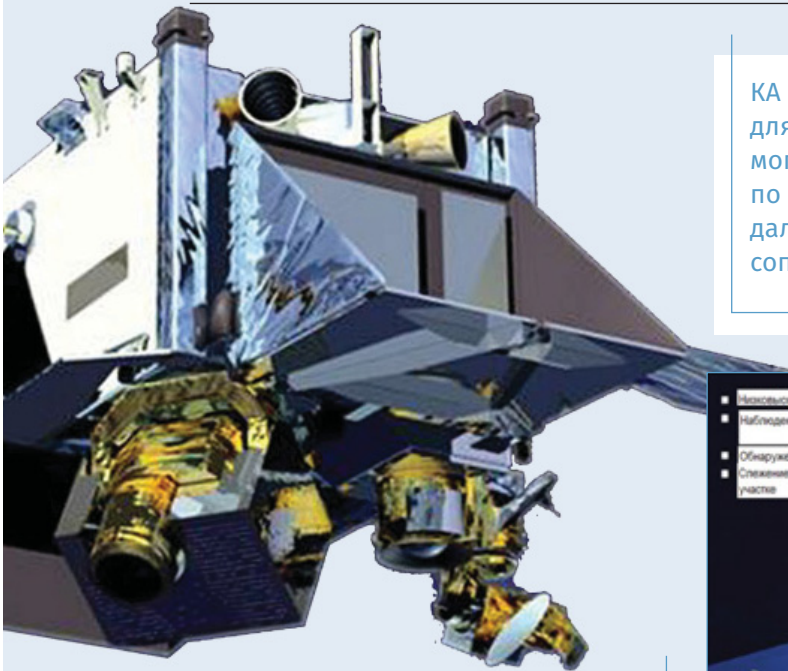
После фазы обнаружения информация, обработанная бортовым процессором, передается работающей одновременно в среднем и дальнем ИК (СВИК/ДВИК – MWIR/LWIR) диапазонах камере сопровождения холодных объектов на фоне неба. Эта камера имеет криогенную систему охлаждения.

Два демонстрационных КА системы STSS, разнесенные на 35°, 14 марта 2011 г. впервые обеспечили стереослежение за объектом комплекса Aegis «от начала до конца» (from birth-to-death – «от рождения до смерти»), фактически – от пуска до падения в океан. Впервые было продемонстрировано отслеживание баллистической ракеты от момента запуска до разделения боеголовок и ложных целей. Также это было произведено впервые, независимо от наземных систем, приборами, установленными на двух КА STSS. До этого момента такие возможности достигались лишь благодаря сложной интеграции различных наземных, космических и воздушных систем. Важным качеством спутников STSS является возможность отслеживать сами объекты в реальном времени с высоким разрешением и моделировать их траектории.

По заявлению вице-президента фирмы Northrop Grumman Дуг Юнга (Doug Young), так называемое слежение за объектами «от начала до конца» ранее никогда не проводилось космическими системами, и этот эксперимент является значительным достижением КА STSS.

В феврале 2013 г. КА STSS-D впервые предоставили свои данные слежения эсминцу Aegis во время испытания на перехват баллистической ракеты средней дальности.

Кроме того, тандемом спутников STSS-D было проведено наблюдение другого спутника – NOAA, использующегося для погодных наблюдений, что продемонстрировало возможности системы по наблюдению резидентных космических объектов (RSO).



КА STSS работают совместно с КА SBIRS и DSP для полного покрытия спектра. КА SBIRS и DSP могут гарантировать получение данных по ракетам для STSS, но не сопровождение ракет дальше фазы разгона. Только STSS обеспечивает сопровождение на средних участках траекторий.

Межспутниковую связь предполагалось обеспечить малой группировкой 9...12 КА STSS; расширенное покрытие ключевых районов угроз несколько большей – 18...20 КА; полное покрытие еще более многочисленной – 25...30 КА.

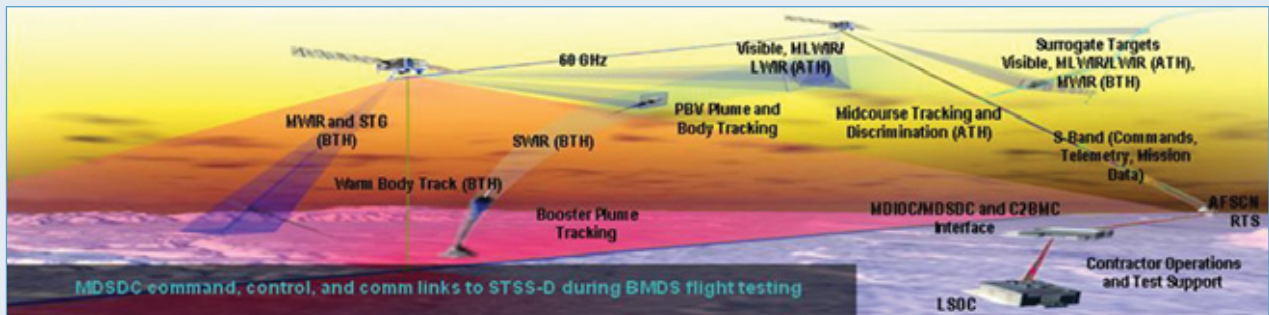
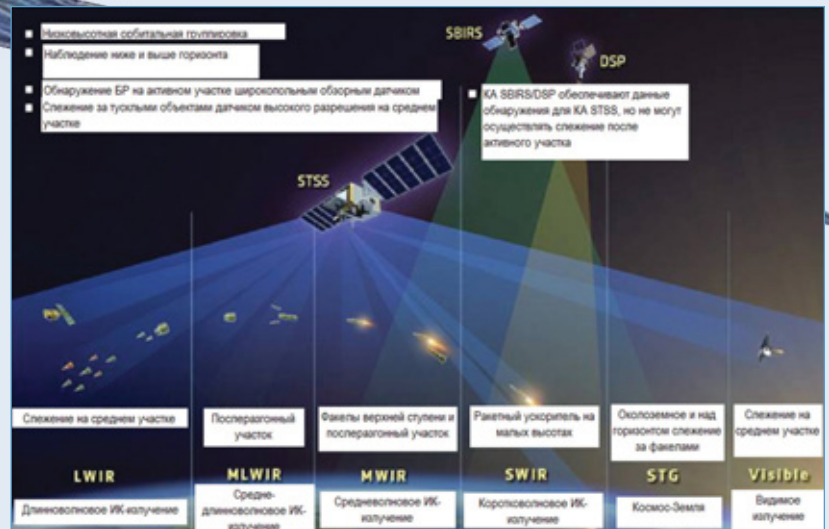


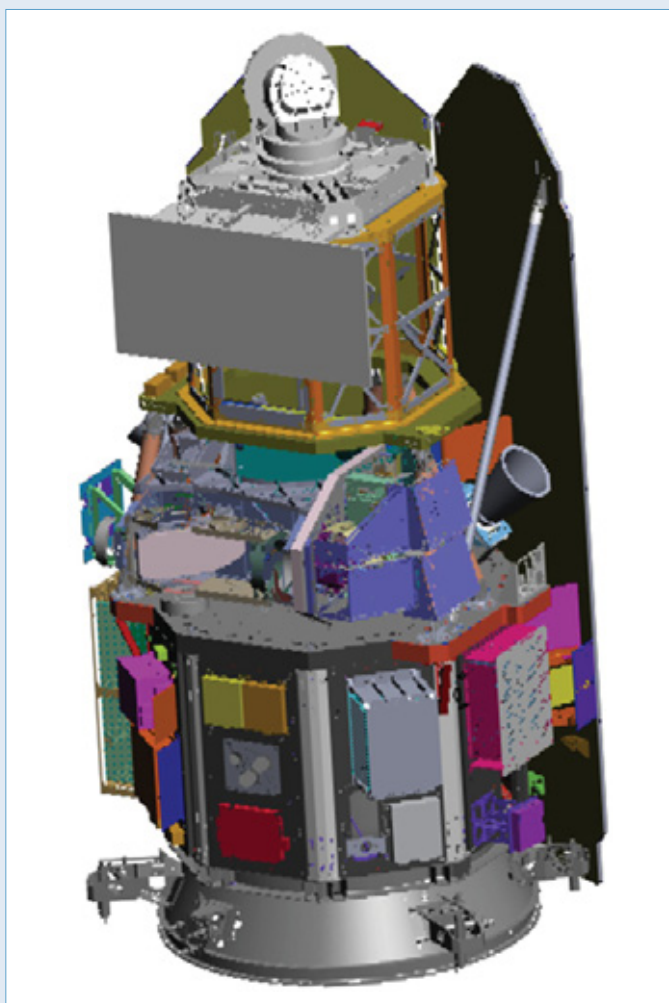
Рис. 2. Концепция применения и особенности КА STSS-D по обнаружению и слежению за объектами совместно с системами SBIRS и DSP

КА STSS-D были спроектированы как демонстрационные, с двухлетним сроком службы на орбите, который был превышен на 11 лет. Они регулярно использовались в обеспечении проведения испытаний по 2022 г.

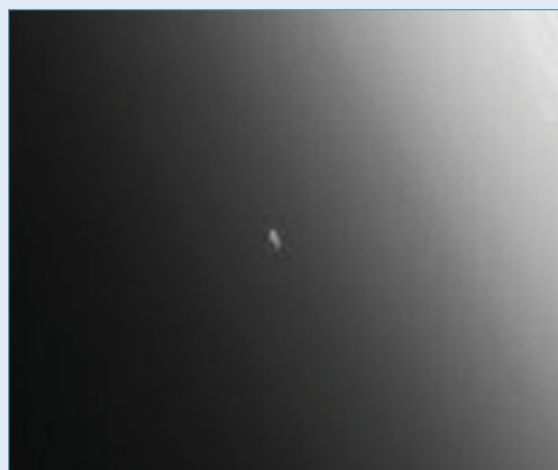
Со стартового комплекса SLC-2W базы ВВС США «Ванденберг» 5 мая 2009 г. осуществлен пуск PH Delta 2 модификации 7920-10C. На солнечно-синхронную

орбиту был выведен американский военно-экспериментальный КА STSS ATRR. По принятой в США системе сквозной нумерации КА STSS ATRR (Space Tracking and Surveillance System – Advanced Technology Risk Reduction) получил обозначение USA-205.

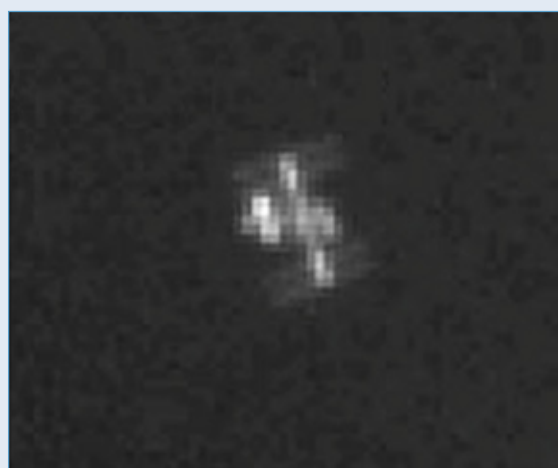
КА STSS ATRR предназначен для отработки технологий, которые могли быть использованы при создании штат-



а



б



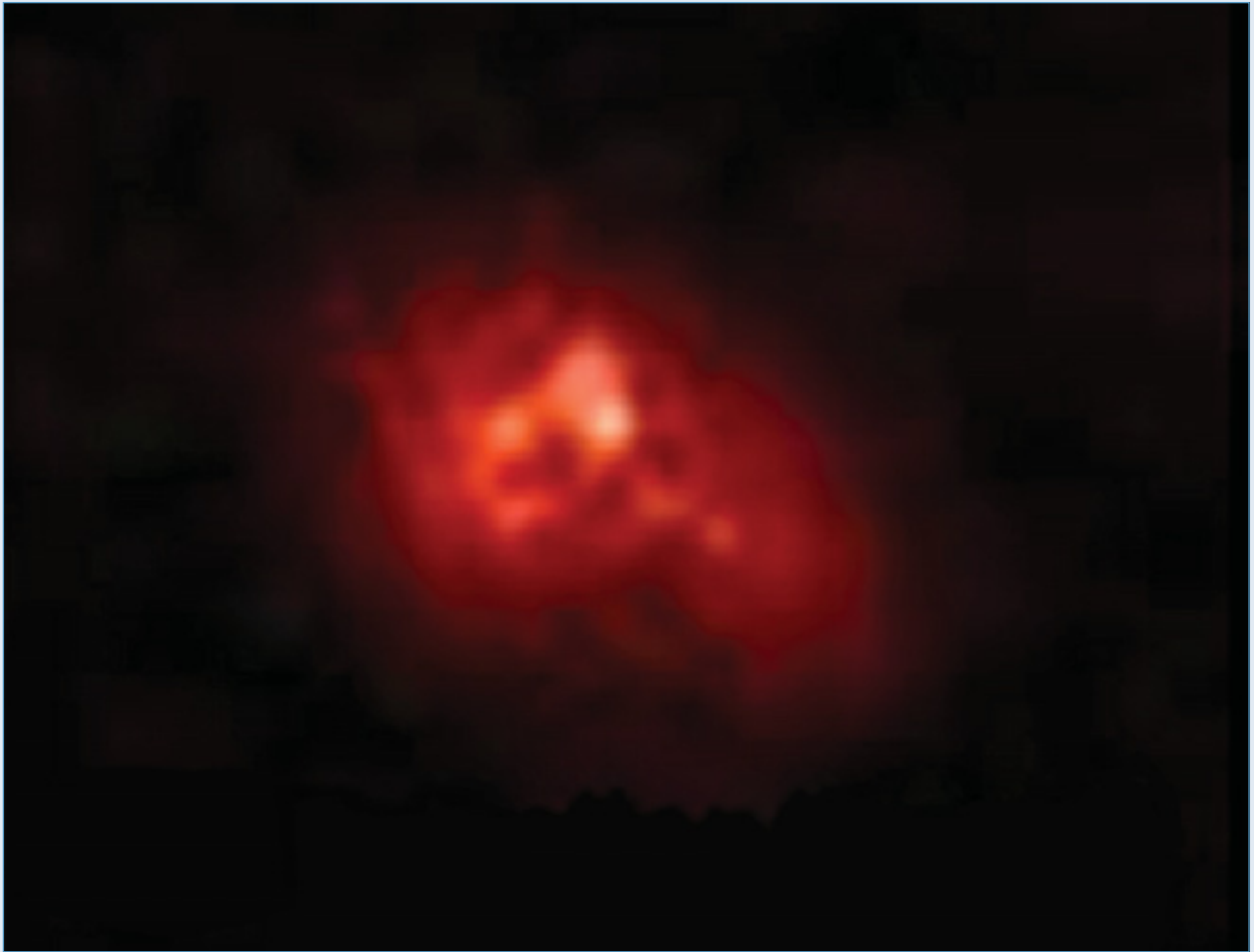
в

ной группировки КА STSS. STSS, ранее известная как SBIRS LEO, представляет собой низкоорбитальную составляющую космического сегмента перспективных систем США. Основная задача STSS – слежение за объектами на всех участках их траектории.

Информация о характеристиках КА STSS ATRR ограничена, достоверные изображения спутника отсутствуют. Пуск PH Delta 2 с КА STSS ATRR (USA-205) не сопровождался прямой телевизионной трансляцией. Официально было сообщено, что КА STSS ATRR (USA-205) оснащен экспериментальными приемными

системами, предназначенными для обнаружения, селекции и сопровождения объектов в полете.

КА программы NFIRE. С острова Уоллопс 24 апреля 2007 г. ракетой-носителем Minotaur был выведен на низкую орбиту микро-КА военного назначения NFIRE (рис. 3) [5]. Исследовательская программа NFIRE (Near Field Infrared Experiment – инфракрасный эксперимент в ближней зоне) Агентства противоракетной обороны MDA США имела основной целью обнаружение объектов и определение параметров траектории их полета на активном участке с высокой точностью, а также



2

Рис. 3. КА программы NFIRE: а – внешний вид; б – феноменология лимба; в – тепловизионное изображение МКС; г – раннее обнаружение объектов через освещенные солнцем облака

получение ИК-изображений ракет для улучшения их распознавания в последующих космических системах слежения и системах самонаведения перехватывающих боеголовок.

Помимо инфракрасной приемной системы КА NFIRE нес также вторичную полезную нагрузку для проведения экспериментов по использованию лазера для связи «космос–космос» и «космос–земля». КА NFIRE управлялся агентством MDA из центра противоракетной обороны на авиабазе Schriever (Colorado). Несмотря на то что изначально MDA планировало

использовать NFIRE на орбите максимум два года, спутник был выведен из эксплуатации только 5 августа 2015 г. – после восьми лет эксплуатации.

Основным интегратором спутника NFIRE была компания General Dynamics Advanced Information Systems (подразделение General Dynamics в Fairfax, Virginia).

Траекторные измерения эксперимента NFIRE с близкого расстояния (near field) имели высокую точность и помогали в разработке систем сопровождения. Кроме того, в ходе эксперимента испытывалась

Основная задача программы NFIRE заключалась в том, чтобы собрать изображения ракеты-носителя с высоким и низким разрешением, улучшить распознавание выхлопа его двигателей.



Изображение: u-f.ru

немецкая лазерная коммуникационная система, предназначенная для высокоскоростного обмена информацией между КА и наземными комплексами, а также с другими КА.

Основная задача программы NFIRE заключалась в том, чтобы собрать изображения ракеты-носителя с высоким и низким разрешением, улучшить распознавание выхлопа его двигателей. Для этих целей КА NFIRE был оснащен полезной нагрузкой инфракрасной приемной системы слежения TSP (Track Sensor Payload), разработанной международной корпорацией научных приложений SAIC (Science Applications International Corporation) из Сан-Диего, Калифорния, по контракту исследовательской лабораторией AFRL (Air Force Research Laboratory) ВВС США на авиабазе Kirtland (New Mexico). Агентство MDA использовало эти данные для проверки и обновления моделей, которые были основополагающими для технологии перехвата ППО.

Вторая задача эксперимента NFIRE заключалась в сборе типов наблюдаемой фоновой обстановки на орбите Земли в инфракрасном и видимом диапазонах для оценки способности раннего обнаружения и отслеживания запуска ракет. КА NFIRE выполнил множество задач по определению характеристик фона окружающей среды (региональная/сезонная изменчивость атмосферного излучения, день-ночь, суша-море, облака, измерения полярных сияний и т. д.). Эти данные были нужны для разработки космических приемных систем слежения и программы усовершенствования головок самонаведения ракет SM-3 IIB.

Для решения задач эксперимента в качестве полезной нагрузки на борту КА NFIRE помимо траекторной системы слежения TSP (Track Sensor Payload), работающей в видимом и инфракрасном

Таблица 2

Основные характеристики КА NFIRE

Характеристика	Показатель
Разработчик	General Dynamics
Ракета-носитель	Minotaur
Стабилизация	Трехосная
Ориентация	Астрокомпасы, модуль GPS
Система энергоснабжения	Панель СБ 516 Вт, аккумуляторная батарея 16 А·ч
Потребляемая мощность, Вт	230
Размеры, м	2,65 × Ø1,31
Масса (полная/сухая), кг	494/248
Масса топлива (гидразин), кг	115
Линия сброса данных, Мбит/с	X-диапазон 51,2
Емкость ПЗУ, Гбайт	40
Бортовое определение положения	С помощью ЗД, IRUs и GPS
Круговая орбита	$H = 495 \text{ км}, i = 49,0^\circ$
Наземный комплекс	Два наземных центра управления
Центральный процессор БК	RAD750
Полезная нагрузка	Высокочувствительные сенсоры TSP видимого и ИК-диапазонов; терминал лазерных связей LCT
Показатель надежности	0,85
Срок службы, год	2
Точность целеуказания 3σ , угл.сек	360
Знание целеуказания 3σ , угл.сек	14,8
Точность эфемерид 3σ , м	19

диапазонах, был установлен терминал лазерной связи TESAT Laser Communication Terminal (LCT), с помощью которого была выполнена успешная демонстрация лазерной связи в рамках международного сотрудничества между США и Германией. Немецкая сторона предоставила терминал лазерной связи TESAT для КА NFIRE и управляла космическим аппаратом TerraSAR-X с идентичным терминалом. Вместе эти два КА (NFIRE и TerraSAR-X) установили более 950 глобальных линий связи «космос–космос» и «космос–земля», а также провели многочисленные экспе-

рименты по получению характеристик сезонных атмосферных воздействий на лазерную связь. КА NFIRE и TerraSAR-X осуществили первую передачу данных между двумя космическими аппаратами со скоростью 5,6 Гбит в секунду (самая высокая скорость передачи данных для любой спутниковой системы в то время).

Наземный комплекс включал два центра управления MOCs (Mission Operations Centers) целевыми операциями. Основные характеристики КА NFIRE приведены в табл. 2.

**Сравнительные характеристики ФПУ аппаратуры слежения
и съемки КА NFIRE и STSS-D [3]**

Диапазон	КА			
	NFIRE		STSS-D	
	ФПМ	Фирма	ФПМ	Фирма
ДВИК(LWIR)	Матрица КРТ 256×256	Rockwell	Матрица КРТ 256×256	Raytheon
СВИК/ДВИК (MWIR/LWIR)	–	–	Двуспектральная матрица КРТ 128×128	
КВИК/СВИК (SWIR/MWIR)	Двуспектральная матрица InSb 320×256	Indigo	–	
Видимый	Матрица ПЗС (Si) 782×582	Sony	Матрица 256×256	

Приемная система слежения TSP КА NFIRE содержала узкопольную камеру слежения ИК-диапазона и видимого диапазона с криогенно охлаждаемыми КРТ-матрицей дальнего ИК-диапазона формата 256×256 элементов и двуспектральной InSb-матрицей коротковолнового/среднего ИК-диапазона формата 320×256 элементов, пассивно охлаждаемой оптикой, а также неохлаждаемой матрицей видимого диапазона формата 782×582 элементов.

Задачей низкоорбитального КА NFIRE являлось сопровождение и селекция цели на фоне других объектов в средней части траектории их полета, а также обеспечение разработки алгоритмов и моделей целеуказания. Аппаратура КА NFIRE выполняла сверхбыструю съемку в КВИК-диапазоне для обеспечения исследований и разработки возможностей раннего обнаружения и сопровождения объектов. Демонстрацией этих возможностей являлось раннее обнаружение через освещенные солнцем облака (рис. 3, б), что также обеспечило совершенствование моделей окружающей обстановки. Дополнительными задачами являлось определение характеристик

окружающего фона для программ разработки перспективных орбитальных фотоприемных устройств, а также контроль космического пространства в части обнаружения объектов на дистанциях наблюдения примерно от 60 до 600 миль.

**Сравнение камер слежения и съемки
КА NFIRE и STSS-D**

Низкоорбитальные КА NFIRE и КА STSS-D работали практически в одних и тех же участках спектрального диапазона, необходимых для эффективной работы систем ПРО и СПРН. Сравнительные характеристики фотоприемных устройств (ФПУ) камер слежения и съемки КА NFIRE и STSS-D приведены в табл. 3 и служат основой для выбора характеристик проектируемых камер ИК спектрального диапазона. На рис. 4 также приведен примерный вид кривых двуспектральной чувствительности, характерных для фотоприемных матриц (ФПМ) камер КА NFIRE и КА STSS-D.

Общим для камер слежения этих КА являются обеспечение многоспектральной съемки приемниками смотря-

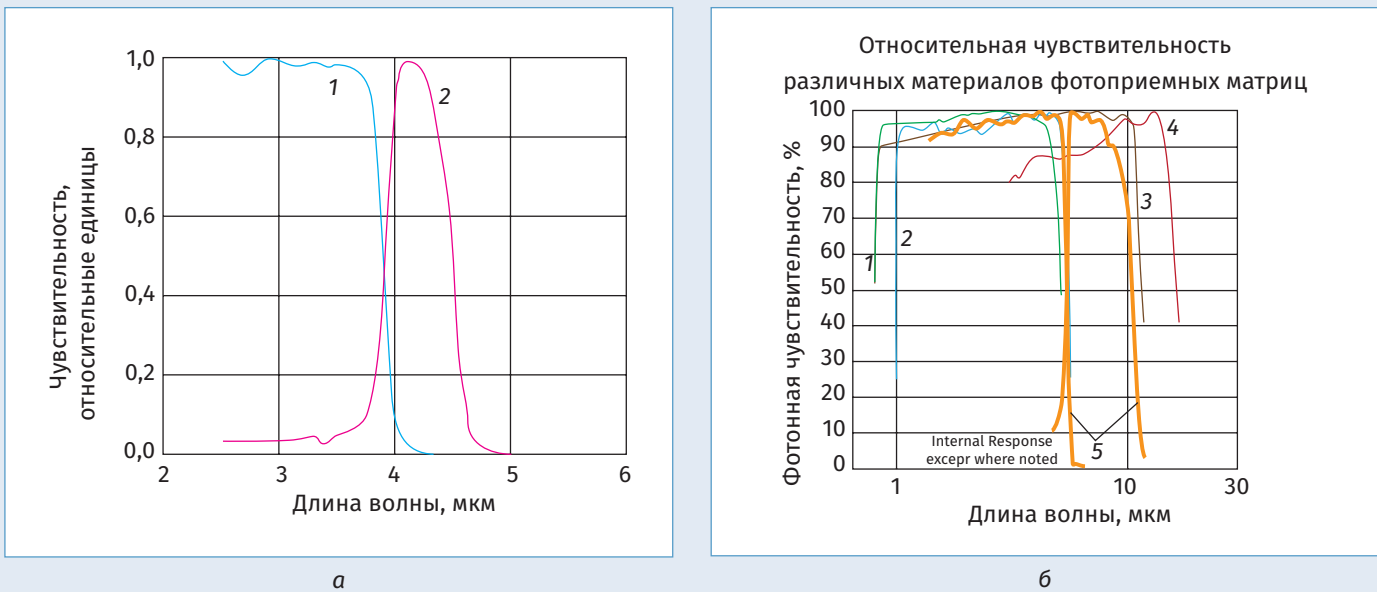


Рис. 4. Примерные характеристики чувствительности двухспектральных ФПМ камер: а – KA NFIRE: 1 – 3,8 мкм граница; 2 – 4,5 мкм граница; б – KA STSS-D: 1 – MWIR HgCdTe/CdZnTe; 2 – MWIR HgCdTe on Silicon; 3, 4 – LWIR PV HgCdTe; 5 – M/LWIR 2-Color

щего типа; узкое поле зрения; высокое пространственное разрешение; активно охлаждаемые ФПМ; охлаждаемая оптика; алгоритмы коррекции неоднородности чувствительности ФПМ, согласованной фильтрации, подавления засветок, многокадровых режимов обнаружения, оценки направления слежения и интенсивности сигнала, управления пороговыми характеристиками и трехмерного моносопровождения объектов.

Данные табл. 3, а также учет оптического инварианта параметров оптики и ФПУ могут составить основу для оценки дополнительных параметров (по которым отсутствуют данные) анализируемой аппаратуры. Результаты подобной оценки основных характеристик камеры слежения KA STSS-D представлены в табл. 4 и могут составить основу выбора параметров для проектирования перспективных низкоорбитальных ИК-камер слежения.

В настоящее время основными мировыми производителями для орбитальных

операций изготавливаются ФПМ (в том числе и двухспектральные) ИК-диапазона форматом от 128×128 до 4096×4096 с размером пикселя от 10 до 25 мкм и, как правило, на основе антимонида индия (InSb) и кадмиево-ртутного теллурида (КРТ – HgCdTe) [4].

Кроме того, на рис. 5 приведено сравнение чувствительностей D^* (удельных обнаружительных способностей по фону 300 К) фотонных приемников различных ИК-технологий и уровней охлаждения [6]. Из рисунка видны роль и место ФПМ, применяемых в интересующих спектральных диапазонах.

Естественно, что рассмотренные характерные особенности обеспечения многоспектральной съемки, высокого пространственного разрешения, активного охлаждения ФПМ, охлаждения оптики, коррекции неоднородности чувствительности ФПМ, согласованной фильтрации, подавления засветок, многокадровых режимов обнаружения, уп-

Основные характеристики

Матрица/материал	Спектральный диапазон, мкм	Приемный элемент, мкм	Формат матрицы	Захолаживание, К
Двухцветная СВИК/ДВИК КРТ-матрица (+ КРТ-матрица ДВИК-диапазона)	1,4...5,5	30	128×128	40
	5...11			
На основе кремния	Видимый	~15	256×256	Неохлаждаемые

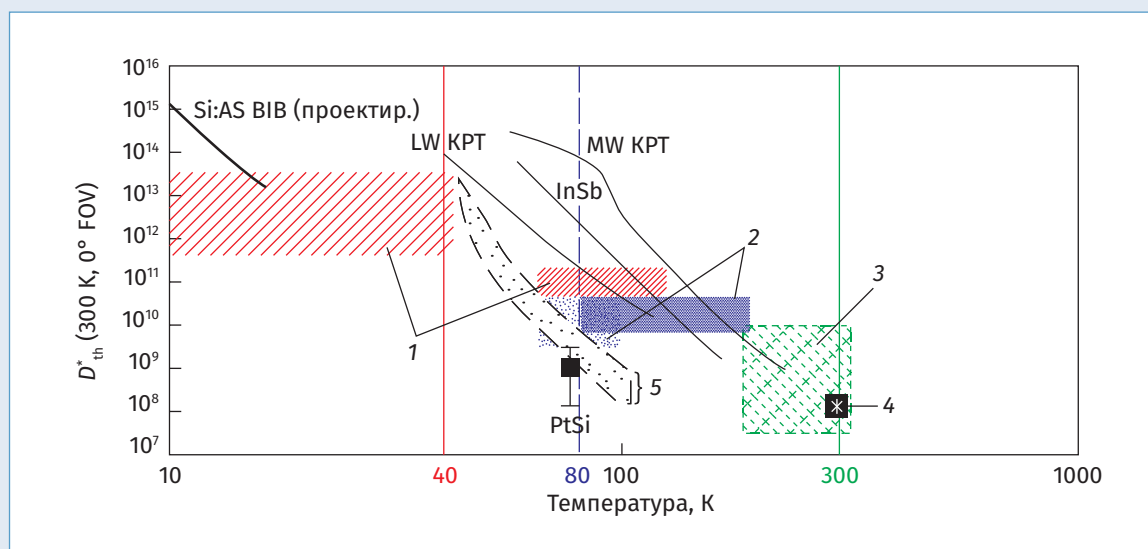


Рис. 5. Сравнение чувствительностей D^* (300 К, 0°) фотонных приемников различных ИК-технологий: 1 – LWIR, MWIR (стратегический); 2 – LWIR, MWIR (тактический); 3 – дешевые; 4 – неохлаждаемые; 5 – дискретные QWIP-матрицы

равления пороговыми характеристиками и трехмерного сопровождения объектов лежат в основе и ИК приемных систем рассматриваемых далее КА, работающих на геостационарной и высокоэллиптических околоземных орбитах.

Спутники на геостационарной и высокоэллиптических околоземных орбитах

КА программы DSP [7] является программой разведывательных КА на геостационарной околоземной орбите

(35 900 км), которые образуют спутниковую систему раннего обнаружения США. Эта группировка работает с 1970 г. Генеральный подрядчик программы DSP – компания Northrop Grumman. КА DSP обнаруживают ядерные взрывы и запуски ракет по всему миру по факелу работающего двигателя при помощи фотоприемных систем, фиксирующих ИК-излучение на более холодном фоне Земли. Группировкой КА DSP управляет 2-я эскадрилья космического предупреждения ВВС США, входящая в 460-е космическое крыло (авиабаза Buckley, Colorado). Она

аппаратуры слежения КА STSS-D [4]

Оптика			
Относительное отверстие	Апертура, см	Мгновенное поле зрения (определяемое геометрией приемного элемента), мкрад	Поле зрения, угл. град
~1:2,5	20	48	0,35 (6 мрад)
		24	

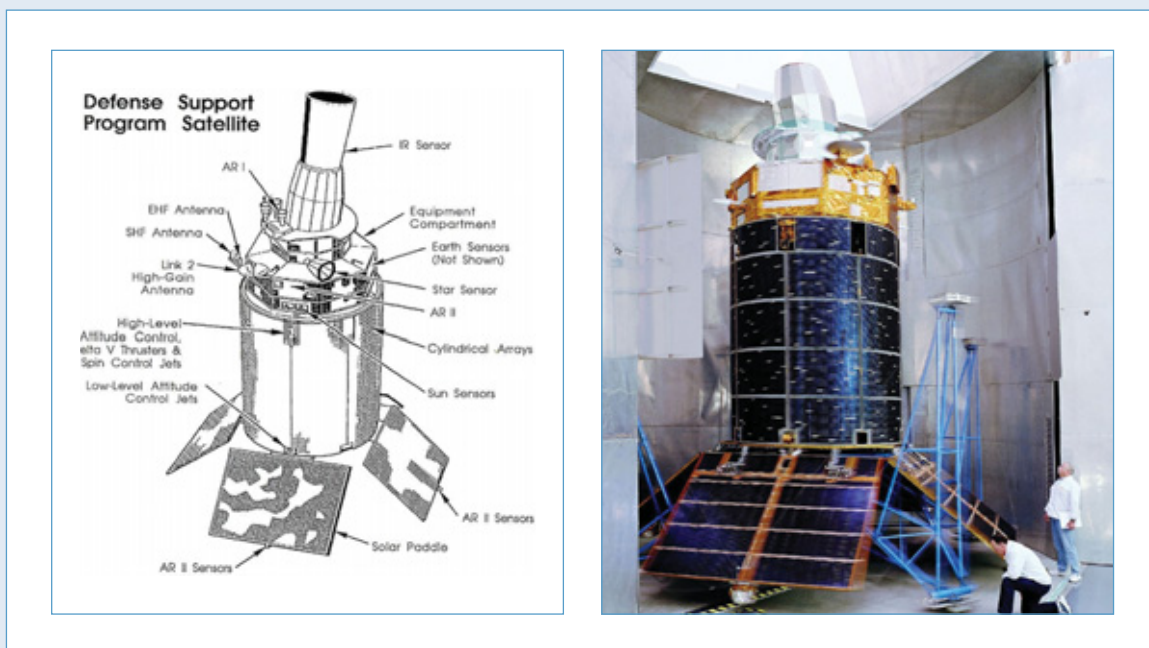


Рис. 6. КА программы DSP

передает информацию, полученную от группировки КА DSP, по каналам связи командованию воздушно-космической обороны Северной Америки и центры раннего предупреждения Стратегического командования США на станции Cheyenne Mountain ВВС США.

Первый КА DSP имел массу 900 кг, потребляемую мощность 400 Вт и 2000 фотоприемных элементов, срок службы ~1,25 года. Приемные системы широкоугольных камер Шмидта сканировали земную поверхность шесть раз в минуту.

На протяжении более сорока лет проведения программы DSP конструктив КА постоянно улучшался. Современные КА DSP со сроком службы более 10 лет имеют вес 2380 кг, потребление 1485 Вт и более 6000 фотоприемных элементов. Высота спутника – 10 м на орбите и 8,5 м при запуске, диаметр – 6,7 м на орбите и 4,2 м при запуске. Средняя стоимость – 400 млн долларов США.

В настоящее время работают три КА DSP (см. табл. 1, рис. 6), которые постоянно находятся на экваториальной гео-

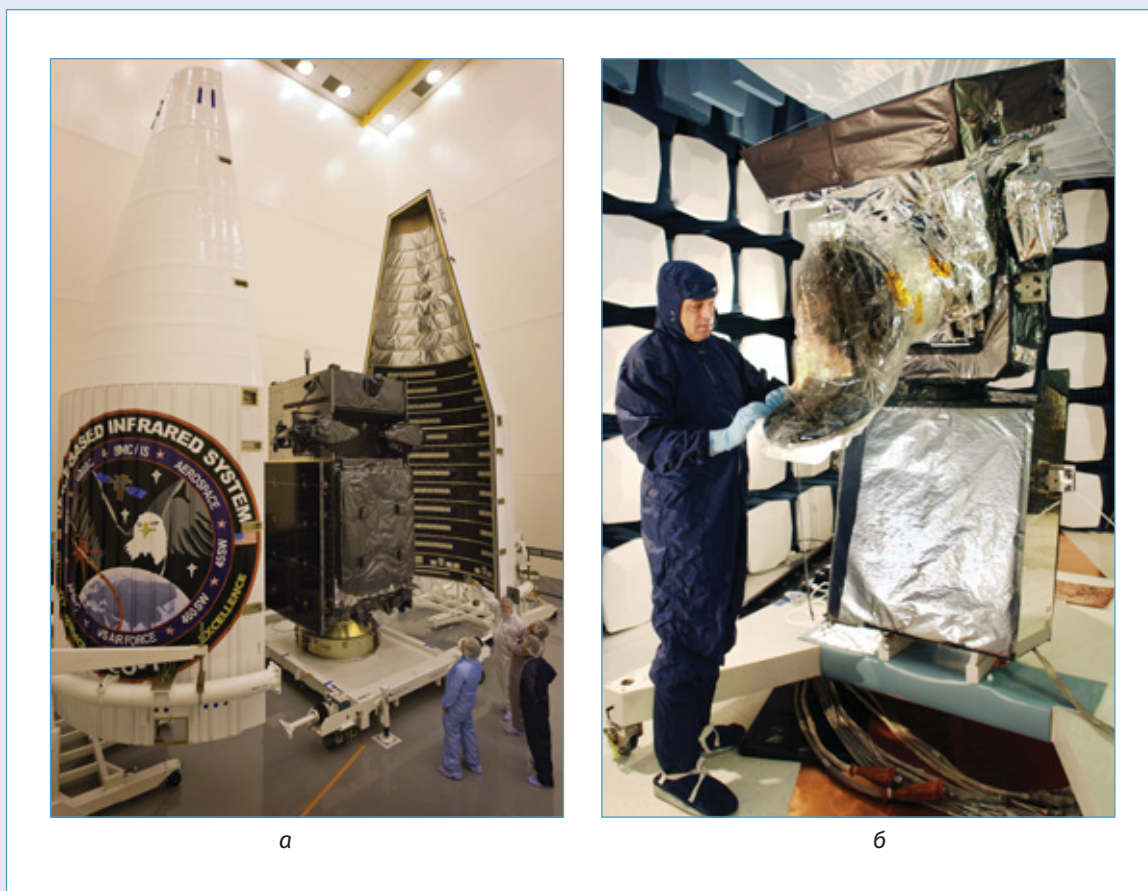


Рис. 7. Подготовка спутника SBIRS GEO-1 к старту на борту ракеты Atlas V (а); спутник SBIRS-HEO (б)

стационарной орбите над Индийским, Тихим и Атлантическим океанами.

КА программы SBIRS. Для замены КА системы DSP, функционирующей более 40 лет и подходящей к концу срока активного существования, ВВС США начали развертывание инфракрасной системы космического базирования SBIRS (Space-Based Infrared System) для слежения за пусками ракет. Если КА DSP требуется 40...50 с, чтобы обнаружить запуск ракеты и определить ее курс, то SBIRS выполняет эту задачу за 10...20 с.

Разработкой и поддержкой системы SBIRS занимаются корпорации Lockheed Martin и Northrop Grumman. SBIRS выполняет четыре целевые задачи: предупреждение о ракетной атаке; обеспечение

противоракетной обороны; техническая разведка; получение характеристик поля боя (наблюдение и предоставление информации о военной активности).

Система SBIRS включает КА SBIRS-GEO (рис. 7, 8) [8] на геостационарной орбите (GEO, Geosynchronous Orbit), КА SBIRS-HEO (или SBIRS-High) (рис. 7) [9] на вытянутой эллиптической орбите (HEO, Highly Elliptical Orbit) типа «Молния» и центр наземной обработки данных и управления. Планировалось дополнение системы спутниками на низкой околоземной орбите (LEO, Low Earth Orbit) как часть программы (SBIRS-Low), но эта система, как уже упоминалось, была перенесена в программу STSS. ИК системы SBIRS имеют большую частоту кадров, чем у КА

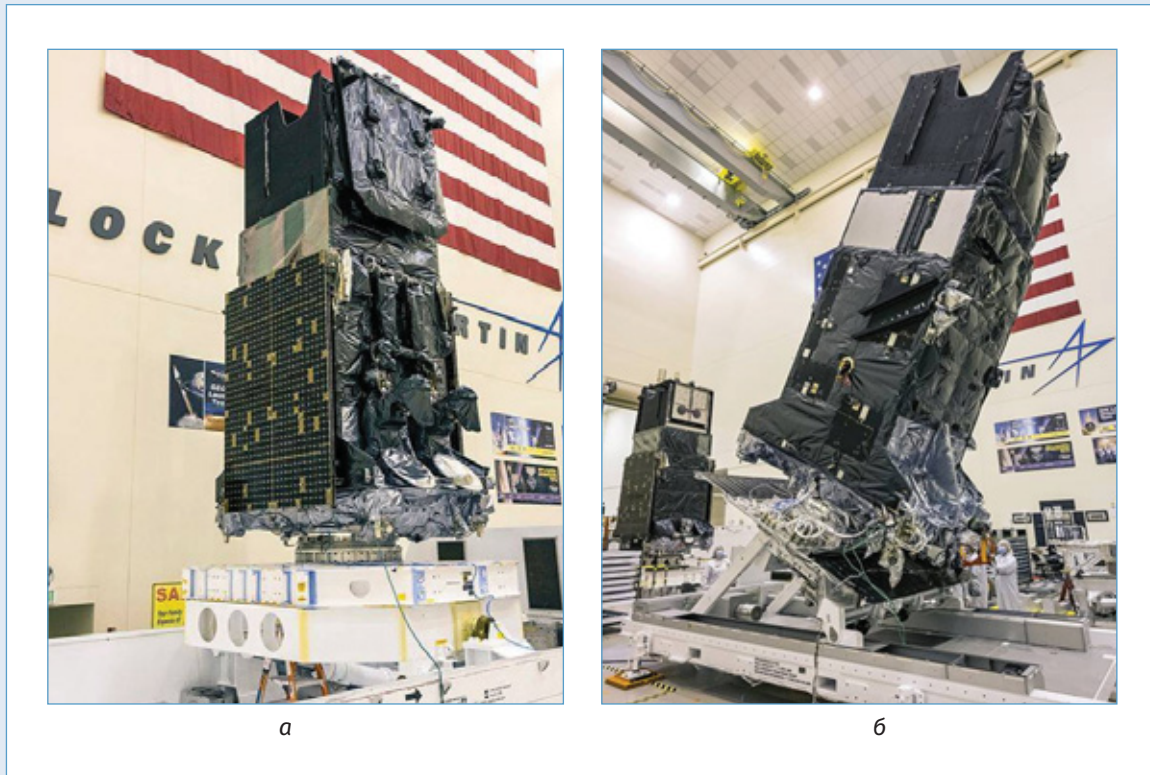


Рис. 8. КА программ SBIRS GEO-5 (а) и SBIRS GEO-6 (б)

DSP. Данные от SBIRS актуальны для перехвата на активном участке, где своевременность имеет решающее значение.

У КА SBIRS независимые инфракрасные приемные системы, которые могут одновременно сканировать обширные территории для обнаружения активности и просматривать вызывающий интерес области для обнаружения событий с низкими тепловым сигнатурами, таких как запуск баллистических ракет.

КА SBIRS-GEO оборудованы двумя инфракрасными приемными системами – сканирующей и пошаговой. Первая – способна непрерывно сканировать Землю, обеспечивая круглосуточное глобальное покрытие для предупреждения о запусках ракет и для сбора разведывательных данных. Вторая – предназначена для разведывательных целевых задач, содержит высокоточную систему наведения и уп-

равления, отличается скоростной маневренностью, высокой частотой повторных съемок и высокой чувствительностью. Две приемные системы КА SBIRS НЕО являются сканирующими и по своей природе подобны аналогичным КА SBIRS-GEO. Они предоставляют полученную информацию в центр наземной обработки данных. Однако КА SBIRS-GEO обладают возможностью выполнять самостоятельный анализ сигналов на борту и передавать обнаруженные события на Землю.

Программа SBIRS была признана весьма успешной, поскольку превзошла все ожидания в ходе выполнения различных целевых задач. Компания Lockheed Martin выполнила контракт на производство последнего в серии КА SBIRS GEO-6, запущенного в августе 2022 г., а КА SBIRS-GEO-6 стал последним в программе SBIRS, и на смену ей должна прийти система –

преемница постоянного ИК-наблюдения нового поколения.

Планы на последующие КА системы SBIRS GEO были прерваны в связи с разрыванием современной космической архитектуры, в которой эти КА примут участие на начальных этапах.

Отмена планировавшихся КА SBIRS-GEO 7 и 8 была предусмотрена бюджетным предложением на 2019 финансовый год, чтобы переместить средства, ранее выделенные на эти КА, на разработку новой системы OPIR постоянного инфракрасного наблюдения следующего поколения, призванной заменить спутники SBIRS-GEO и полезную нагрузку SBIRS-NEO.

Перспективная система слежения HBTSS

Современное состояние аппаратуры обнаружения, слежения и съемки ИК-диапазона современных КА, характеристики их ИК фотоприемных матриц и в особенности успешные демонстрационные возможности КА STSS-D послужили основой для разработки новых систем противоракетной обороны в первую очередь HBTSS (Hypersonic and Ballistic Tracking Space Sensor), предназначенной для слежения за гиперзвуковыми и баллистическими ракетами. Она появилась в результате проводимых в США с 2019 г. исследований подобных изделий космического базирования и потребностей в сквозном (по всей траектории) наблюдении [10].

В том же 2019 г. было создано Агентство космического развития SDA (Space Development Agency) для сокращения закупок военных спутников, быстрой разработки и запуска технологий следующего поколения с особым акцентом на проектирование и создание распределенного низкоорбитального созвездия КА, которое будет обеспечивать сквозное слежение за

баллистическими и гиперзвуковыми ракетами для обеспечения своевременного перехвата.

Система HBTSS практически входит в инфраструктуру Агентства космического развития SDA (Space Development Agency) и представляет собой часть новой архитектуры SDA, состоящей из сотен КА на низкой околоземной орбите с приемными системами широкого поля зрения [11]. Они предназначены для совместной работы в сети по обнаружению и отслеживанию целей на суше, на море, в воздухе и в космосе. КА HBTSS среднего поля зрения, в свою очередь, будут предоставлять данные системам перехвата. Сочетание КА с широким и средним полем зрения имеет решающее значение для нейтрализации гиперзвуковых ракет.

КА SDA и HBTSS являются частями запланированной многоуровневой архитектуры противоракетной обороны. При этом система HBTSS стремится продемонстрировать технологию управления огнем, необходимую для перехвата гиперзвукового оружия. То есть, SDA и MDA объединят свои полезные нагрузки для повышения эффективности [12]. КА, разработанные обоими агентствами, станут частью космической программы национальной безопасности США, запланированной на второй квартал 2024 г.

Выводы

Представленный обзор инфракрасных приемных систем космического базирования США продемонстрировал современные возможности инфракрасного наблюдения за поверхностью Земли с высокоэллиптических, геостационарной и низких околоземных орбит в целях обнаружения и слежения за запускаемыми ракетами, а также определения результатов их перехвата.

Современная аппаратура обнаружения, слежения и съемки ИК-диапазона современных КА, характеристики их ИК-систем с высокочувствительными фотоприемными матрицами послужили основой

для перспективных исследований новых изделий космического базирования, обеспечили базу для разработки агентствами SDA и MDA многоуровневой архитектуры противоракетной обороны США.

Список литературы/References

1. Space Tracking and Surveillance System (STSS), Discontinued – Missile Defense, Sensors, september 2022, available at: <https://missiledefenseadvocacy.org/defense-systems/space-tracking-and-surveillance-system/> (accessed: 10 december 2023).
2. Missile Defense Project, «Space Tracking and Surveillance System (STSS)», Missile Threat, Center for Strategic and International Studies, August 11, 2016, last modified July 19, 2021, available at: <https://missilethreat.csis.org/defsys/stss/> (accessed: 11 december 2023).
3. Aegis Ballistic Missile Defense Intercepts Target Using Space Tracking and Surveillance System-Demonstrators (STSS-D) Data. MDA Press-release, 13-NEWS-0002, February 13, 2013.
4. Space Tracking and Surveillance System, MDA Fact Sheet, 13-MDA-7601, October 13, 2013.
5. Satellite Re-Entry witnessed from Northern United States, November 4, 2015, available at: <https://spaceflight101.com/re-entry/satellite-re-entry-witnessed-from-northern-united-states/> (accessed: 11 december 2023).
6. Antoni Rogalski. Review. Progress in focal plane array technologies. Progress in Quantum Electronics, 36, 2012.
7. Missile Defense Project, «Defense Support Program (DSP)», Missile Threat, Center for Strategic and International Studies, April 14, 2016, last modified July 28, 2021, available at: <https://missilethreat.csis.org/defsys/dsp/> (accessed: 12 december 2023).
8. Spacecraft & Satellites, SBIRS Satellite Overview, 2024, available at: <https://spaceflight101.com/spacecraft/sbirs/> (accessed: 12 december 2023).
9. SBIRS-High Missile Warning Satellites: From Broken Budgets to Stability, Defense Industry Daily, September 30, 2013.
10. Hypersonic and Ballistic Tracking Space Sensor (HBTSS), future – missile defense, sensor; last updated: july 2, 2020, available at: <https://missiledefenseadvocacy.org/defense-systems/hypersonic-and-ballistic-tracking-space-sensor-hbtss/> accessed: 12 december 2023).
11. The MDA is still in charge of hypersonic-tracking space sensors, available at: <https://www.c4isrnet.com/battlefield-tech/space/2020/03/16/the-mda-is-still-in-charge-of-hypersonic-tracking-space-sensors> (accessed: 12 december 2023).
12. Pentagon agencies team up in upcoming launch of hypersonic tracking satellites, available at: <https://spacenews.com/pentagon-agencies-team-up-in-upcoming-launch-of-hypersonic-tracking-satellites/> (accessed: 12 december 2023).

Поступила в редакцию: 11.01.2024

Одобрена рецензентами: 22.03.2024

Принята к печати: 27.03.2024

Об авторе

Владимир Николаевич Точенов* – сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики». Адрес для почтовых отправок: 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А. E-mail: ptsb@cniihm.ru (в теме указать «Для Точенова В.Н.»).

Vladimir N. Tochenov* – employee of SSC RF FSUE «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics». Postal address: 16A Nagatinskaya str., Moscow, 115487. E-mail: ptsb@cniihm.ru (in the subject, specify «For V.N. Tochenov»).

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ



УДК 629.78

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ МНОГОСПУТНИКОВОЙ ГРУППИРОВКИ

С.Ю. УЛЫБЫШЕВ, д.т.н., С.М. ХРАМОВ, к.т.н., А.А. ЛЫСЕНКО, к.т.н.,
ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики»

Аннотация. Представлена методика определения номинальных параметров орбит космических аппаратов при их начальной расстановке в пространстве с заданным сдвигом по аргументу широты, который используется для синтеза структур однородных спутниковых систем. Учтено влияние второй зональной гармоники разложения гравитационного поля Земли, как наиболее существенного возмущающего фактора для низких околоземных орбит, в виде аналитических зависимостей, являющихся функцией от начальных параметров первого аппарата и заданного сдвига по аргументу широты всех остальных в данной плоскости.

Ключевые слова: КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ; НИЗКАЯ ОКОЛОЗЕМНАЯ ОРБИТА; СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА; ВТОРАЯ ЗОНАЛЬНАЯ ГАРМОНИКА; НОМИНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОРБИТ; АРГУМЕНТ ШИРОТЫ; ОПЕРАТИВНЫЙ ГЛОБАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ; ОРБИТА С СИНХРОННОЙ ПРЕЦЕССИЕЙ.

Для цитирования: Улыбышев С.Ю., Храмов С.М., Лысенко А.А. Определение параметров движения космических аппаратов многоспутниковой группировки // Перспективные технологии для систем безопасности. 2024. № 1 (3). С. 26–39.

DETERMINATION OF MOTION PARAMETERS OF MULTI-SATELLITE SPACECRAFT

S.Yu. ULYBYSHEV, Grand PhD in Engineering, S.M. KHRAMOV, PhD in Engineering,
A.A. LYSENKO, PhD in Engineering,
ISSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics»

Abstract. A technique is presented for determining the nominal parameters of spacecraft orbits at their initial placement in space with a given shift in the latitude argument, which is used to synthesize structures of homogeneous satellite systems. The influence of the second zonal harmonic of the decomposition of the Earth's gravitational field is taken into account, as the most significant disturbing factor for low Earth orbits, in the form of analytical dependencies that are a function of the initial parameters of the first apparatus and a given shift in the latitude argument of all others in a given plane.

Keywords: SPACECRAFT; LOW EARTH ORBIT; SATELLITE SYSTEM; SECOND ZONAL HARMONIC; NOMINAL PARAMETERS OF ORBITS; LATITUDE ARGUMENT; OPERATIONAL GLOBAL MONITORING; ORBIT WITH SYNCHRONOUS PRECESSION.

For citation: Ulybyshev S.Yu., Khramov S.M., Lysenko A.A. Determination of motion parameters of multi-satellite spacecraft. *Perspektivnye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti* [Promising technologies for security systems], 2024, N 1 (3), pp. 26–39. (In Russ.).

Введение

При проектировании орбитальных спутниковых систем (СС) как периодического, так и непрерывного обзора зачастую прибегают к сегментному построению, когда космические аппараты (КА) располагают в одной плоскости с заданным сдвигом по аргументу широты [1, 2]. Размещение нескольких таких орбитальных плоскостей, разнесенных по долготе восходящего узла, позволяет сформировать структуру как регионального [3, 4], так и всеобъемлющего непрерывного покрытия различной кратности [5–9]. Кроме того, указанный подход применяется для систем оперативного глобального мониторинга поверхности Земли [4–6, 10, 11].

На этапе проектирования такого рода СС, имеющих однородную структуру – с одинаковыми наклонениями и большими полуосями орбит, как правило, полагают, что орбиты номинально круговые и задаются равномерным сдвигом КА в плоскости по аргументу широты. Также они задаются некоторыми номинальными параметрами и при формировании комбинированных орбитальных структур [8, 9], включающих, кроме того, эллиптические орбиты [12].

При фактической реализации проектов по развертыванию таких СС необходимо решать задачу, связанную с формированием орбитальной плоскости, состоящей из заданного количества КА. Это, в свою очередь, требует уточнения конкретного номинального положения каждого из аппаратов с учетом погрешностей выведения на орбиту, а также влияния возмущающих факторов, учитываемых при движении КА. Наиболее существенным из них является полюсное сжатие Земли, приводящее к отклонению реальной орбиты движения КА от круговой [2, 3, 12].

Таким образом, следует вносить поправки в номинальные параметры

орбит каждого КА при их расстановке в заданные фазовые положения. Для этого, в рамках представленной статьи, будут использоваться классические подходы по аналитическому учету возмущений номинальной (оскулирующей) орбиты в зависимости от заданных начальных параметров, которые рассмотрены в ряде публикаций [7, 12, 13].

Сама расстановка КА в указанной орбитальной плоскости может производиться путем довыведения каждого из них с опорной орбиты на рабочую [1, 14, 15] с помощью собственной двигательной установки [16] или самим средством выведения с использованием специальных маневров перефазирования, например, по схеме, изложенной в работе [1]. В любом случае при развертывании многочисленных группировок КА в одной орбитальной плоскости для обеспечения безопасности их последующего совместного полета необходимо минимизировать отклонения каждого из них от своего номинального фазового положения по отношению к другим КА в группе.

Постановка задачи

В рамках настоящей статьи, опираясь на уравнения по определению поправок к оскулирующим параметрам орбит, сначала приведем аналитическую модель и порядок ее использования. На втором этапе проведем сравнение точности такого приближения для различных моделей учета других возмущений (более старших гармоник потенциала Земли, влияния атмосферы, притяжения Луны и Солнца). Третьим этапом станет анализ устойчивости номинально выбранного таким путем построения СС на примере одной орбитальной плоскости для различных моделей возмущений. В результате будут сформированы предложения по

области использования рассмотренной аналитической модели движения КА в заданной орбитальной плоскости, а также рекомендации по учитываемому составу возмущаемых факторов при определении номинального орбитального построения СС на этапе выведения и расстановки КА по рабочим фазовым положениям.

В качестве номинальной рассмотрим орбиту с высотами перигея и апогея $h_p/h_a = 200/400$ км. Наклонение орбиты $i = 0^\circ$, а аргумент перигея $\omega = 30^\circ$. Начальное положение первого КА в сегменте соответствует восходящему узлу. В состав сегмента СС включены шесть КА с равномерным сдвигом по аргументу широты $\Delta u = 60^\circ$. При этом все КА имеют одинаковый баллистический коэффициент $S_b = 0,01$ м²/кг.

Аналитическая модель расчета поправок

При задании исходных данных о движении КА в виде классических орбитальных элементов используют следующий набор параметров: $[a, e, i, \Omega, \omega, \vartheta]$, где a – большая полуось орбиты; e – эксцентриситет; i – наклонение; Ω – долгота восходящего узла; ω – аргумент перигея орбиты; ϑ – истинная аномалия. При этом данные параметры могут быть преобразованы в более удобную для расчета поправок форму. В частности, большая полуось заменяется фокальным параметром орбиты p с учетом уравнения:

$$p = a \cdot (1 - e^2). \quad (1)$$

Также угол истинной аномалии можно заменить на аргумент широты КА в виде:

$$u = \omega + \vartheta. \quad (2)$$

В результате получится сформировать следующий набор оскулирующих



При развертывании многочисленных группировок КА в одной орбитальной плоскости для обеспечения безопасности их последующего совместного полета необходимо минимизировать отклонения каждого из них от своего номинального фазового положения по отношению к другим КА в группе.

орбитальных параметров: $[p, e, i, \Omega, \omega]$, зависящих от аргумента широты u . Каждый из них с учетом нецентральной гравитационного поля Земли или иных возмущений будет иметь поправки как функции заданного аргумента широты. Так, из системы дифференциальных уравнений в оскулирующих элементах согласно работам [7, 13] после интегрирования в пределах $[u_0, u_k]$ можно записать следующую совокупность уравнений для определения этих поправок с учетом только второй зональной гармоники:

$$\begin{aligned}
\delta p &= \frac{\varepsilon \cdot \sin^2 i}{\mu \cdot p} \left[\cos 2u + e \cdot \left(\cos(u + \omega) + \frac{1}{3} \cdot \cos(3u - \omega) \right) \right]_{u_0}^{u_k}; \\
\delta e &= \frac{\varepsilon}{\mu \cdot p^2} \left[\begin{aligned} &D_1 \cos(u - \omega) + D_2 \cos(u + \omega) + D_3 \cos(3u - \omega) + \\ &+ e \cdot [D_4 \cos 2u + D_5 \cos(2u - 2\omega) + D_6 \cos(4u - 2\omega)] + \\ &+ e^2 \cdot [D_7 \cos(3u - 3\omega) + D_8 \cos(u - 3\omega) + D_8 \cos(5u - 3\omega)] \end{aligned} \right]_{u_0}^{u_k}; \\
\delta i &= \frac{\varepsilon \sin 2i}{4 \cdot \mu \cdot p^2} \left[\cos 2u + e \cdot \left(\cos(u + \omega) + \frac{1}{3} \cdot \cos(3u - \omega) \right) \right]_{u_0}^{u_k}; \\
\delta \Omega &= -\frac{\varepsilon \cos i}{\mu \cdot p^2} \left[u - \frac{1}{2} \sin 2u + e \cdot \left(\sin(u - \omega) - \frac{1}{2} \sin(u + \omega) - \frac{1}{6} \cdot \sin(3u - \omega) \right) \right]_{u_0}^{u_k}; \\
\delta \omega &= \frac{\varepsilon}{\mu \cdot p^2} \left[\begin{aligned} &S_0 \cdot u + \frac{1}{e} [S_1 \sin(u - \omega) + S_2 \sin(u + \omega) + S_3 \sin(3u - \omega)] + \\ &+ \left(\frac{1}{2} - D_4 \right) \cdot \sin 2u + D_5 \sin(2u - 2\omega) + D_6 \sin(4u - 2\omega) + \\ &+ e \cdot [D_7 \sin(3u - 3\omega) + D_8 \sin(u - 3\omega) + D_8 \sin(5u - 3\omega)] \end{aligned} \right]_{u_0}^{u_k},
\end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned}
\mu &= 398600,44 \text{ км}^3/\text{с}^2; \\
D_1 &= -\left(1 + \frac{e^2}{4}\right) \cdot \left(\frac{3}{2}k - 1\right); & S_0 &= 2 - \frac{5}{2}k; S_1 = 1 + \frac{7}{4}e^2 - \left(\frac{3}{2} + \frac{17}{8}e^2\right) \cdot k; \\
D_2 &= \frac{1}{4} \left(1 + \frac{11}{4}e^2\right) \cdot k; & S_2 &= -\frac{1}{4} \left(1 - \frac{15}{4}e^2\right) \cdot k - \frac{1}{2}e^2; \\
D_3 &= \frac{1}{12} \left(7 + \frac{17}{4}e^2\right) \cdot k; D_4 = \frac{5}{4} \cdot k; & S_3 &= \frac{1}{12} \left(7 + \frac{19}{4}e^2\right) \cdot k - \frac{1}{6}e^2. \\
D_5 &= -\frac{1}{2} \left(\frac{3}{2}k - 1\right); D_6 = \frac{3}{8}k; \\
D_7 &= -\frac{1}{12} \left(\frac{3}{2}k - 1\right); \\
D_8 &= \frac{1}{16}k; \\
k &= \sin^2 i;
\end{aligned}$$

Для случаев, близких к круговым орбитам, когда начальный эксцентриситет равен или мало отличается от нуля, могут быть использованы следующие преобразования, устраняющие данную особенность. Заменим эксцентриситет и аргумент перигея двумя новыми параметрами:

$$\lambda_1 = e \cdot \sin \omega; \lambda_2 = e \cdot \cos \omega. \quad (4)$$

Тогда система уравнений (3) переписывается согласно работе [7] в виде:

$$\begin{aligned}
\delta\lambda_1 &= \frac{\varepsilon}{\mu \cdot p^2} \left[\begin{aligned} &\left(1 - \frac{7}{4}k + \lambda_1^2 \cdot \left(\frac{1}{4} - \frac{9}{8}k\right) + \lambda_2^2 \cdot \left(\frac{5}{4} - \frac{9}{8}k\right)\right) \cdot \sin u + \\ &+ \left(\frac{7}{12}k + \lambda_1^2 \cdot \left(-\frac{1}{12} + \frac{23}{48}k\right) + \lambda_2^2 \cdot \left(-\frac{1}{12} + \frac{13}{48}k\right)\right) \cdot \sin 3u + \\ &+ \lambda_1 \cdot \left(\left(-\frac{1}{2} + 2k\right) \cdot \cos 2u - \frac{3}{8}k \cdot \cos 4u\right) + \\ &+ \lambda_2 \cdot \left(\left(2 - \frac{5}{2}k\right) \cdot u + \frac{1}{2}k \sin 2u + \frac{3}{8}k \sin 4u\right) + \frac{1}{16}k \cdot (\lambda_2^2 - \lambda_1^2) \cdot \sin 5u + \\ &+ \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \left(\left(-2 + \frac{13}{4}k\right) \cdot \cos u + \frac{5}{24}k \cdot \cos 3u - \frac{1}{8}k \cdot \cos 5u\right) \end{aligned} \right]_{u_0}^{u_k}; \\
\delta\lambda_2 &= \frac{\varepsilon}{\mu \cdot p^2} \left[\begin{aligned} &\left(1 - \frac{5}{4}k + \lambda_1^2 \cdot \left(\frac{9}{4} - \frac{25}{8}k\right) + \lambda_2^2 \cdot \left(\frac{1}{4} + \frac{3}{8}k\right)\right) \cdot \cos u + \\ &+ \left(\frac{7}{12}k + \lambda_1^2 \cdot \left(-\frac{1}{4} + \frac{25}{48}k\right) + \lambda_2^2 \cdot \left(\frac{1}{12} + \frac{11}{48}k\right)\right) \cdot \cos 3u + \\ &+ \lambda_1 \cdot \left(-\left(2 - \frac{5}{2}k\right) \cdot u + (1 - 2k) \cdot \sin 2u + \frac{3}{8}k \sin 4u\right) + \\ &+ \lambda_2 \cdot \left(\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}k\right) \cdot \cos 2u + \frac{3}{8}k \cos 4u\right) + \frac{1}{16}k \cdot (\lambda_2^2 - \lambda_1^2) \cdot \cos 5u + \\ &+ \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \left(\left(\frac{1}{4}k - 1\right) \cdot \sin u + \left(\frac{1}{3} - \frac{7}{24}k\right) \cdot \sin 3u + \frac{1}{8}k \cdot \sin 5u\right) \end{aligned} \right]_{u_0}^{u_k}; \\
\delta\Omega &= -\frac{\varepsilon \cos i}{\mu \cdot p^2} \left[u - \frac{1}{2} \sin 2u + \lambda_1 \cdot \left(-\frac{3}{2} \cos u + \frac{1}{6} \cos 3u\right) + \lambda_2 \cdot \left(\frac{1}{2} \sin u - \frac{1}{6} \sin 3u\right) \right]_{u_0}^{u_k}; \\
\delta i &= \frac{\varepsilon \sin 2i}{4\mu \cdot p^2} \left[\cos 2u + \lambda_1 \cdot \left(-\sin u + \frac{1}{3} \sin 3u\right) + \lambda_2 \cdot \left(\cos u + \frac{1}{3} \cos 3u\right) \right]_{u_0}^{u_k}; \\
\delta p &= \frac{\varepsilon \sin^2 i}{\mu \cdot p} \left[\cos 2u + \lambda_1 \cdot \left(-\sin u + \frac{1}{3} \sin 3u\right) + \lambda_2 \cdot \left(\cos u + \frac{1}{3} \cos 3u\right) \right]_{u_0}^{u_k}.
\end{aligned} \tag{5}$$

Обратный пересчет к орбитальным элементам e и ω может быть осуществлен с помощью уравнений:

$$e = \sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}; \quad \omega = \arctan(\lambda_1/\lambda_2). \tag{6}$$

Тогда орбитальные параметры с учетом возмущений (индекс «В») в общем виде могут быть записаны следующим образом:

$$\Omega_B(u_j) = \Omega_0 + \delta\Omega(u_j);$$

$$\begin{aligned}
i_B(u_j) &= i_0 + \delta i(u_j); \\
\lambda_{1_B}(u_j) &= \lambda_{1_0} + \delta\lambda_1(u_j); \\
\lambda_{2_B}(u_j) &= \lambda_{2_0} + \delta\lambda_2(u_j); \\
p_B(u_j) &= p_0 + \delta p(u_j); \\
e_B(u_j) &= e_0 + \delta e(u_j); \\
\omega_B(u_j) &= \omega_0 + \delta\omega(u_j),
\end{aligned} \tag{7}$$

где параметры с индексом «0» соответствуют начальным данным для аргумента

широты u_0 . В данном случае это орбитальные параметры первого КА в сегменте. На практике бывает более удобным задавать вместо фокального параметра орбиты p большую полуось. Тогда для этого элемента с учетом формулы (1) можно записать:

$$a_B(u_j) = a_0 + \delta a(u_j) = \frac{p_0 + \delta p(u_j)}{1 - (e_0 + \delta e(u_j))^2}. \quad (8)$$

Указанные орбитальные параметры с учетом их привязки к единому моменту времени позволяют определить положение КА на соответствующей орбите для заданных аргументов широты u_j .

Методика определения номинальных параметров орбит

В целом порядок расчетов можно изложить следующим образом. Пусть задан набор орбитальных элементов первого КА в сегменте в виде $[p_0, e_0, i_0, \Omega_0, \omega_0]$ и его начальный аргумент широты u_0 . Если задана большая полуось орбиты КА, то с использованием уравнения (1) предварительно рассчитывается начальный фокальный параметр p_0 . Затем для общего случая орбит с произвольным эксцентриситетом рассчитываются по формулам (4) компоненты $\lambda_{1,0}$ и $\lambda_{2,0}$. При заданной численности КА в сегменте и сдвигах каждого из них относительно первого аппарата по уравнениям (5) находятся соответствующие поправки к орбитальным элементам на указанные аргументы широты u_j . Далее с использованием формул (7) определяются возмущенные параметры орбит каждого КА в сегменте. При необходимости по формуле (8) могут быть определены значения большой полуоси, а по формулам (6) рассчитаны оскулирующие эксцентриситеты и аргументы перигея орбит на моменты u_j . Полученные таким образом

параметры орбит задают начальное положение КА в одной орбитальной плоскости. Аналогичным образом может быть получено построение и для других орбитальных плоскостей при задании параметров орбиты одного из КА в данной плоскости.

Оценка точности приближения номинальной орбиты

Предварительную оценку точности проведем по величине изменения драконического периода обращения КА по орбите за один виток. При учете только второй зональной гармоники J_2 за виток полета КА по орбите трасса имеет вековое смещение по долготе восходящего узла. Таким образом, участок времени полета между двумя восходящими узлами определяет драконический период, который имеет отличия от оскулирующего (за который КА делает полный виток) и зависит от наклона орбиты. Приближенная формула для расчета драконического периода согласно работе [12] может быть записана с учетом оскулирующего периода T_0 в следующем виде:

$$T_d = T_0 - \Delta T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} - \frac{2\pi}{\sqrt{\mu \cdot a}} \cdot \frac{\varepsilon}{\mu} \times \left[3 - \frac{5}{2} \cdot \sin^2 i - e \cdot \cos \omega \cdot (1 - 5 \sin^2 i) \right]. \quad (9)$$

Участок времени полета между двумя восходящими узлами определяет драконический период, который имеет отличия от оскулирующего (за который КА делает полный виток) и зависит от наклона орбиты.

Таблица 1

Погрешности прогноза по драконическому периоду ($\delta T_{др}(u = 2\pi)$)

Параметры орбиты	Гравитация	Возмущения		Примечание
		Отклонения, с	Отклонения, %	
$h_p/h_a = 200/400$ км; $e = 0,01497$; $a = 6678,14$ км; $p = 6676,6426$ км; $i = 80^\circ$; $\omega = 30^\circ$; $T_0 = 5431,177863$ с	J_2	-5,019132	0,0924	Относительно T_0
	J_{22}	+0,047739	0,9511	Относительно T_{J_2}
	J_3	-0,000216	0,00430	
	J_4	-0,013416	0,2673	
	J_{44}	-0,093100	1,855	
	Атмосфера, $S_b = 0,01$ м ² /кг	-0,665709	13,263	
	Луна	-0,000363	0,00723	
	Солнце	-0,000168	0,00335	

В данном случае чем больше наклонение, тем меньше отличия драконического и оскулирующего периодов.

В качестве основных вариантов дополнительных возмущений рассмотрим зональные гармоники (J_3 и J_4), а также четные тессеральные и секториальные гармоники (J_{22} и J_{44}). Кроме того, оценим влияние статической модели атмосферы и притяжения Луны и Солнца. Для случая учета второй зональной гармоники в качестве погрешности будем оперировать

отличием драконического периода от оскулирующего. Для сравнения остальных возмущений по отдельности будем определять погрешности как отличия драконических периодов только с учетом J_2 и совместно двух возмущений. В табл. 1 представлены результаты сравнения.

По результатам анализа влияния рассмотренных возмущений на орбитальное движение КА следует отметить:

1. Влияние более старших зональных гармоник J_3 и J_4 на 2–3 порядка меньше,

Изображение: cont.ws

Поправки к номинальной орбите для КА в сегменте

Параметры для КА _i	Поправки	КА ₂	КА ₃	КА ₄	КА ₅	КА ₆
$u_i = 0^\circ$	u_i	60	120	180	240	300
$p_0 = 6676,6426$ км	δp_j	-14,60586	-14,47359	-0,33194	-14,52288	-14,48138
$e_0 = 0,0149742$	δe_j	-0,001817	-0,000007	-0,000908	0,000804	-0,000902
$a_0 = 6678,1370$ км	δa_j	-14,94975	-14,66495	-0,50814	-14,36138	-14,6592
$i_0 = 80,000000^\circ$	δi_j	-0,01105	-0,011082	-0,00025	-0,010987	-0,010956
$\Omega_0 = 90,000000^\circ$	$\delta \Omega_j$	-0,009187	-0,037607	-0,046629	-0,055558	-0,083573
$\omega_0 = 30,000000^\circ$	$\delta \omega_j$	-0,049847	-3,961013	1,890982	1,957243	5,6691383

чем J_2 , и может не учитываться в номинальных моделях выбора параметров орбит КА.

2. Учет тессеральных и секториальных гармоник (до J_{22} и до J_{44}) компенсирует погрешность расчета драконического периода в пределах 0,1 с.

3. Атмосфера для низких орбит оказывает ощутимое влияние и пропорционально зависит от баллистического коэффициента КА. При S_b порядка 0,01 м²/кг погрешность расчета периода может достигать 0,67 с. Кроме того, ее влияние имеет накопительный эффект и слабо зависит от наклона орбиты.

4. Притяжения Луны и Солнца на данной орбите пренебрежимо малы и могут быть отброшены. Для средних околоземных и высокоэллиптических орбит их следует учитывать как значимые по сравнению с атмосферой и аномалиями гравитационного поля Земли.

Погрешность довыведения КА на рабочую орбиту является соизмеримой по величине с оцененными по драконическому периоду ошибками от старших гармоник гравитационного поля и формирование более сложной модели для определения номинальных параметров орбит КА в сегменте не целесообразно.

В результате для дальнейшего анализа в части возмущений гравитационного

поля учтем J_2 (как основное возмущение) и сравним его с дополнительным влиянием J_{22} и J_{44} . Воздействие атмосферы рассмотрим для максимального S_b порядка 0,01 м²/кг. При рассмотрении притяжений Луны и Солнца следует определить большие полуоси и максимальные эксцентриситеты эллиптических орбит, для которых данное влияние на драконический период будет соизмеримо с атмосферой и выбранными аномалиями гравитационного поля.

Для определения степени подробности разложения в ряды функций при оценке времени полета на витке следует ориентироваться на погрешность расчета не хуже 0,1 с на одном витке.

Определение поправок к параметрам орбиты

С учетом представленных расчетных соотношений для заданной выше номинальной орбиты и фазовых сдвигов КА на ней поправки к этим параметрам будут иметь следующие значения (табл. 2).

Как видно из таблицы, требуемая корректировка орбиты других КА в сегменте особенно по большой полуоси является существенной (порядка 15 км) и оказывает влияние на время полета КА на витке.

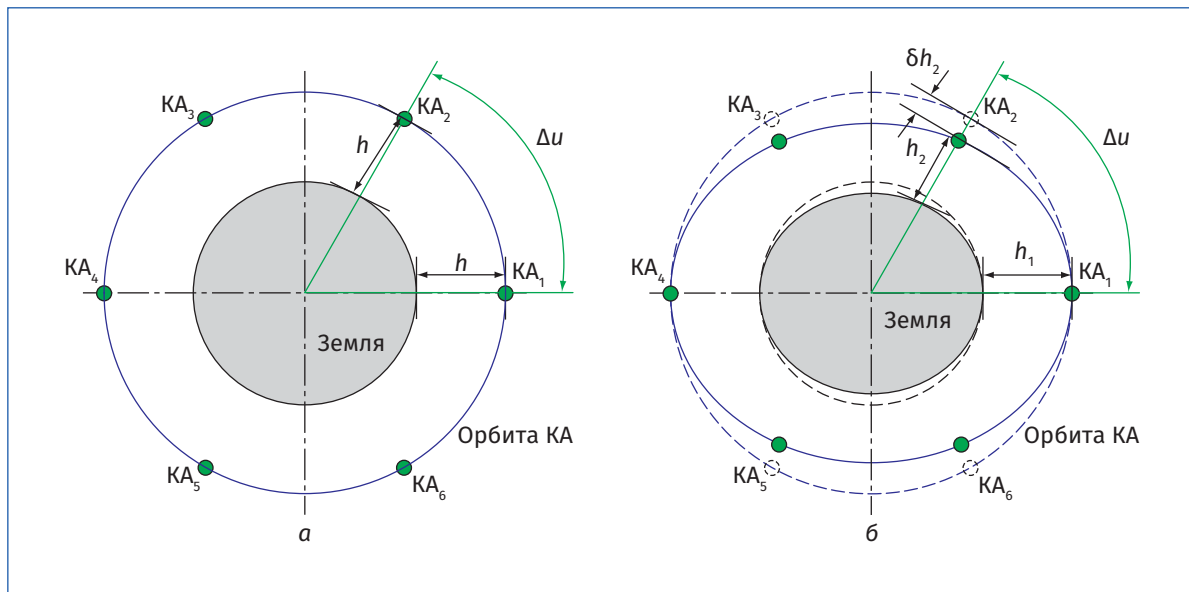


Рис. 1. Фактическая орбита движения КА: а – центральное поле; б – учет J_2

Поясним это рис. 1. На рис. 1, а показана модельная круговая орбита по отношению к сферической поверхности Земли, для которой смещение КА по аргументу широты не приводит к изменению высоты их полета. На рис. 1, б – приближенная к реальной картина с учетом J_2 , когда форма Земли задается осредненным эллипсоидом вращения, сплюснутым в районе полюсов, а орбита КА в первом приближении как бы отслеживает форму Земли.

В результате при смещении по аргументу широты КА необходимо делать поправку по большой полуоси, чтобы аппарат оставался на той же траектории движения. Аналогичная картина характерна и для других параметров орбиты.

Теперь проведем сравнение на примере изменения взаимного фазового положения между первым и вторым КА в сегменте на интервале двух витков (~181 мин) без учета данных поправок к параметрам орбит и вместе с ними. На

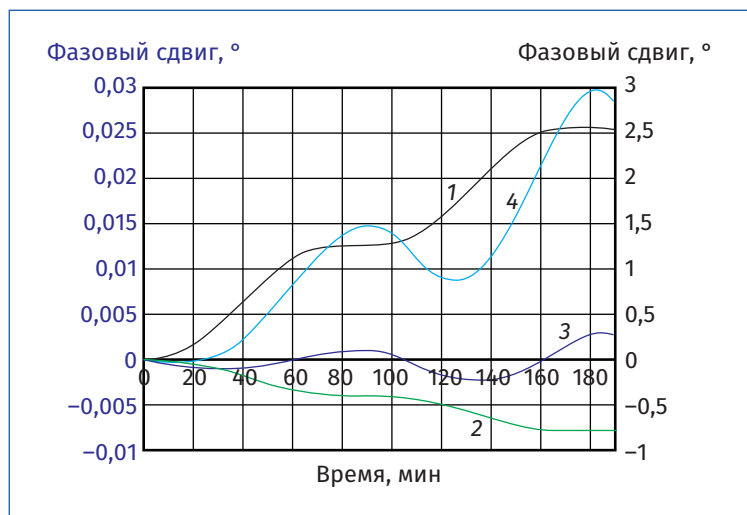


Рис. 2. Изменение фазового положения между соседними КА

рис. 2 представлен соответствующий график. По правой оси отложено изменение фазового сдвига в градусах от номинального значения для случая, когда орбита второго КА относительно первого задается простым смещением по фазовому углу (кривая 1), а по левой – те же изменения, но при выборе начальных параметров орбиты КА с учетом поправок (кривые 2–4).



Изображение: фотобанк ЛОРИ

Реализация на борту алгоритмов поддержания орбиты на основе изложенной модели движения с учетом полюсного сжатия J_2 позволит как снизить затраты топлива, так и повысить точность удержания относительного положения КА в процессе их группового полета.

Цвета линий соответствуют следующим вариантам:

учет гармоник, включая J_{22} (кривая 2);

учет гармоник, включая J_{44} (кривая 3);

учет только атмосферного торможения (кривая 4).

Как видно из графика, выбор номинальных параметров орбиты КА по изложенной методике позволяет на 2–3 порядка уменьшить взаимную эволюцию фазового сдвига КА на витках полета. Причем следующим существенным фактором,

требующим учета в формировании более точной номинальной модели движения КА в СС для низких орбит, является атмосферное торможение.

Стоит обратить внимание, что за один виток полета эволюция взаимного фазового положения для модели движения с учетом J_{22} составляет порядка $0,0039^\circ$, а для модели с учетом J_{44} – $0,001^\circ$. При указанной средней высоте полета эти колебания эквивалентны смещению относительного расстояния вдоль орбиты по-

рядка 450 и 120 м соответственно. Данные величины уже соизмеримы с ошибками прогноза положения КА, получаемыми по результатам обработки измерений бортовой аппаратуры спутниковой навигации на низких орбитах.

Таким образом, рассмотренная методика выбора номинальных параметров движения для КА в одной орбитальной плоскости является достаточной при определении параметров траектории при групповом выведении и развертывании сегмента СС, в состав которого может входить от нескольких десятков до сотни КА. При этом взаимная эволюция относительного положения КА оказывается достаточно малой, что обеспечивает безопасность совместного полета многочисленных группировок КА особенно на начальном этапе развертывания сегмента СС, когда фазовые смещения между ними составляют единицы градусов. Кроме того, реализация на борту алгоритмов поддержания орбиты на основе изложенной модели движения с учетом полюсного сжатия J_2 позволит как снизить затраты топлива, так и повысить точность удержания относительного положения КА в процессе их группового полета.

Следует отметить, что отдельного рассмотрения заслуживают сравнение уровня влияния различных возмущений для круговых и эллиптических орбит и выявление соответствующих реперных высот, на которых происходит выравнивание этого эффекта от различных фак-

торов. Данный вопрос будет подробнее рассмотрен в следующей статье.

Выводы

В статье описана аналитическая модель расчета номинальных параметров орбиты КА при размещении их в заданной орбитальной плоскости с требуемым сдвигом по аргументу широты. Указанная модель учитывает основное возмущение от нецентральности гравитационного поля Земли – полюсное сжатие. Выбор первичных параметров орбиты, проведенный таким образом, позволяет сформировать номинально устойчивую структуру СС, имеющую погрешности прогнозирования движения КА на уровне возмущений от более старших гармоник гравитационного поля и уступающих влиянию атмосферного торможения, особенно на низких околоземных орбитах. Предложенный порядок определения начальных параметров КА в заданной орбитальной плоскости целесообразно использовать для формирования схемы группового выведения КА с расстановкой их в заданные фазовые положения на рабочей траектории. С учетом наметившейся тенденции к увеличению численности КА в одной орбитальной плоскости, выводимых одним запуском, выбор параметров движения каждого КА по изложенной методике позволяет повысить безопасность их последующего группового полета на этапе развертывания СС.

Список литературы

1. Способ выведения космических аппаратов на орбиту: пат. Рос. Федерация. № 2794486 / Т.С. Гавриленко, А.В. Глушков, Д.А. Зельвин, С.Ю. Улыбышев, С.М. Храмов: по заявке № 2023100236. 2023. Бюл. № 11.
2. Дубошин Г.Н. Небесная механика. Аналитические и качественные методы. Изд. 2-е, перераб. М.: Наука, 1978. 456 с.
3. Кичигина О.К., Улыбышев Ю.П. Система спутников дистанционного зондирования Земли на двух круговых орбитах // Космонавтика и ракетостроение. 2011. № 4 (65). С. 38–46.

4. Лысенко А.А., Улыбышев С.Ю. Выбор параметров орбиты космического аппарата для оперативного глобального мониторинга поверхности Земли // *Космонавтика и ракетостроение*. 2016. № 5 (90). С. 45–56.
5. Лысенко А.А., Улыбышев С.Ю. Методика орбитального построения спутниковых систем для решения задачи оперативного глобального мониторинга // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2017. № 11 (71).
6. Лысенко А.А., Улыбышев С.Ю. Построение спутниковых систем оперативного глобального мониторинга поверхности Земли с перерывом в наблюдении, не превышающем периода одного витка // *Космонавтика и ракетостроение*. 2018. № 3 (102). С. 65–73.
7. Основы теории полета и элементы проектирования искусственных спутников Земли / М.К. Тихонравов, О.В. Гурко [и др.]. М.: Машиностроение, 1974. 332 с.
8. Улыбышев С.Ю. Комбинированные спутниковые системы непрерывного глобального обзора на экваториальной и полярных круговых орбитах // *Космические исследования*. 2015. Т. 53, № 4. С. 332–344.
9. Улыбышев С.Ю. Неоднородные спутниковые системы глобального обзора на экваториальной и приполярных круговых орбитах // *Космические исследования*. 2016. Т. 54, № 4. С. 323–333.
10. Улыбышев С.Ю. Применение солнечно-синхронных орбит для космического аппарата оперативного глобального мониторинга // *Космические исследования*. 2016. Т. 54, № 6. С. 486–492.
11. Улыбышев С.Ю., Лысенко А.А. Проектирование спутниковых систем оперативного глобального мониторинга с суточной кратностью повторения трассы полета // *Космические исследования*. 2019. Т. 57, № 3. С. 229–238.
12. Эльясберг П.Е. Введение в теорию полета искусственного спутника Земли. М.: Наука, 1965. 540 с.
13. Основы теории полета космических аппаратов / Под ред. Г.С. Нариманова и М.К. Тихонравова. М.: Машиностроение, 1972. 608 с.
14. Улыбышев С.Ю. Анализ взаимной эволюции параметров двух синхронно прецессирующих орбит // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2016. Вып. 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/arse/adb/1471.html> (дата обращения: 10.12.2023). DOI 10.18698/2308-6033-2016-03-1471.
15. Улыбышев С.Ю. Выведение группировки микроспутников с использованием промежуточной орбиты с синхронной прецессией // *Труды МАИ*. 2018. № 98. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90354> (дата обращения: 10.12.2023).
16. Блок реактивных двигателей космического аппарата: пат. Рос. Федерация. № 170380 / С.Ю. Улыбышев, Т.С. Гавриленко, А.В. Глушков: заявл. 25.07.2016; опублик. 24.04.2017. Бюл. № 12. 9 с.

References

1. *Sposob vyvedeniya kosmicheskikh apparatov na orbitu: pat. Ros. Federaciya. № 2794486* [Method of launching spacecraft into orbit: Pat. Grew. Federation. N 2794486]. Gavrilenko T.S., Glushkov A.V., Zelvin D.A., Ulybyshev S.Yu., Khramov S.M.: according to application N 2023100236, 2023, Bul. N 11. (In Russ.).
2. Duboshin G.N. *Nebesnaya mekhanika. Analiticheskie i kachestvennye metody. Izd. 2-e, pererab.* [Celestial mechanics. Analytical and qualitative methods. Ed. 2nd, revised]. Moscow, Science, Publ., 1978, 456 p. (In Russ.).
3. Kichigina O.K., Ulybyshev Yu.P. System of Earth remote sensing satellites in two circular orbits. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and rocket science], 2011, N 4 (65), pp. 38–46. (In Russ.).
4. Lysenko A.A., Ulybyshev S.Yu. Selection of spacecraft orbit parameters for operational global monitoring of the Earth's surface. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and rocket science], 2016, N 5 (90), pp. 45–56. (In Russ.).
5. Lysenko A.A., Ulybyshev S.Yu. Methods of orbital construction of satellite systems for solving the problem of operational global monitoring. *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii* [Engineering journal: science and innovation], 2017, N 11 (71). (In Russ.).
6. Lysenko A.A., Ulybyshev S.Yu. Construction of satellite systems for operational global monitoring of the Earth's surface with a break in observation not exceeding the period of one orbit. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and rocket science], 2018, N 3 (102), pp. 65–73. (In Russ.).
7. *Osnovy teorii poleta i elementy proektirovaniya iskusstvennyh sputnikov Zemli* [Fundamentals of flight theory and design elements of artificial Earth satellites]. M.K. Tikhonravov, O.V. Gurko [et al.]. Moscow, Mechanical Engineering Publ, 1974, 332 p. (In Russ.).
8. Ulybyshev S.Yu. Combined satellite systems of continuous global view in equatorial and polar circular orbits. *Kosmicheskie issledovaniya* [Space research], 2015, V. 53, N 4, pp. 332–344. (In Russ.).
9. Ulybyshev S.Yu. Inhomogeneous satellite systems of global view in equatorial and circumpolar circular orbits. *Kosmicheskie issledovaniya* [Space research], 2016, V. 54, N 4, pp. 323–333. (In Russ.).
10. Ulybyshev S.Yu. Application of sun-synchronous orbits for operational global monitoring spacecraft. *Kosmicheskie issledovaniya* [Space research], 2016, V. 54, N 6, pp. 486–492. (In Russ.).

11. Ulybyshev S.Yu., Lysenko A.A. Design of satellite systems for operational global monitoring with a daily repetition rate of the flight route. *Kosmicheskie issledovaniya* [Space research], 2019, V. 57, N 3, pp. 229–238. (In Russ.).
12. Elyasberg P.E. *Vvedenie v teoriyu poleta iskusstvennogo sputnika Zemli* [Introduction to the theory of flight of an artificial Earth satellite]. Moscow, Science, Publ., 1965, 540 p. (In Russ.).
13. *Osnovy teorii poleta kosmicheskikh apparatov* [Fundamentals of spacecraft flight theory]. Ed. G.S. Nari-manova and M.K. Tikhonravova. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 1972, 608 p. (In Russ.).
14. Ulybyshev S.Yu. Analysis of mutual evolution of parameters of two synchronously precessing orbits. *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2016, issue 3. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/arise/adb/1471.html> (accessed: 10 december 2023), DOI: 10.18698/2308-6033-2016-03-1471. (In Russ.).
15. Ulybyshev S.Yu. Derivation of a microsatellite constellation using an intermediate orbit with synchronous precession. *Trudy MAI* [Proceedings of the Moscow Aviation Institute], 2018, N 98. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90354> (accessed: 10 december 2023). (In Russ.).
16. *Blok reaktivnykh dvigatelej kosmicheskogo apparata: pat. Ros. Federaciya. № 170380* [Spacecraft Jet Propulsion Unit: Fri. Grew. Federation. N 170380]. Ulybyshev S.Yu., Gavrilenko T.S., Glushkov A.V.: zayavl. 25.07.2016; opubl. 24.04.2017, Bul. N 12, 9 p. (In Russ.).

Поступила в редакцию: 22.01.2024

Одобрена рецензентами: 22.03.2024

Принята к печати: 27.03.2024

Об авторах

Сергей Юрьевич Улыбышев* – доктор технических наук, сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики». Адрес для почтовых отправлений: 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А. E-mail: orgsertifica@cniihm.ru.

Sergey Yu. Ulybyshev* – Grand PhD in Engineering sciences, SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics». Postal address: 16A Nagatinskaya str., Moscow, 115487. E-mail: orgsertifica@cniihm.ru.

Сергей Михайлович Храмов – кандидат технических наук, сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики».

Sergey M. Khramov – PhD in Engineering sciences, employee of SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics».

Александр Александрович Лысенко – кандидат технических наук, сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики».

Alexander A. Lysenko – PhD in Engineering sciences, employee of SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics».

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

УДК 533.9:537.86/87

СПОСОБ ОЦЕНКИ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ФАКЕЛА ПЛАЗМЕННОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ В ДИАПАЗОНЕ РАДИОЧАСТОТ

Е.П. КОЛЕСНИКОВ, к.т.н., М.Н. КУПИН, И.В. ЧЕРВЯКОВ,
ООО «Научно-производственный центр «СОТИС»

Аннотация. Представлен способ оценки теплового излучения плазмы факела ракетного двигателя в диапазоне радиочастот. Разработаны термодинамическая и радиотехническая модели – мощности и уровня создаваемых помех – пламени силовой установки. Проведены оценка разработанных моделей на примере ПДУ-70 в диапазоне частот $100 \text{ МГц} \leq f \leq 20 \text{ ГГц}$, и сравнение расчетных и экспериментальных данных. Результаты работы можно распространить на другие плазменные двигатели при определенных предположениях.

Ключевые слова: ПЛАЗМЕННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ; ИЗЛУЧЕНИЕ ФАКЕЛА; РАДИОДИАПАЗОН;
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ; РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА; КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ.

Для цитирования: Колесников Е.П., Купин М.Н., Червяков И.В. Способ оценки теплового излучения факела плазменного ракетного двигателя в диапазоне радиочастот // Перспективные технологии для систем безопасности. 2024. № 1 (3). С. 40–62.

Постановка задачи

Вопросу излучения помех плазменными двигателями в различных диапазонах волн посвящено достаточно много работ, в том числе экспериментальных, как отечественных [1–3], так и зарубежных авторов [4–6]. Однако в этих работах не приводится модель излучения факела плазменного двигателя в радиодиапазоне, хотя такая модель представляет не только теоретический интерес, но и необходима для оценки электромагнитной совместимости (ЭМС) излучения факела с радиоэлектронными средствами (РЭС), установленными на космическом аппарате (КА). В

предлагаемой работе представлен способ оценки норм теплового излучения факела плазменной двигательной установки (ПДУ) в диапазоне радиочастот. Сначала рассматривается термодинамическая модель излучения факела как абсолютно черного тела и, далее, радиотехническая модель, в которой факел одновременно является и передатчиком, и антенной.

Геометрия рассматриваемой задачи схематично представлена на рис. 1. Размеры факела существенно меньше размеров КА.

Часть теплового излучения факела ПДУ КА приходится на радиодиапазон,

A METHOD FOR ESTIMATING THE THERMAL RADIATION OF A TORCH PLASMA ROCKET ENGINE IN THE RADIO FREQUENCY RANGE

Изображение: digitalosept.ru

E.P. KOLESNIKOV, PhD in Engineering, M.N. KUPIN, I.V. CHERVYAKOV,
LLC «Scientific and production center «SOTIS»

Abstract. A method for estimating the thermal radiation of the plasma of an engine flare in the radio frequency range is presented. Thermodynamic and radio engineering models of the power and level of interference generated by the flame of the power plant have been developed. The distortion level was estimated using the example of the remote control PDU-70 in the frequency range $100 \text{ MHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz}$ and a comparison of calculated and experimental data was carried out. The results of the work can be extended to other plasma engines under certain assumptions.

Keywords: PLASMA ENGINE; FLARE RADIATION; RADIO RANGE; ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY; RADIO ELECTRONIC MEANS; SPACECRAFT.

For citation: Kolesnikov E.P., Kupin M.N., Chervyakov I.V. A method for estimating the thermal radiation of a torch plasma rocket engine in the radio frequency range. *Perspektivnye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti* [Promising technologies for security systems], 2024, N 1 (3), pp. 40–62. (In Russ.).

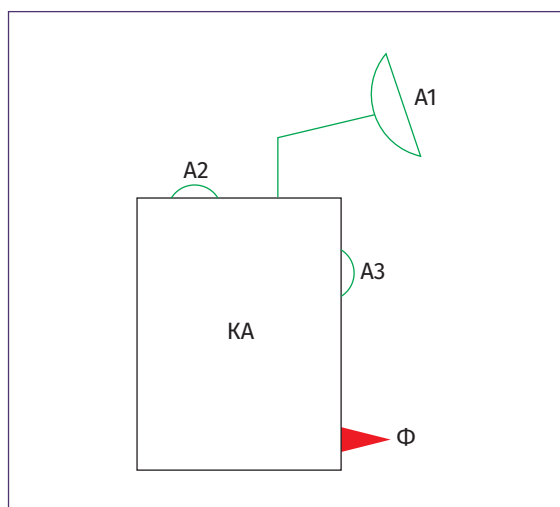


Рис. 1. Схема КА с ПДУ и приемными антеннами:
 КА – космический аппарат;
 Ф – факел двигателя;
 A1 – направленная приемная антенна;
 A2 и A3 – слабонаправленные приемные антенны

что может создать помехи приемникам ракетно-космических РЭС, частоты f которых, в основном, лежат в диапазоне $100 \text{ МГц} \leq f \leq 20 \text{ ГГц}$ (длины волн λ $3 \text{ м} \geq \lambda \geq 1,5 \text{ см}$). Для оценки такой помехи необходимо решить две задачи. Во-первых, необходимо определить мощность теплового излучения факела как функцию частот в радиодиапазоне, а также мощность помехи от факела ПДУ на входе приемника РЭС. Вторая задача заключается в оценке ЭМС излучения факела с РЭС, находящимися непосредственно на КА, и с РЭС, взаимодействующими с РЭС КА.

Термодинамическая модель

Будем рассматривать факел ПДУ как компактное тело с площадью поверхности S , излучающее мощность P в свободное пространство.

Заметим, что если в факеле происходят какие-то неравновесные процессы, то причина кроется в атомах плазмы и полосы такого неравновесного излучения

лежат в области, далекой от области радиочастот. К таким процессам, в частности, относятся [7, 8]: тормозное излучение плазмы, излучения рекомбинации и возбужденных атомов и ионов. Кроме того, существует еще бетатронное излучение.

Рассмотрим эти виды излучений несколько подробнее.

Тормозное определяется изменением кинетической энергии при пролете электрона в поле атома или иона. Спектр излучения сплошной, лежащий в области инфракрасных и рентгеновских волн.

Излучение возбужденных атомов и ионов, также как излучение рекомбинации, определяется отрывом или присоединением электрона к атому или иону. Спектр в этом случае линейчатый и расположен в видимой области и области ультрафиолетовых и рентгеновских лучей.

Набор частот рассмотренных видов излучения лежит существенно выше тех, что используются в ракетно-космической технике.

Бетатронное излучение определяется движением электронов плазмы в магнитном поле напряженностью H и при определенных условиях может располагаться в диапазоне частоты Лармора, которая ($\omega = 2\pi f$) определяется как [8]:

$$\omega = \frac{eH}{2mc} \text{ 1/c или } f = \frac{eH}{4\pi mc} \text{ Гц,}$$

где $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЭ; $m = 0,9 \cdot 10^{-27}$ г; $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с; H – в эрстедах.

Так как факел ПДУ КА находится в магнитном поле Земли, средняя напряженность которого $H \approx 0,5$ э, то частота Лармора равна $f \approx 0,707$ МГц, а длина волны $\lambda \approx 424$ м. Эта частота относится к радиовещательному средневолновому диапазону и даже гармоники частоты $2f$, $3f$ и т.д. расположены существенно ниже

частот РЭС ракетно-космической техники. Кроме того, эти частоты будут сильно поглощаться плазмой даже при не слишком большой концентрации электронов.

Рассмотренные виды неравновесного излучения играют существенную роль в высокотемпературной плазме, находящейся в сильном магнитном поле (магнитные ловушки). Эти излучения затрудняют реализацию контролируемого термоядерного синтеза [7, 8]. Для низкотемпературной плазмы двигательной установки (ДУ) доля мощности этих излучений должна быть незначительной.

Поскольку часть ΔP полной мощности излучения факела уходит на неравновесное излучение, то излучение в интересующем нас диапазоне радиочастот определяется равновесной составляющей излучения факела при мощности $P_1 = P - \Delta P$, то есть при мощности $P_1 < P$. В этом случае мощность излучения в радиодиапазоне соответственно уменьшится. Возможно, что факел излучает как *серое* тело, мощность излучения которого меньше мощности излучения абсолютно черного (ацетиленовая горелка [9]), однако, с точки зрения электромагнитной совместимости излучения факела с приемниками РЭС предпочтительным является определение максимально возможной помехи для уверенного вывода о выполнении или невыполнении требований ЭМС.

На этом основании будем считать излучение факела в диапазоне частот $300 \text{ МГц} \leq f \leq 20 \text{ ГГц}$ равновесным при полной мощности P излучения абсолютно черного тела [9–11]. Например, на Солнце все указанные виды неравновесных излучений играют существенную роль, но общая картина излучения достаточно хорошо определяется излучением абсолютно черного тела (для примера можно привести соответствующую иллюстрацию – рис. 2 из работы [11]).

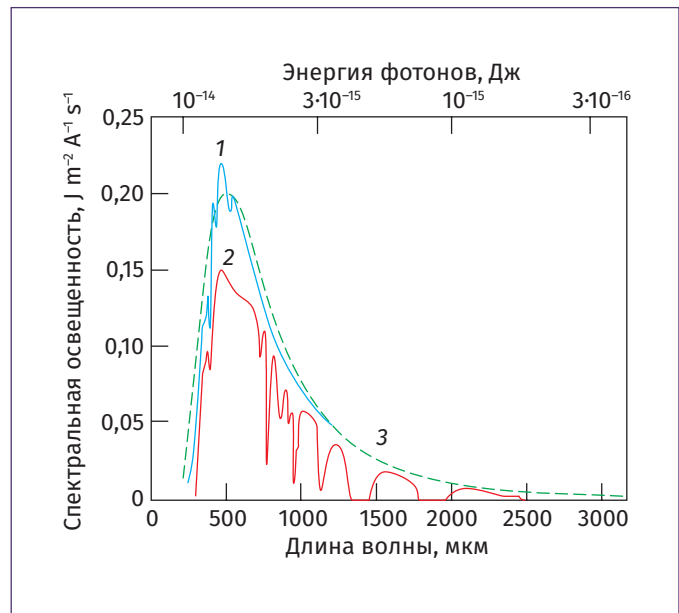


Рис. 2. Волны, излучаемые Солнцем, и их огибающая: 1 – солнечное излучение вне атмосферы; 2 – солнечное излучение над уровнем моря; 3 – абсолютно черное тело при температуре 5800 К

Мощность излучения P с единицы поверхности (то есть, плотность потока мощности) абсолютно черного тела с температурой T определяется законом Стефана–Больцмана:

$$P = \sigma T^4 \text{ Вт/см}^2,$$

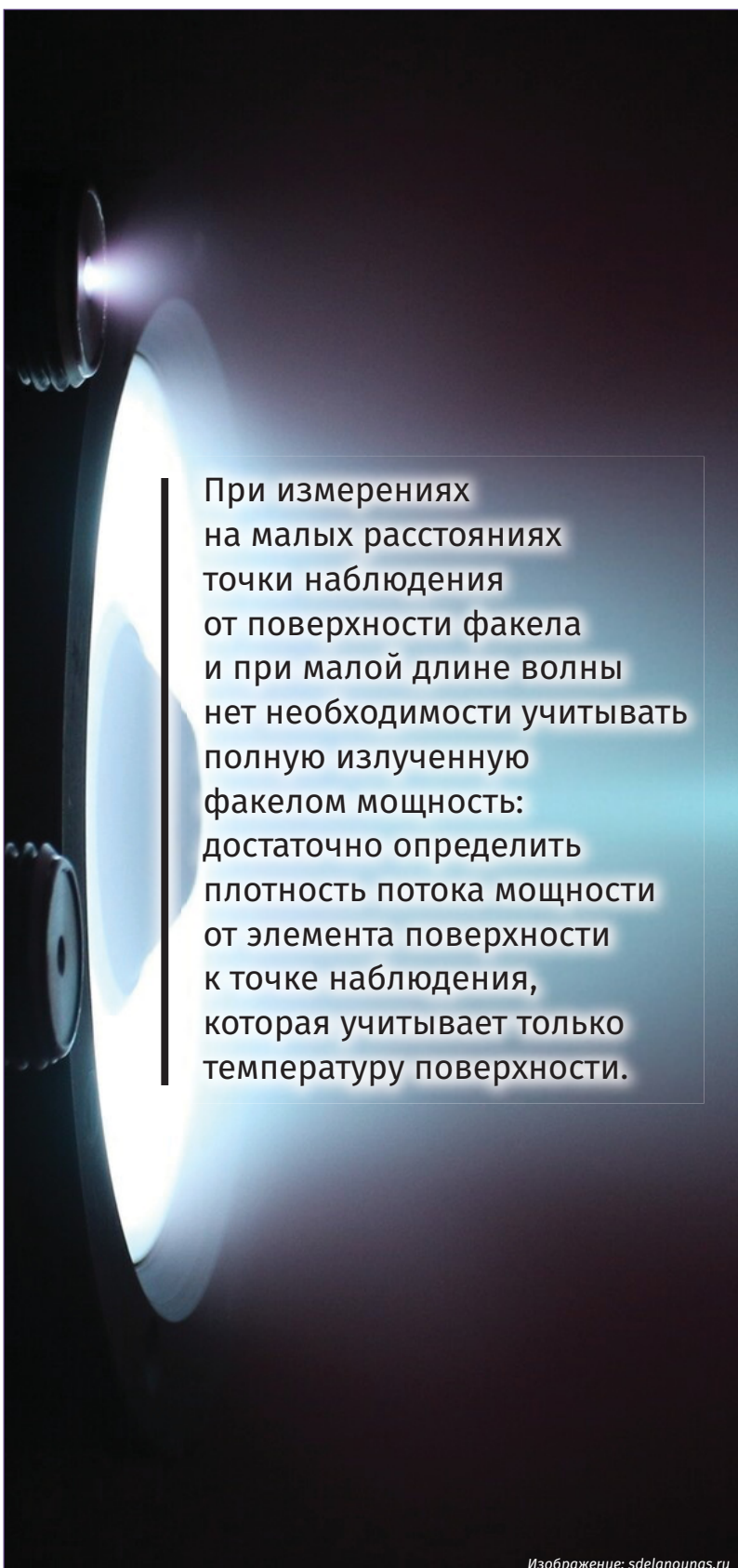
где $\sigma = 5,71 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/см}^2 \text{ К}^4$. Следовательно, полная мощность P излучения со всей площади поверхности $S \text{ см}^2$ тела выглядит следующим образом:

$$P = 5,71 \cdot 10^{-12} \cdot T^4 \cdot S \text{ Вт.} \quad (1)$$

Длина волны λ_m , на которую приходится максимум излучения, определяется законом Вина:

$$\lambda_m = 2886/T \text{ мк.} \quad (2)$$

Распределение мощности $P(f)$ излучения с единицы поверхности абсолютно



При измерениях на малых расстояниях точки наблюдения от поверхности факела и при малой длине волны нет необходимости учитывать полную излученную факелом мощность: достаточно определить плотность потока мощности от элемента поверхности к точке наблюдения, которая учитывает только температуру поверхности.

Изображение: sdelanounas.ru

черного тела по частотам f определяется законом Планка, однако, для радиочастот $f \ll f_m$, (частота f_m соответствует длине волны λ_m) удобнее применять закон Релея–Джинса:

$$dp = \frac{2f^2 kT}{c^2} df \text{ Вт/м}^2, \quad (3)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/ГцК – постоянная Больцмана, а $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Эта мощность излучается в телесный угол $\Delta\Omega$, равный $\Delta\Omega = 1$ стерадиану.

Мощность излучения с единицы поверхности в конечной полосе частот Δf для $\Delta f \ll f$ равна тогда:

$$p(\Delta f) = \frac{2f^2 kT}{c^2} \Delta f \text{ ВтГц/м}^2, \quad (4)$$

в чем можно убедиться, проведя интегрирование выражения (3) по f в пределах от f до $f + \Delta f$ для $f \gg \Delta f$. Соответственно, полная мощность излучения абсолютно черного тела в полосе частот Δf равна $P(\Delta f) = p(\Delta f)S$, то есть:

$$P(\Delta f) = \frac{2f^2 kT}{c^2} \Delta f S \text{ ВтГц}. \quad (5)$$

Подставив $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/ГцК и $c = 3 \cdot 10^8$ м/с в выражение (5), получим:

$$P(\Delta f) \approx 3 \cdot 10^{-40} \cdot f^2 \cdot T \cdot S \cdot \Delta f \text{ ВтГц}, \quad (6)$$

где f – измеряется в Гц; S – м².

Как следует из соотношений (5) и (6), для того чтобы определить мощность излучения плазмы ДУ в полосе частот Δf , необходимо знать температуру T и площадь поверхности S факела. Если температура неизвестна, ее можно определить по пол-

ной мощности P излучения выражения (1) и площади S или по значению λ_m формулы (2) и площади S .

Радиотехническая модель

В расчетах норм ЭМС какого-либо передающего устройства, создающего помехи приемникам, задают плотность потока мощности помех для требуемого диапазона частот в единицах Вт/м² или напряженность поля помех в единицах В/м.

При измерениях на небольших расстояниях точки наблюдения от поверхности факела и при малой длине волны (условия $R < D$ и $\lambda < D$, где D – максимальный размер факела – длина или диаметр) нет необходимости учитывать полную излученную факелом мощность: достаточно определить плотность ее потока от элемента поверхности, расположенного наиболее близко к точке наблюдения по формуле (4), которая учитывает только температуру поверхности. Такие резуль-

таты получатся при измерениях мощности излучения факела какой-либо малой антенной (датчиком), расположенной на незначительном расстоянии от источника, что соответствует, например, измерениям в безэховой вакуумной камере [1].

При $\lambda \geq D$ и $R \gg D$ расчет излученной факелом плотности потока следует производить с учетом всей мощности по формулам (5) и (6), используя соответствующие радиотехнические соотношения.

Интенсивность помехи $P_{пр}$ на входе приемника для свободного пространства рассчитывается по формуле передачи мощности [12, 13]:

$$P_{пр} = \frac{P_{пер} G_{пер} G_{пр} \lambda^2}{(4\pi R)^2} \eta_{пр}, \quad (7)$$

где $P_{пер}$ – мощность передатчика, Вт; $G_{пер}$ – коэффициент усиления (КУ) передающей антенны; $G_{пр}$ – КУ приемной антенны; λ – длина волны; R – расстоя-



ние между передающей и приемной антеннами; $\eta_{\text{п}}$ – коэффициент поляризационных потерь.

Применительно к излучению факела ПДУ мощность передатчика должна соответствовать полной мощности излучения формулы (6), то есть $P_{\text{пер}} = P(\Delta f) = p(\Delta f)S$, но поскольку предполагается использовать соотношение (7) для выработки норм ЭМС излучения факела с РЭС, то мощность передатчика увеличивается в 2 раза, то есть принимается, что $P_{\text{пер}} = 2P(\Delta f) = 2p(\Delta f)S$. Такой подход в радиотехнике определяется как запас на неучтенные факторы [13]. В рассматриваемом случае неучтенным фактором может являться, например, собственное тепловое излучение двигателя, которое добавляется к излучению факела.

Поскольку КУ антенны и ее эффективная поверхность $S_{\text{пр}}$ связаны соотношением [12, 13]:

$$G = \frac{4\pi S_{\text{пр}}}{\lambda^2}, \quad (8)$$

то, заменив в формуле (7) КУ приемной антенны ее эффективной поверхностью в выражении (8), принимая $S_{\text{пр}} = 1 \text{ м}^2$ и перенося $S_{\text{пр}}$ в левую часть равенства (7), получим плотность потока мощности Π на площади 1 м^2 , где расстояние R измеряется в метрах:

$$\Pi = \frac{2P_{\text{пер}} G_{\text{пер}}}{4\pi R^2} \eta_{\text{п}} \text{ Вт/м}^2. \quad (9)$$

Вычисления по формуле (9) отличаются от расчета по формуле (6) наличием в формуле (9) делителя 4π и множителей 2, $G_{\text{пер}}$, $\eta_{\text{п}}$.

Уравнения (7) и (9) применимы при размещении передающей и приемной антенн в дальней зоне, которая определяется как расстояние $R \geq d^2/\lambda$, где d – максимальный размер антенны. Например, диаметр круглой антенны с эффективной поверхностью 1 м^2 равен $d \approx 0,6 \text{ м}$ и для $\lambda = 3 \text{ см}$ расстояние дальней зоны $R \approx 12 \text{ м}$. Для других антенн и длин волн расстояние дальней зоны можно определить с использованием соотношения (8).

При указанных условиях напряженность поля выражается через плотность

В радиотехнической модели факел ПДУ является одновременно и передатчиком, и излучающей антенной. Если излучение с поверхности факела синфазно, что возможно при автосинхронизации излучения, то направленность излучения меняется и зависит от формы факела.

потока мощности следующим соотношением:

$$E = \sqrt{377\Pi} = \sqrt{377 \frac{2P_{\text{пер}} G_{\text{пер}}}{4\pi R^2} \eta_{\text{п}}} \text{ В/м, (10)}$$

где $120\pi \approx 377 \text{ Ом}$ – волновое сопротивление среды.

Относительно величины $G_{\text{пер}}$ в выражениях (9) и (10) необходимо сделать следующее замечание. В радиотехнической модели факел ПДУ является одновременно и передатчиком, и излучающей антенной.

Если излучение с поверхности факела синфазно, что возможно при автосинхронизации, то его направленность меняется и зависит от формы факела. При размерах факела l много меньших длины волны $l \ll \lambda$ можно считать, что излучение рав-

номерно распределяется в пространстве, что соответствует значению $G \approx 1$. При l , сопоставимых с длиной волны, или при $l > \lambda$ факел может излучать направленно или вдоль своей оси (при форме факела в виде сферы или конуса), и наоборот – поперек оси, если факел по форме представляет собой удлиненный объект.

Для излучения факела вдоль оси можно представить его как антенну в виде круглой апертуры с диаметром, равным диаметру сопла двигателя. КУ такой антенны, как функция угла ϑ , который отсчитывается от оси апертуры (от оси факела), определяется следующим выражением [12, 13]:

$$G = \frac{2p+1}{(p+1)^2} (ka)^2 \Lambda_{p+1}^2(ka \sin\theta), \quad (11a)$$

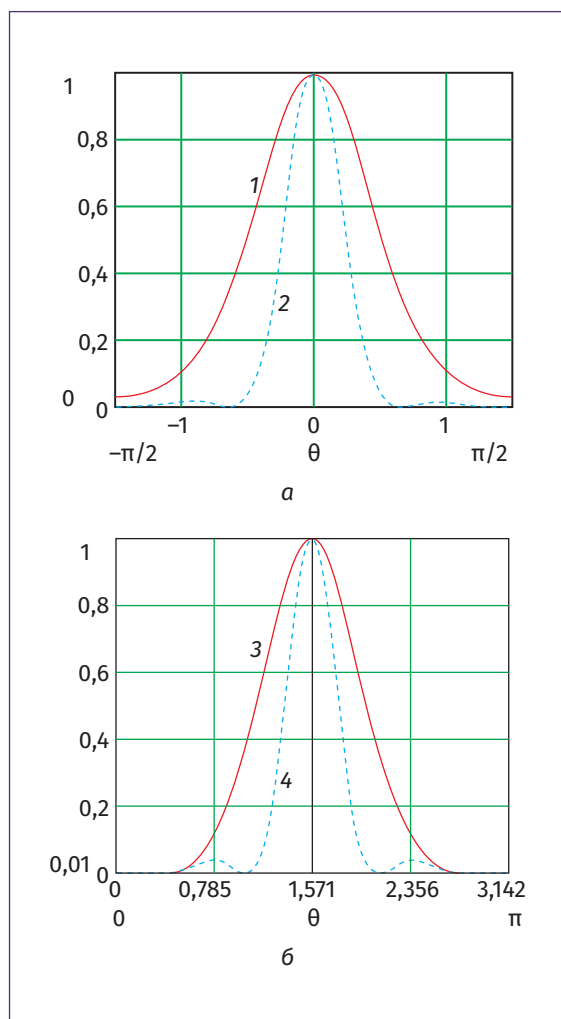


Рис. 3. ДН излучения факела по оси (а) и по нормали к оси (б):
1 – $a(\theta)$; 2 – $b(\theta)$; 3 – $x(\theta)$; 4 – $y(\theta)$

где $2p + 1/(p + 1)^2 = \eta$ – коэффициент использования апертуры (КИП); $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; a – радиус сопла двигателя; θ – угол наблюдения, отсчитываемый от оси факела;

$$\Lambda_p(x) = p! \frac{J_p(x)}{\left(\frac{x}{2}\right)^p},$$

где $J_p(x)$ – функция Бесселя первого рода порядка p .

Максимальный КУ этой антенны при $\theta = 0$ равен $G = \eta(ka)^2$. Следует отметить, что величину КИП η антенны можно уточнить по результатам измерений диаграммы направленности (ДН) излучения факела.

Антенна в виде тонкого синфазного цилиндра (линии) при длине $l < \lambda/2$ излучает энергию примерно так же, как сфера малого радиуса, то есть КУ антенны в этом случае равен $G_{пер} \approx 1$ и не зависит от направления излучения. Однако при большей длине синфазное излучение факела становится направленным. При длине факела $l \geq \lambda$ КУ антенны в сферической системе координат, где угол θ теперь отсчитывается от оси линии ($0 \leq \theta \leq \pi$), а угол φ – по окружности, нормальной к l ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$), определяется выражением:

$$G_{пер} \approx 1,6 \frac{l}{\lambda} \left[\frac{\sin\left(\pi \frac{l}{\lambda} \cos\theta\right)}{\pi \frac{l}{\lambda} \cos\theta} \right]^2. \quad (11б)$$

Как следует из (11б), максимум излучения линейной антенны не зависит от φ и приходится в направлении по нормали к линии ($\theta = \pi/2$). КУ в этом направлении равен $G_{пер} = 1,6l/\lambda$. На рис. 3 приведены ДН антенн по оси факела (11а) и по нормали к оси (11б) по мощности, нормированные к максимуму КУ при $\eta = 1$ в выражении (11а), для $2a/\lambda = 1$, $l/\lambda = 1$ (красные линии) и $2a/\lambda = 2$, $l/\lambda = 2$ (голубой пунктир).

К сожалению, невозможно теоретически определить, как именно излучает факел, поэтому в дальнейшем, чаще всего, будем считать, что факел излучает не синфазно и нормы излучения определять при $G_{пер} \approx 1$, имея в виду возможность некоторого увеличения рассчитанной мощности за счет отличия КУ факела от единицы.

Оценка уровня помех, создаваемых факелом ПДУ-70

Проведем расчеты уровня помех на примере ПДУ-70 в диапазоне частот $100 \text{ МГц} \leq f \leq 20 \text{ ГГц}$.

В соответствии с общим техническим описанием ПДУ-70 [14] при мощности двигателя $P_m = 660 \text{ Вт}$ мощность теплового излучения от плазмы ДУ составляет величину $P = 4,3 \text{ Вт}$. Если считать, что эта мощность измерялась в диапазоне инфракрасных и примыкающих к ним волн, то полная мощность излучения факела должна быть несколько выше и составлять величину около $6 \dots 15 \text{ Вт}$. Будем считать, что мощность излучения факела составляет 2% от мощности двигателя и равна $P = 13,2 \text{ Вт}$. Так как по закону Стефана–Больцмана выражения (1) $P = 5,71 \cdot 10^{-12} \cdot T^4 \cdot S \text{ Вт}$, то температура плазмы двигателя равна:

$$T = \sqrt[4]{\frac{P \cdot 10^{12}}{S \cdot 5,71}}$$

и для $P = 13,2 \text{ Вт}$ определится по формуле:

$$T \approx \frac{1400}{\sqrt[4]{S}} \tag{12}$$

Оценим температуру факела по формуле (12), задавая поверхность горения в виде сферы радиуса для $R = 1, 5 \text{ и } 10 \text{ см}$. Результаты расчета сведены в табл. 1.

Можно убедиться по закону Вина выражения (2) $\lambda_m = 2886/T \text{ мк}$, что при всех температурах табл. 1 максимум излучения факела лежит в области ультрафиолетовых волн и, следовательно, мощность излучения в области радиоволн правомерно рассчитывать по закону Релея–Джинса формулы (6):

$$P(\Delta f) = 3 \cdot 10^{-40} \cdot f^2 \cdot T \cdot S \cdot \Delta f \text{ ВтГц/м}^2. \tag{13}$$

Таблица 1

Температура факела ПДУ-70 в зависимости от радиуса и площади

R, см	S, см ²	T, К
1	12,6	743
5	314	332
10	1257	235

Таблица 2

Температура факела ПДУ-70 в зависимости от мощности излучения

R, см	S, см ²	T, К	T·S, Ксм ²
1	12,6	743	$9,3 \cdot 10^3$
5	314	332	$1 \cdot 10^5$
10	1257	235	$2,9 \cdot 10^5$

Так как по соотношению (13) мощность излучения определяется произведением $T \cdot S$, то в соответствии с табл. 1 мощность излучения на всех частотах увеличивается с увеличением площади факела, хотя температура при этом уменьшается (табл. 2).

В описании ДУ-70 [14] приводится рисунок ДУ в сборе с баллоном хранения криптона (рис. 4) и габаритные размеры двигателя: $94 \times 128 \times 200 \text{ мм}$. По этим дан-

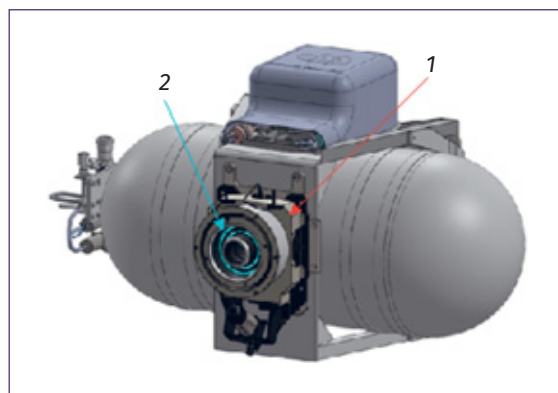


Рис. 4. Внешний вид ПДУ-70 в сборе с баллоном криптона: 1 – двигатель; 2 – сопло двигателя

ным можно установить, что диаметр сопла ДУ-70 равен, примерно, 5 см.

В интернете по запросу «плазменный двигатель» имеются видеоролики и фотографии факелов двигателей, аналогичных по конструкции с ПД-70, например, таких как на рис. 5, и по этим данным можно установить, что факел ПДУ имеет, примерно, форму конуса с основанием, равным диаметру двигателя, и длиной образующей боковой поверхности, равной 2...5 диаметрам.

Для ДУ-70 примем радиус сопла двигателя, равным $r = 2,5$ см, и длину образующей конуса факела, с учетом данных табл. 2, максимальной и равной $l = 25$ см. Боковая площадь поверхности такого конуса равна $S = \pi r l = 196 \text{ см}^2 \approx 200 \text{ см}^2$ или $S \approx 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$. Тогда, в соответствии с формулой (12), температура факела (для $S \text{ см}^2$)

равна $T \approx 1400 / \sqrt[4]{S} \approx 370 \text{ К}$, произведение (для $S \approx 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$) $TS \approx 7,4$ и по выражениям (6), (13) мощность, излучаемая факелом на частоте f Гц в полосе частот Δf , равна $P(\Delta f) \approx 2,2 \cdot 10^{-39} f^2 \Delta f \text{ ВтГц}$. Подставив $2P(\Delta f)$ в формулу (9), получим плотность потока мощности, создаваемой факелом в радиодиапазоне в полосе Δf , в виде:

$$\Pi(f) \approx \frac{10^{-39} \cdot f^2 \cdot G_{\text{пер}}}{\pi R^2} \Delta f \eta_{\text{п}} \text{ ВтГц/м}^2. \quad (14)$$

На рис. 6 представлен график функции (14) для $G_{\text{пер}} = 1$, $R = 1 \text{ м}$, $\Delta f = 1 \text{ Гц}$ и $\eta_{\text{п}} = 1$ в полосе частот $10^8 \leq f \leq 2 \cdot 10^{10} \text{ Гц}$ ($3 \text{ м} \leq \lambda \leq 1,5 \text{ см}$).

Поскольку по равенству (10) напряженность поля, создаваемая излучением факела ДУ, равна:



Факел ПДУ имеет, примерно, форму конуса с основанием, равным диаметру двигателя, и длиной образующей боковой поверхности – 2...5 диаметра.

Рис. 5. Факел ПДУ

$$E = \sqrt{377\Pi}, \quad (15)$$

то подставив в выражение (15) значение $\Pi(f)$ из формулы (14) для $\Delta f = 1$ Гц, получим:

$$E(f) \approx \frac{3,5 \cdot 10^{-19} \cdot f}{R} \cdot \sqrt{G_{\text{пер}} \eta_{\text{п}}} \text{ В/м.} \quad (16)$$

График функции уравнения (16) в полосе частот $10^8 \leq f \leq 2 \cdot 10^{10}$ Гц ($3\text{ м} \leq \lambda \leq 1,5 \text{ см}$) для $G_{\text{пер}} = 1$, $R = 1$ м, $\Delta f = 1$ Гц и $\eta_{\text{п}} = 1$ представлен на рис. 7.

Напомним, что если считать излучение факела синфазным, то при частотах $f > 3 \cdot 10^9$ Гц необходимо учитывать увеличение КУ факела с ростом расчетных значений на величину $G_{\text{пер}}$ в формуле (14) и на величину $\sqrt{G_{\text{пер}}}$ в формуле (16).

На рис. 8 приведен график функции выражения (4), соответствующий плотности потока мощности в полосе частот $\Delta f = 1$ Гц, с единицы поверхности факела на расстоянии 1 м в размерности $p(f)$ Вт/м² для $T = 370$ К.

На рис. 9 приведен график функции $e(f) = \sqrt{100p(\Delta f)}$, где $p(\Delta f)$ – функция выражения (4) для температуры $T = 370$ К. График соответствует напряженности поля излучения факела с единицы поверхности на расстоянии 1 м при пересчете мощности в напряжение $p = e^2/2R$ на сопротивление $R = 50\Omega$ в размерности $e(f)$ В/м.

Графики (рис. 8, 9) могут понадобиться при сравнении расчетов с результатами экспериментов, проводимых в безэховых вакуумных камерах [1, 4, 5].

Результаты расчетов по формулам (14) и (16), представленные на рис. 6 и 7, не учитывают поляризационные потери. Казалось бы, что поскольку токи в факеле, возбуждающие электромагнитные волны, должны совпадать с направлением движения ионов факела, то соответственно, поляризация поля должна также

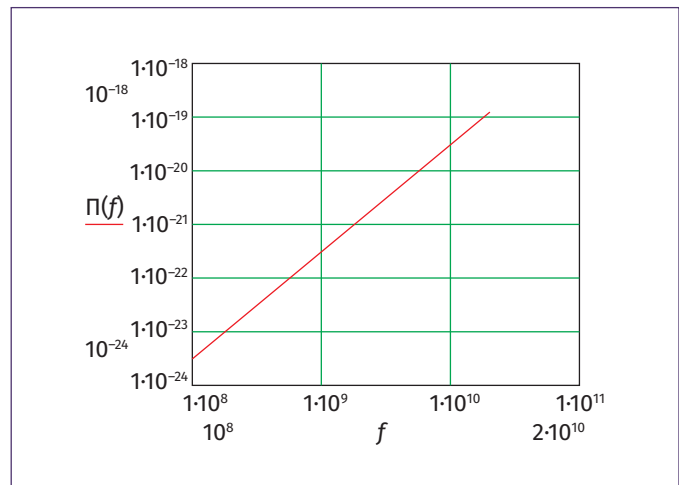


Рис. 6. Удельная мощность излучения факела ПДУ-70 для $T \cdot S = 7,4$

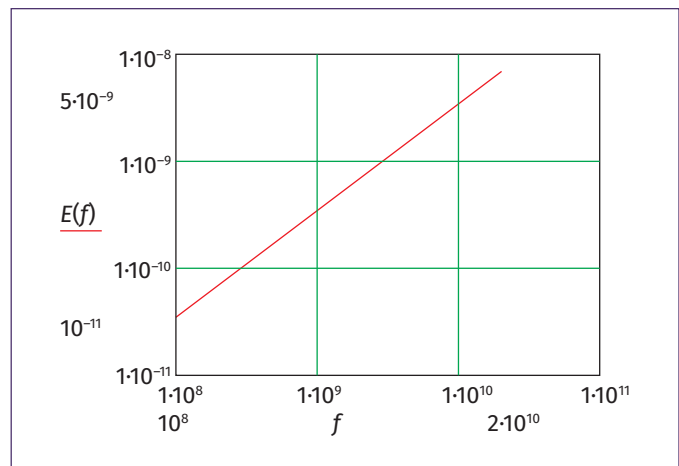


Рис. 7. Удельная напряженность поля излучения факела ПДУ-70 для $T \cdot S = 7,4$

совпадать с этим направлением. Однако в факел дополнительно инжектируются электроны, чтобы сделать его электрически нейтральным, и в этом случае поляризация излучаемых радиоволн становится хаотической. Это обстоятельство должно приводить к флуктуациям принимаемого от факела излучения [13] и результаты, представленные на рис. 6 и 7, по-видимому, следует оценивать как максимальные, соответствующие приему сигнала при согласованной поляризации.

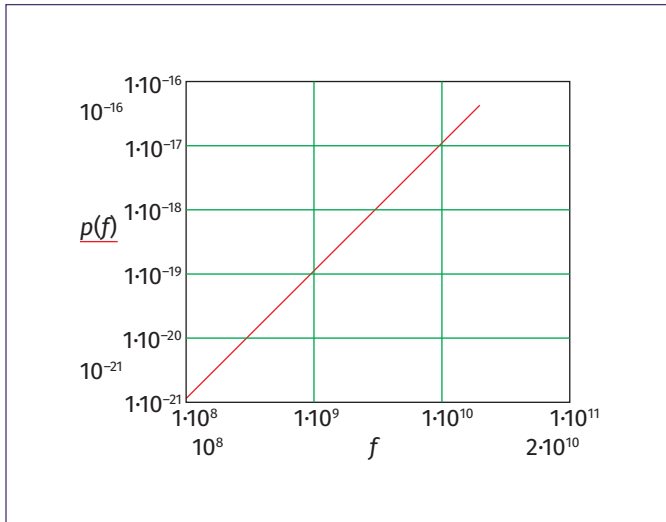


Рис. 8. Плотность потока мощности факела с единицы поверхности для $T = 370 \text{ K}$

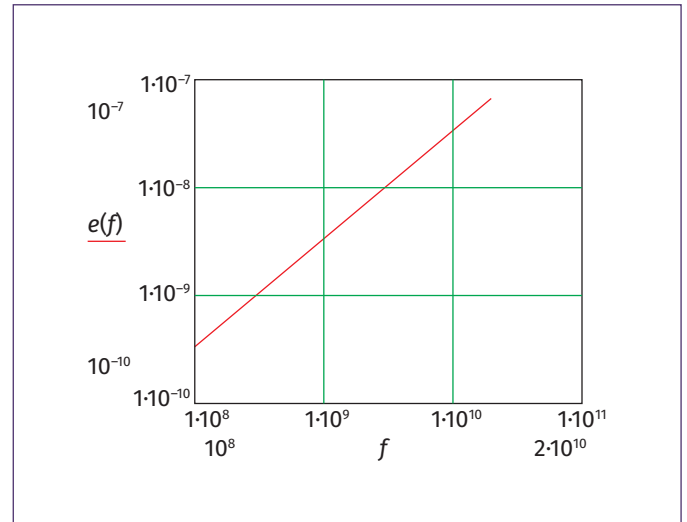


Рис. 9. Напряженность поля излучения факела с единицы поверхности для $T = 370 \text{ K}$

Графики $P(f)$ рис. 6 и $E(f)$ рис. 7 являются нормами теплового излучения факела двигателя ПД-70 в полосе 1 Гц в диапазоне радиочастот $10^8 \leq f \leq 2 \cdot 10^{10}$ Гц ($3 \text{ м} \leq \lambda \leq 1,5 \text{ см}$), которые после уточнения по результатам экспериментальных исследований можно представлять разработчикам РЭС для оценки ЭМС РЭС с излучением факела.

Оценим, как влияет излучение факела ПДУ на приемную систему, размещенную на КА и работающую на частотах $f = 10^{10}$ Гц ($\lambda = 3 \text{ см}$).

В практике оценки ЭМС считается, что помеха не сказывается на эффективности работы приемной системы, если ее мощность $P_{\text{пом}}$ составляет не более 1/10...1/3 части мощности $P_{\text{ш}}$ собственных шумов [13]. Мощность шумов приемной системы определяется суммой шумов входного усилителя приемника МШУ (малозумный усилитель) и антенны [12, 13]:

$$P_{\text{ш}} = k(T_{\text{мш}} + T_{\text{а}})\Delta f, \quad (17)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/ГцК – постоянная Больцмана; T – эффективная температу-

ра МШУ и антенны; Δf – ширина полосы приемника.

Температура шума современных МШУ $T_{\text{мш}} \approx 100 \text{ K}$, а температура шума антенны в диапазоне частот $1 \text{ ГГц} \leq f \leq 10 \text{ ГГц}$ определяется шумом Галактики и не превышает величины $T_{\text{а}} \approx 100 \text{ K}$ [12]. Тогда, в соответствии с формулой (17), температура шума приемной системы в полосе $\Delta f = 1 \text{ Гц}$ составит величину $P_{\text{ш}} \approx 3 \cdot 10^{-21}$ Вт.

Судя по рис. 6, плотность потока мощности помехи от факела ДУ на частоте $f = 10 \text{ ГГц}$ составляет величину $\Pi = 3 \cdot 10^{-20}$ Вт/м². Таким образом, если на факел ДУ направлена приемная антенна с эффективной поверхностью $S_{\text{эф}} = 1 \text{ м}^2$ на расстоянии 1 м (антенна А1 на рис. 1), то мощность помехи превысит мощность собственных шумов приемной системы в 10 раз (на 10 дБ), что делает невозможным нормальное функционирование приемника. Вместе с тем, если антенна направлена в сторону, противоположную направлению на факел, то помехи от факела практически не скажутся на работе приемника, поскольку эффек-

тивная поверхность антенны в этом случае уменьшится на 20...30 дБ [12, 13]. Заметим, что при расстоянии 1 м факел не находится в дальней зоне направленной антенны. Как ранее отмечалось, для круглой антенны с эффективной поверхностью 1 м^2 расстояние дальней зоны $R \approx 12 \text{ м}$. Как показано в работе [13], при малых расстояниях эффективная площадь антенны примерно на 5...10 дБ меньше, чем в дальней зоне. Но даже для такой эффективной поверхности антенны, мощность помехи будет сравнима с уровнем собственных шумов приемной системы, что скажется на ухудшении качества приема – возрастает вероятность ошибки при получении информации.

Для слабонаправленных антенн (A2 и A3 на рис. 1) помехи от факела, по-видимому, не скажутся на работе приемной системы. Пусть, например, антенна A2 отстоит от факела на расстояние 1 м и представляет собой открытый конец волновода, ориентированный так, что в направлении факела КУ антенны равен $G = 1,5$ [13]. В соответствии с соотношением (8) ее эффективная поверхность на длине волны $\lambda = 3 \text{ см}$ равна $S \approx 1 \text{ см}^2$ и мощность помехи от факела в полосе частот 1 Гц на входе приемника равна $P_{\text{пом}} \approx 3 \cdot 10^{-24} \text{ Вт}$, что на три порядка ниже мощности шума приемной системы. Также

мало скажется излучение факела на работе приемной системы, размещенной не на КА, а на достаточном расстоянии от него, поскольку мощность помехи убывает как квадрат расстояния от факела до антенны.

Эти оценки соответствуют фактическим данным: в настоящее время не зафиксированы заметные воздействия помех от ПДУ на работу приемных систем КА, однако в каждом конкретном случае желательно провести оценку ЭМС РЭС с излучением факела. На основании этих оценок можно заключить, что произведение $T \cdot S = 7,4 \text{ К} \cdot \text{м}^2$ определено правильно, по крайней мере по порядку величины.

В практике оценки ЭМС считается, что помеха не сказывается на эффективности работы приемной системы, если ее мощность составляет не более 1/10...1/3 части мощности собственных шумов системы.

Поскольку конкретные характеристики ПДУ, необходимые в радиотехнической модели факела, получены только на основе данных двигателя ПД-70, логично предположить, что по мере появления новых экспериментальных данных эти характеристики могут уточняться.

Поскольку конкретные характеристики ПДУ (температура и размеры факела), необходимые в радиотехнической модели, получены только на основе данных двигателя ПД-70, можно предположить, что по мере получения новых экспериментальных данных эти характеристики могут уточняться.

Тем не менее представленный подход к оценке норм излучения факела двигателя ПДУ по принципу подобия можно распространить и на другие плазменные двигатели, если известен диаметр сопла и если принять, что излучение факела двигателя так же, как для ПДУ-70, составляет величину около 2% от рабочей мощности двигателя.

Сравнение расчетных результатов с экспериментальными данными

Следует отметить, что сравнивать результаты расчетов и измерений приходится очень осторожно. Во-первых, эксперименты проводятся в вакуумных экранированных камерах и измеряется излучение (шумы) двигателя в целом, а не только факела, а во-вторых единицы измерений отличаются от принятых в расчетах.

Прежде всего заметим, что общий характер функций $P(f)$ – рис. 6 и $E(f)$ – рис. 7 почти точно совпадает с результатами измерений соответствующих величин в ра-

ботах [1, 4, 5], а именно скорость изменения той части измеренной напряженности поля в диапазоне частот $10^8 \leq f \leq 10^{10}$ Гц ($3 \text{ м} \leq \lambda \leq 3 \text{ см}$), которую можно отнести к излучению факела (и, соответственно, плотности потока мощности), растет с частотой так же, как на рис. 7 и 9, независимо от типа двигателя, который исследуется в эксперименте. *Это свидетельствует о том, что предложенный в статье вариант оценки теплового излучения факела ПДУ в радиодиапазоне как излучения абсолютно черного тела соответствует действительности.*

Интересно отметить, что расчетные значения, представленные на рис. 7 и 9, также полностью совпадают по скорости изменения с нормами допустимой напряженности поля для аэро- и космических систем, которая задается MIL-STD-461 США [15] для диапазона частот $10^8 \leq f \leq 1,8 \cdot 10^{10}$ Гц (рис. 10). Именно с этими нормами сравниваются результаты измерений в работах [4, 5].

(В скобках заметим, что разработчики стандарта при расчете этих норм рассматривали излучение помех в радиодиапазоне как излучение абсолютно черного тела. В MIL-STD-461 для частоты $f = 10000 \text{ МГц} = 10^{10} \text{ Гц}$ указана допустимая норма помехи, равная 63 дБмкВ/м, что соответствует допустимой напряженности поля, равной $E \approx 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ В/м}$. Это соответствует мощности излучения в пе-

решете на сопротивление 50Ω , равной $P \approx 2 \cdot 10^{-8}$ Вт/м². В зависимости от того, как рассчитывались нормы помех: для излучения с единицы поверхности по выражению (5) $p(\Delta f)$ или для излучения с площади S (6) $P(\Delta f)$ абсолютно черного тела, можно показать, что расчет проводился или для $T \approx 7 \cdot 10^{11}$ К, или для $T \cdot S \approx 7 \cdot 10^{11}$ К·м².)

Поскольку скорости изменения расчетных и экспериментальных зависимостей от частоты совпадают, то сравнение с расчетами можно осуществлять только на одной частоте. Далее они проводятся на частоте $f = 10^{10}$ Гц ($\lambda = 3$ см), для которой ранее оценивалось влияние излучения факела на приемную систему.

Для сравнения конкретных расчетных и измеренных величин прежде всего рассмотрим материалы работы [1], в которой исследовалось излучение ПДУ-70.

Для исследования эффектов собственного излучения ЭРД использовалась экспериментальная установка, представляющая собой металлическую вакуумную камеру диаметром 1 м и длиной 2 м, установленную вертикально.

В работе [1] представлено следующее описание оборудования эксперимента: «Внутри камеры симметрично относительно ее оси устанавливаются линейки измерительных датчиков (3–4 группы) с двух сторон относительно струи ЭРД. Геометрия задачи представлена на рисунке 5.17, расположение измерительных датчиков внутри вакуумной камеры – на рисунке 5.18. В качестве измерительных датчиков используются апертурные дифференциальные датчики. Конструкция датчиков включала в себя металлическую сетку размером $0,15 \times 0,15$ м, установленную в металлической рамке, гальванически соединенной с центральной жилой измерительного коаксиального кабеля (см. рисунок 5.17). Вторая часть датчика из проволочной рамки

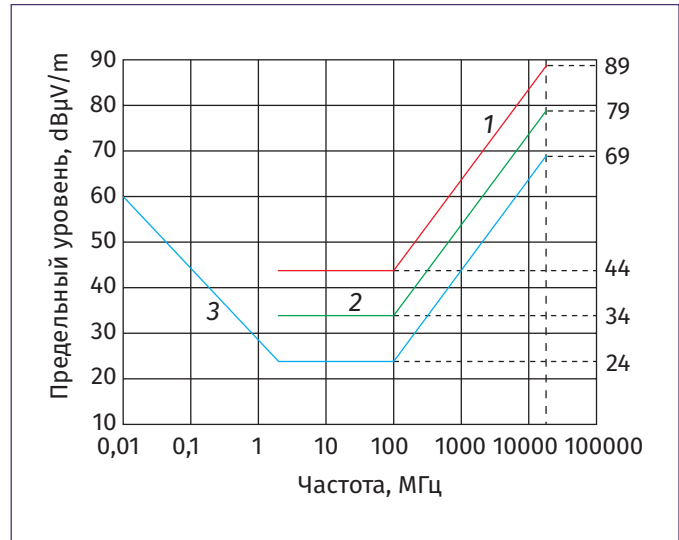


Рис. 10. Нормы допустимой напряженности поля по MIL-STD-461: 1 – внутреннее неподвижное крыло ≥ 25 м от носа до хвоста; 2 – внутреннее неподвижное крыло < 25 м от носа до хвоста; 3 – внешнее неподвижное крыло (от 2 МГц до 18 ГГц) и вертолеты

аналогичных размеров устанавливалась на расстоянии 1 см от первой и подключалась к экрану измерительного коаксиального кабеля. Такая конструкция была выбрана с целью минимального воздействия на струю ЭРД». Упомянутые в цитированном тексте иллюстрации приведены на рис. 11.

Для последующего анализа эксперимента существенным является то, что датчики располагались на сравнительно малом расстоянии (менее 50 см) от факела ПДУ и то, что они не являлись антеннами. На этом основании можно предполагать, что в эксперименте измерялось излучение с элемента поверхности, а не полное излучение факела. Соответственно, результаты следует сравнивать с расчетными значениями рис. 8 и 9.

На рис. 12 приведены измеренные спектры излучения ПДУ-70 в масштабе дБм/Гц в диапазоне частот $10^8 \leq f \leq 10^{10}$ Гц.

Будем считать, что масштаб этих графиков представлен в единицах дБмВ/м

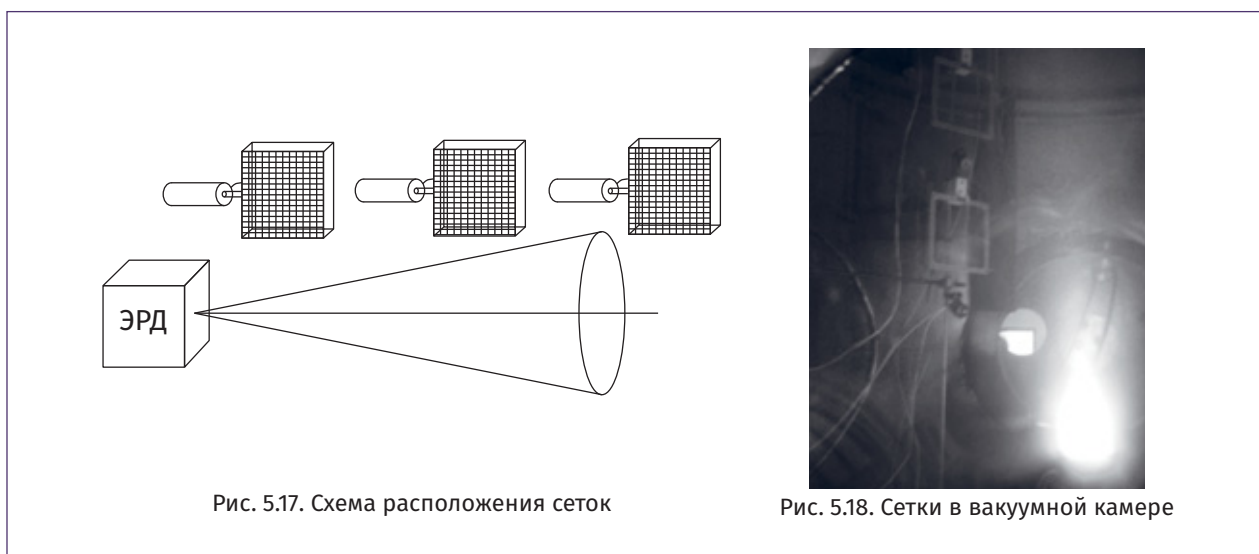


Рис. 5.17. Схема расположения сеток

Рис. 5.18. Сетки в вакуумной камере

Рис. 11. Размещение измерительных датчиков из работы [1]

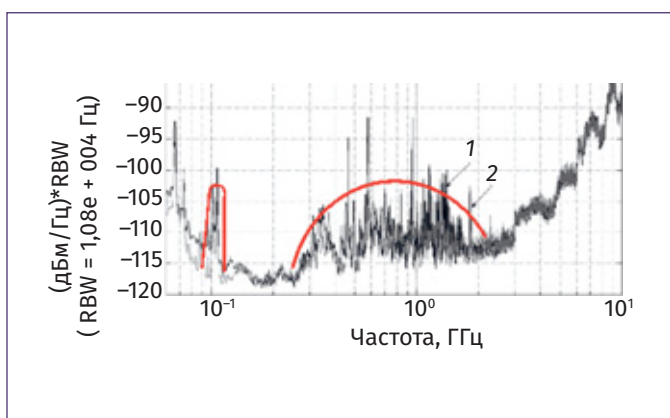


Рис. 12. Измеренные спектры излучения ПДУ-70 из работы [1]: 1 – сглаженный спектр (сетка 1); 2 – сглаженный спектр (сетка 2)

полосе частот $\Delta f = 1$ Гц. Исключим пока из рассмотрения частоту 10^8 Гц и полосу $2 \cdot 10^8 \leq f \leq 2 \cdot 10^9$ Гц, в которых зафиксированы выбросы напряженности поля амплитудой до 10...20 дБ, поскольку эти выбросы, очевидно, вызваны не тепловым излучением факела, а какими-то процессами в самом ПДУ.

На частоте 10^{10} ГГц ($\lambda = 3$ см) в эксперименте зафиксирована напряженность поля излучения $E \approx -90$ дБм/Гц или

$E \approx 3 \cdot 10^{-5}$ мВ/м = $3 \cdot 10^{-8}$ В/м. Для варианта измерений напряженности поля с единицы поверхности факела измеренная величина $E \approx 3 \cdot 10^{-5}$ мВ/м = $3 \cdot 10^{-8}$ В/м практически совпадает с расчетной величиной на рис. 9 для $f = 10$ ГГц ($e \approx 3,5 \cdot 10^{-8}$). Таким образом, можно считать, что тепловая модель факела ПДУ-70 определена правильно.

Перейдем к рассмотрению результатов измерений, полученных в работах [4, 5].

В обеих работах измерялось излучение в радиодиапазоне ПДУ. В работе [4], предположительно, измерялись характеристики ПДУ-70 или его аналога, поскольку говорится об измерениях характеристик российского двигателя мощностью 660 Вт. В работе [5] измерялись характеристики двух двигателей мощностью 1500 Вт в разных режимах.

Из схем проведения экспериментов (рис. 13, 14) можно предположить, что в экспериментах измерялись параметры ДУ и факела в целом, в частности, измерялась полная мощность факела.

Работы проводились в соответствии с нормами MIL-STD-461, которые предус-

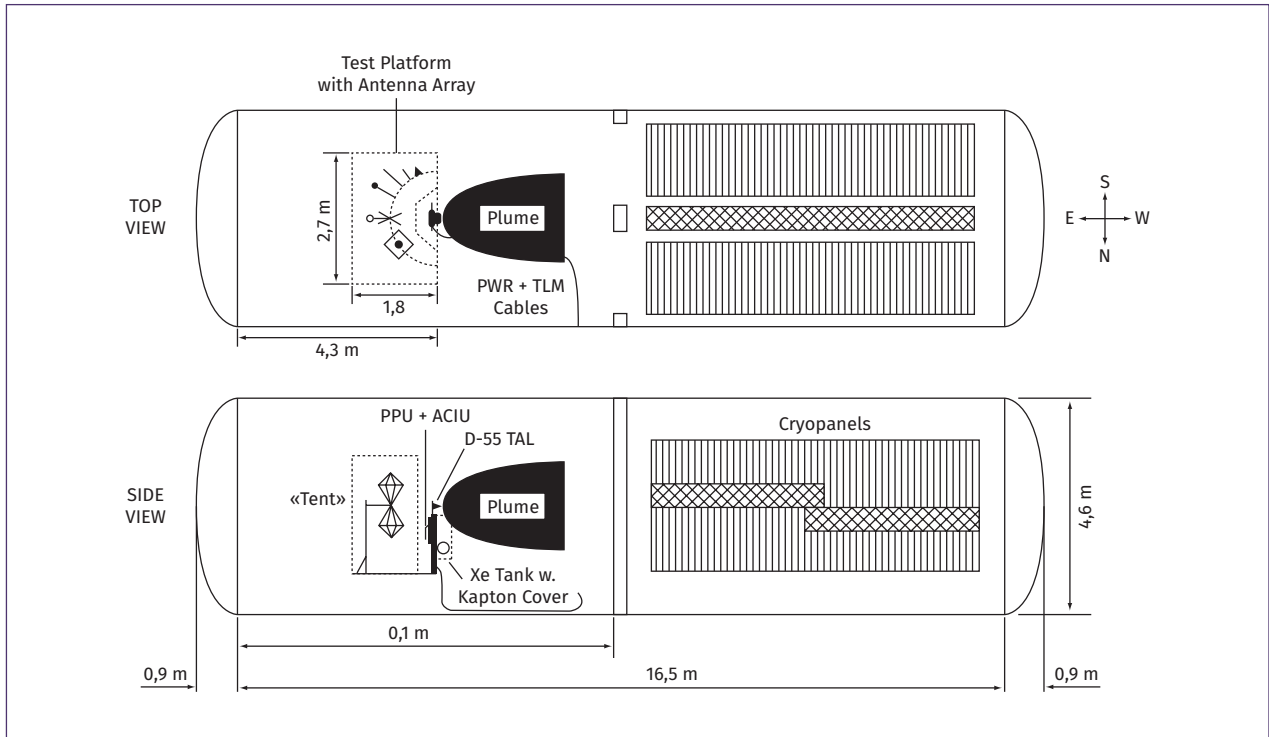


Рис. 13. Схема экспериментальной установки работы [4]

матривают измерения мощности в полосе частот $\Delta f = 1$ МГц и размещение антенны на расстоянии 1 м от объекта (в работе [4] измерения проводились в полосах частот $\Delta f = 100$ кГц и $\Delta f = 3$ МГц).

На частотах от 1 до 18 ГГц в качестве антенны применялся прямоугольный рупор с размерами апертуры 24,2×13,6 см. Диагональ рупора $d \approx 28$ см и двигатель с факелом для частоты $f = 10$ ГГц находится в дальней зоне рупора: $d^2/\lambda \approx 260$ см. Поскольку распределение амплитуды поля по апертуре рупора неравномерно [12], то эффективная поверхность меньше геометрической и КУ рупора из формулы (8) на частоте $f = 10$ ГГц равен $G \approx 300$. Ширина ДН рупора по половинной мощности на этой частоте равна $\Delta\theta \approx 0,17$ рад = 10° , что соответствует площади зоны охвата 17×17 см² на расстоянии 1 м от рупора. По схеме установки работы [4] (рис. 13) можно определить, что в такую зону попа-

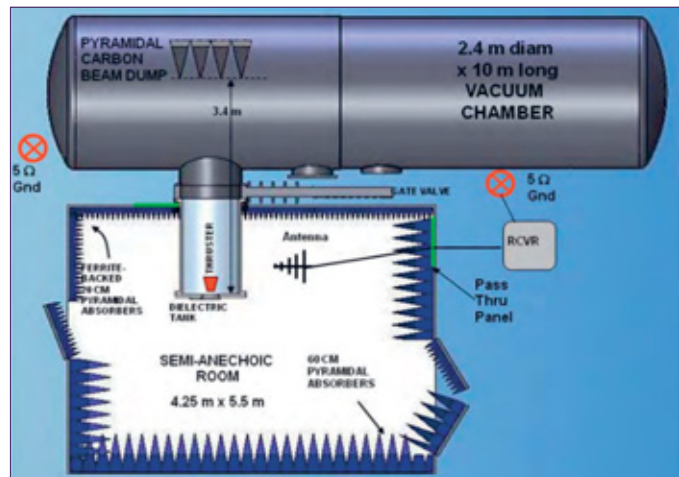


Рис. 14. Схема экспериментальной установки работы [5]

дает двигатель ПДУ-70 вместе с факелом. Что касается схемы установки работы [5] (рис. 14), то, поскольку размеры двигателя и факела неизвестны, можно только предполагать, что в зону охвата также попадает и двигатель, и факел.

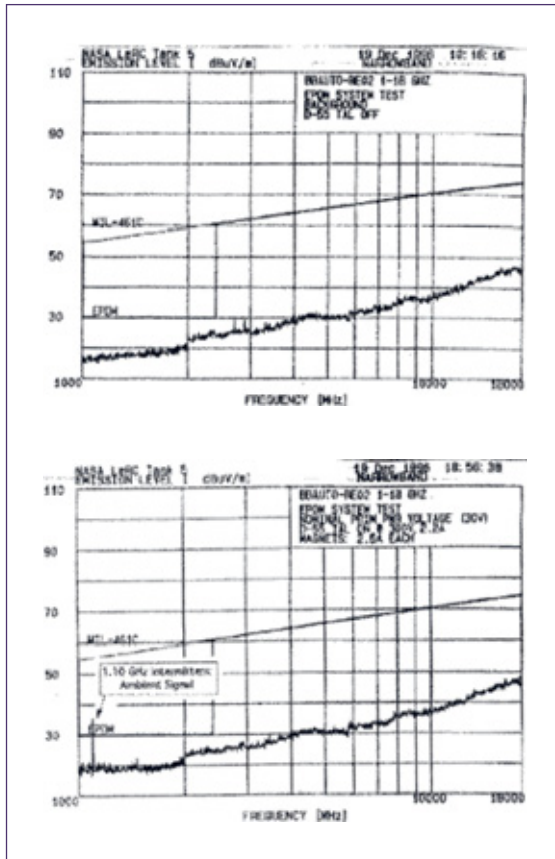


Рис. 15. Результаты измерений работы [4] для $\Delta f = 100$ кГц

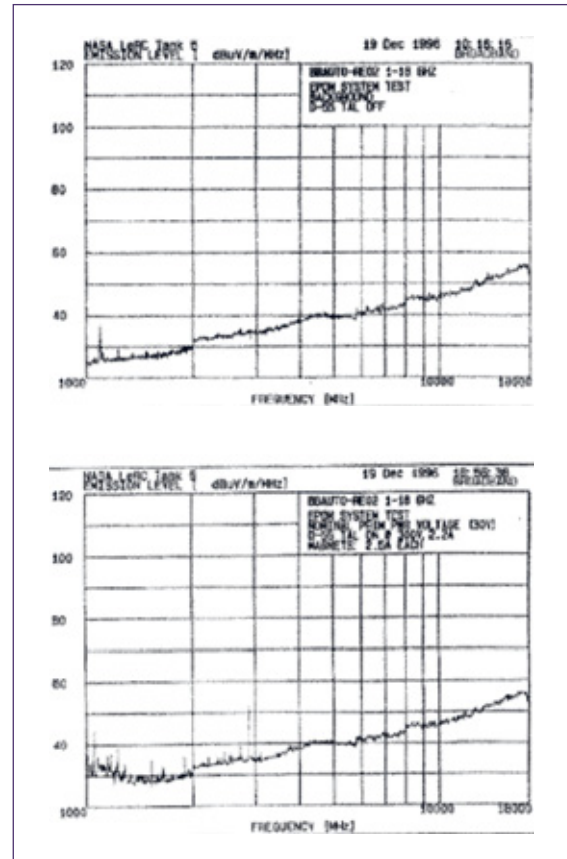


Рис. 16. Результаты измерений работы [4] для $\Delta f = 3$ МГц

На рис. 15 и 16 приведены результаты измерений из работы [4] для $\Delta f = 100$ кГц и $\Delta f = 3$ МГц.

Рассмотрим эти результаты. По приведенным на рис. 15 нормам MIL-STD-461 можно определить, что результаты приведены в странном масштабе 2,4 ЕмкВ/м, поскольку только в таком масштабе норма MIL-STD-461 на частоте 10 ГГц равна 70 дБ, хотя обозначение lgu определяет отношение напряженности поля к напряжению $E/0,775$ В. На частоте 10 ГГц относительная напряженность поля равна $E_1 \approx 37$ дБ = $10^{37/20} = 71$ мкВ/м или $E_2 = 71/2,4 \approx 29$ мкВ/м = $2,9 \cdot 10^{-5}$ В/м. Так как измерения мощности спектроанализатором проводились с использованием приемной антенны с КУ $G_{\text{пр}} = 300$ в полосе частот $\Delta f =$

$= 100$ кГц, то напряженность поля в полосе

$$1 \text{ Гц равна } E = \frac{E_2}{\sqrt{300 \cdot 10^5}} \approx 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ В/м, что}$$

практически совпадает с расчетным значением напряженности поля на частоте 10 ГГц (рис. 7) $E = 3,5 \cdot 10^{-9}$ В/м.

На рис. 16 не приведены нормы MIL-STD-461 и можно только предполагать, что эти результаты приведены или тоже в масштабе 2,4 мкВ/м, или в обычном для lgu масштабе $E/0,775$ мкВ/м.

Рассмотрим оба варианта. На частоте 10 ГГц измеренная напряженность поля равна $E_1 \approx 47$ дБ = $10^{47/20} = 224$ мкВ/м или для масштаба 2,4 мкВ/м $E_2 = 224/2,4 \approx 93$ мкВ/м = $9,3 \cdot 10^{-5}$ В/м. Так как измерения мощности

проводились с использованием антенны с КУ $G_{\text{пр}} = 300$ в полосе частот $\Delta f = 3$ МГц, то напряженность поля в полосе 1 Гц равна

$$E = \frac{E_2}{\sqrt{300 \cdot 3 \cdot 10^6}} \approx 3 \cdot 10^{-9} \text{ В/м, что также сов-}$$

падает с расчетным значением напряженности поля на частоте 10 ГГц (рис. 7) $E = 3,5 \cdot 10^{-9}$ В/м.

Для масштаба $E/0,775$ мкВ/м, проведя аналогичные расчеты, получим $E_2 = 224 \cdot 0,775 \approx 174$ мкВ/м = $1,7 \cdot 10^{-4}$ В/м и

$$E = \frac{E_2}{\sqrt{300 \cdot 3 \cdot 10^6}} \approx 5,7 \cdot 10^{-9} \text{ В/м, что практи-}$$

чески совпадает с расчетным значением.

Обобщая сравнения экспериментальных данных работ [1, 4] с расчетными значениями, можно заключить, что представленная модель излучения факела ПДУ-70 подтверждается измерениями.

На рис. 17 приведены результаты измерений работы [5].

Здесь измеренная напряженность поля на частоте 10 ГГц равна $E_1 \approx 47$ дБ ($E_2 = 224 \cdot 0,775$ мкВ/м = 174 мкВ/м = $174 \cdot 10^{-6}$ В/м). Проводя все расчеты так же, как для результатов работы [4], но для ширины полосы пропускания $\Delta f = 1$ МГц, получим $E \approx 9,8 \cdot 10^{-9}$ В/м, что больше расчетной величины $E = 3,5 \cdot 10^{-8}$ в 2,8 раза (4,5 дБ). Разницу измеренного и расчетного значений напряженности поля в этом случае можно объяснить отличием исследованных двигателей от ПДУ-70 или ошибками измерений (антенна расположена слишком близко от двигателя) и ошибками нашей интерпретации результатов измерений. Однако, если предположить, что факел создает в поперечном направлении направленное излучение, то часть факела длиной 17 см, которая попадает в ДН измерительного рупора, в соответствии с выражением (11б) излучает с КУ $G_{\text{пер}} = 1,6l/\lambda = 1,6 \cdot 17/3 \approx 9$. Тогда пересчет

величины E_2 необходимо производить с учетом $G_{\text{пер}} \approx 9$, то есть по выражению

$$E = \frac{E_2}{\sqrt{300 \cdot 9 \cdot 10^6}} \approx 3,3 \cdot 10^{-9} \text{ В/м, что опять}$$

совпадает с расчетным значением напряженности поля на частоте 10 ГГц (рис. 7) $E = 3,5 \cdot 10^{-9}$ В/м. Впрочем, предположение о направленном излучении факела в поперечном направлении нуждается в дополнительной экспериментальной проверке.

Рассмотрим помехи, которые создаются нетепловым излучением ПДУ-70, представленные на рис. 12. Как следует из рисунка, наблюдаются всплески напряженности поля до 20 дБ, то есть на

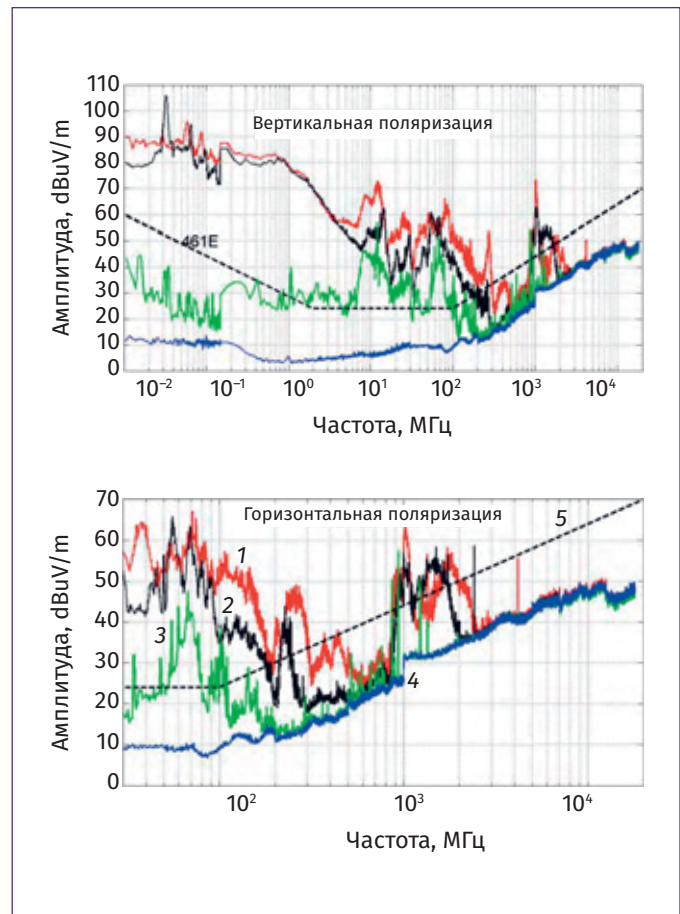


Рис. 17. Результаты измерений работы [5]:
1 – Mlr; 2 – EM; 3 – Backgnd; 4 – 50Ω Load; 5 – 461E Limit

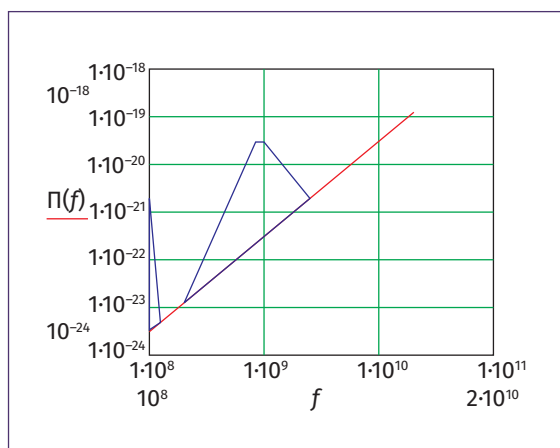


Рис. 18. Плотность потока мощности излучения ПДУ-70 (факел + нетепловые помехи)

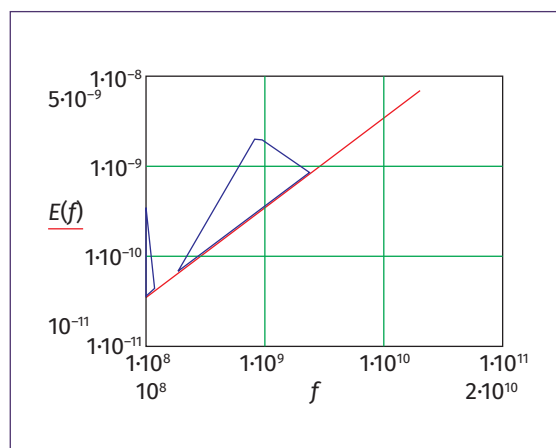


Рис. 19. Напряженность поля излучения ПДУ-70 (факел + нетепловые помехи)

порядок, на частотах вблизи $f \approx 10^8$ Гц и в диапазоне частот $2 \cdot 10^8 \leq f \leq 2,5 \cdot 10^9$ Гц с максимумом на частотах $f \approx 9 \cdot 10^8$ Гц (красные кривые на рис. 12). Соответственно, максимальные всплески мощности на этих частотах будут больше расчетных значений на два порядка.

На рис. 18 и 19 представлены графики плотности потока мощности и напряженности поля, соответственно, излучения факела, аналогичные рис. 6 и 7, с наложенными на график зонами помех, которые определяются нетепловым излучением двигателя (синие кривые). В зонах, показанных синими линиями на рисунках, возможно появление случайных помех, мощность и амплитуда которых ограничена этими линиями.

Таким образом, рис. 18 и 19 теперь являются нормами суммарного излучения факела и двигателя ПДУ-70 в полосе 1 Гц в диапазоне радиочастот $10^8 \leq f \leq 2 \cdot 10^{10}$ Гц ($3 \text{ м} \leq \lambda \leq 1,5 \text{ см}$).

Следует отметить, что на частотах $f \geq 3$ ГГц помехи зависят только от излучения собственно факела, что определяет необходимость разработки и совершенствования представленной модели в задачах ЭМС РЭС.

Выводы

1. Разработан способ оценки норм теплового излучения факела плазменного двигателя в диапазоне радиочастот. Показано, что излучение факела ПДУ в диапазоне радиочастот можно рассматривать как излучение абсолютно черного тела.

2. В радиотехнической модели отмечается, что факел одновременно представляет собой и передатчик, и антенну, что в ряде случаев необходимо учитывать.

3. Проведены оценка уровня помех, создаваемых факелом ПДУ-70 в диапазоне частот $100 \text{ МГц} \leq f \leq 20 \text{ ГГц}$, и сравнение расчетных значений помех с экспериментальными данными. Эксперименты подтвердили правильность представленной модели излучения факела.

4. На графики расчетных значений мощности и напряженности поля излучения факела нанесены экспериментальные данные нетепловых излучений двигателя, что позволяет определить суммарные нормы ЭМС излучений ПДУ-70 в диапазоне частот $100 \text{ МГц} \leq f \leq 20 \text{ ГГц}$. Вместе с тем помехи на частотах $f \geq 3$ ГГц определяются только излучением собственно факела и это обстоятельство подтверждает необхо-

димось разработки и актуальность представленной в работе модели излучения факела для задач ЭМС РЭС.

5. Конкретные данные (температура и размеры факела), использованные в радиотехнической модели, могут уточняться по мере накопления экспериментальных результатов, но представленный подход к оценке норм излучения факела двигателя ПДУ-70, по-видимому, можно распространить и на другие плазменные

двигатели при допущении общей пропорциональности рабочей мощности ДУ и мощности теплового излучения факела.

6. Результаты работы могут использоваться при оценке ЭМС излучения помех ПДУ с РЭС, размещенными на КА. Представленные материалы могут использоваться для оценки ЭМС РЭС на КА, оборудованных плазменным двигателем, а также преподавателями вузов и студентами при выполнении соответствующих работ.

Список литературы

1. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов и их влияние на радиосистемы космической связи / Важенин Н.А. [и др.]. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012.
2. Karabadzhak G., Gabdullin F., Korsun A., Plastinin Y., Tverdokhlebova E. Optical Emission of a Hall Thruster Plume in Space. Central Research Institute of Machine-Building (TSNIIMASH), Presented as Paper IEPC-01-053 at the 27th International Electric Propulsion Conference, Pasadena, CA, 15–19 October, 2001.
3. Кирдяшев К.П. Электромагнитные проблемы связи с межпланетными космическими аппаратами / Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2020. № 2. С. 78–93. DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-78-93.
4. Charles J. Sarmiento and John M. Sankovic Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, Joseph Freitas and Peter R. Lynn Naval Center for Space Technology, Washington, DC. RHETT2/EPDM Hall Thruster Propulsion System Electromagnetic Compatibility Evaluation. NASA/TM-97-206324, IEPC-97-108.
5. Edward J. Beiting, Xuan Le Eapen, James E. Pollard The Aerospace Corporation P.O. Box 92957 – M2/341, Marc Gambon, Frédéric R. Marchandise, Michael Öberg SNECMA, Division Moteurs Spatiaux Site de Vernon, B. P. 820 27208 VERNON, FRANCE. Electromagnetic Emissions from PPS®1350 Hall Thruster Los Angeles, CA 90009-2957, IEPC-2009-071.
6. Bandinelli M., Pandolfo L., Araque Quijano J.L., Vecchi G., Pawlak H., Marliani F. An Electromagnetic Modeling Tool for Radio Frequency Interference Caused by Plasma Plumes, 2011, IEEE, DOI: 10.1109/ISEMC.2011.6038388.
7. Арцимович Л.А. Элементарная физика плазмы. М.: «Атомиздат», 1966.
8. Физический энциклопедический словарь. М.: «Советская энциклопедия», 1984.
9. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики: в 3 т. Т. 3. М.: «Физматгиз», 1961.
10. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. III. М.: «Наука», 1970.
11. Глазков В.Н. Излучение абсолютно черного тела. Лекция 3. Курс-майнол 2017–2018. Квантовая механика для «чайников». М.: НИИ ВШЭ, 2017.
12. Справочник по радиолокации: в 4 т. Т. 1–4 / Пер. с англ. М.: «Советское радио», 1976.
13. Колесников Е.П., Купин М.Н., Червяков И.В. Практические задачи ракетно-космической радиотехники // ООО «НПЦ «СОТИС». М.: «Красная Звезда», 2021.
14. (ДУ-70М) Общее техническое описание. ОКБ «Факел» [Электронный ресурс]. URL: <http://tdla.ssau.ru/uop/vvedrd/module5.pdf> (дата обращения: 12.02.2024).
15. MIL-STD-461G. Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of sub-systems and equipment. Department of defense interface standard, 2015.

References

1. *Elektricheskie raketnye dvigateli kosmicheskikh apparatov i ih vliyanie na radiosistemy kosmicheskoy svyazi / Vazhenin N.A. [i dr.]*. [Electric rocket engines of spacecraft and their effect on space communication radio systems / Vazhenin N.A., et al.]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2012. (In Russ.).
2. *Karabadzhak G., Gabdullin F., Korsun A., Plastinin Y., Tverdokhlebova E.* Optical Emission of a Hall Thruster Plume in Space. Central Research Institute of Machine-Building (TSNIIMASH), Presented as Paper IEPC-01-053 at the 27th International Electric Propulsion Conference, Pasadena, CA, 15–19 October, 2001.

3. Kirdyashov K.P. Electromagnetic problems of communication with interplanetary spacecraft. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-Matematika* [Bulletin of the Moscow State Regional University. Series: Physics and Mathematics], 2020, N. 2, pp. 78–93. DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-78-93. (In Russ.).
4. Charles J. Sarmiento and John M. Sankovic Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, Joseph Freitas and Peter R. Lynn Naval Center for Space Technology, Washington, DC. RHETT2/EPDM Hall Thruster Propulsion System Electromagnetic Compatibility Evaluation. NASA/TM-97-206324, IEPC-97-108.
5. Edward J. Beiting, Xuan Le Eapen, James E. Pollard The Aerospace Corporation P.O. Box 92957 – M2/341, Marc Gambon, Frédéric R. Marchandise, Michael Öberg SNECMA, Division Moteurs Spatiaux Site de Vernon, B. P. 820 27208 VERNON, FRANCE. Electromagnetic Emissions from PPS®1350 Hall Thruster Los Angeles, CA 90009-2957, IEPC-2009-071.
6. Bandinelli M., Pandolfo L., Araque Quijano J.L., Vecchi G., Pawlak H., Marliani F. An Electromagnetic Modeling Tool for Radio Frequency Interference Caused by Plasma Plumes, 2011, IEEE, DOI: 10.1109/ISEMC.2011.6038388.
7. Artsimovich L.A. *Elementarnaya fizika plazmy* [Elementary plasma physics], Moscow, «Atomizdat» Publ., 1966. (In Russ.).
8. *Fizicheskij enciklopedicheskij slovar'* [Physical Encyclopedic Dictionary], Moscow: «Soviet Encyclopedia» Publ, 1984. (In Russ.).
9. Frisch S.E., Timoreva A.V. *Kurs obshchej fiziki: v 3 t. Vol. 3.* [Course of general physics: in 3 vols. 3], Moscow, «Fizmatgiz» Publ, 1961. (In Russ.).
10. Savelyev I.V. *Kurs obshchej fiziki. T. III* [Course on history. Vol. III], Moscow, «Nauka» Publ, 1970 (In Russ.).
11. Glazkov V.N. *Izlučenje абсолютно черного тела. Lekciya 3. Kurs-majnor 2017–2018. Kvantovaya mekhanika dlya «chajnikov»* [Radiation of an absolutely black body. Lecture 3. Course-minor 2017–2018. Quantum mechanics for dummies], Moscow: NII VShE Publ, 2017. (In Russ.).
12. *Spravochnik po radiolokacii: v 4 t. Vol. 1–4, per. s angl.* [Handbook of radar: in 4 vols. 1–4, trans. from English], Moscow, «Soviet Radio» Publ, 1976. (In Russ.).
13. Kolesnikov E.P., Kupin M.N., Chervyakov I.V. *Prakticheskie zadachi raketno-kosmicheskoy radiotekhniki. OOO NPC «SOTIS»* [Practical tasks of rocket and space radio engineering. NPC SOTIS LLC], Moscow, «Krasnaya Zvezda» Publ., 2021. (In Russ.).
14. *(DU-70M) Obshchee tekhnicheskoe opisaniye. OKB «Fakel»* [(DU-70M) General technical description. OKB «Hakel» [Electronic resource]. URL: <http://tdla.ssau.ru/uop/vvedrd/module5.pdf> (accessed 12.02.2024).
15. MIL-STD-461G. Requirements for monitoring the characteristics of electromagnetic interference of subsystems and equipment. The standard of the interface of the Ministry of Defense, 2015.

Поступила в редакцию: 07.03.2024

Одобрена рецензентами: 18.03.2024

Принята к печати: 27.03.2024

Об авторах

Евгений Павлович Колесников* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НПЦ «СОТИС». Адрес для почтовых отправлений: 121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 42, с. 1, каб. 522. E-mail: kepavl@yandex.ru.

Evgeny P. Kolesnikov* – PhD in Engineering sciences, Senior researcher at the Scientific Research Center «SOTIS». Postal address: 42, c. 1 Bolshoy Boulevard str., Skolkovo, Moscow, 121205. E-mail: kepavl@yandex.ru.

Михаил Николаевич Купин – главный конструктор НПЦ «СОТИС».

Mikhail N. Kupin – chief Designer of the Scientific Research Center «SOTIS».

Игорь Валерьевич Червяков – заместитель главного конструктора НПЦ «СОТИС».

Igor V. Chervyakov – deputy Chief designer of the Scientific Research Center «SOTIS».

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

В МАИ РАЗРАБОТАЛИ ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ МАЛЫХ СПУТНИКОВ СВЯЗИ И НАВИГАЦИИ

Специалисты Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики (НИИ ПМЭ) МАИ разработали высокочастотный ионный двигатель с электродами из углерод-углеродного композиционного материала, который продлит срок службы некоторым космическим спутникам до трех лет и более.

Представленный тип двигателя наиболее всего подходит для низкоорбитальных малых космических аппаратов (КА). Спутники малых орбит в диапазоне от 250 до 300 км являются очень перспективными. Работа на таких высотах значительно упрощает космические задачи, включая навигацию, дистанционное зондирование Земли и связь.

Остатки атмосферы тормозят КА, в результате чего он довольно быстро снижается. Срок активного существования низкоорбитальных спутников колеблется от нескольких дней до нескольких месяцев. Продлить работу аппаратов можно при помощи двигателей. Существующие жидкостные ракетные двигатели способны увеличить этот срок до года, однако тогда масса целевой аппаратуры на борту спутника будет стремиться к нулю.

Маевская установка решает эту проблему. Расчетное время ее работы составляет 28 тыс. ч – более трех лет – при этом она обладает достаточной тягой, чтобы парировать сопротивление набегающего потока атмосферных газов.



Изображение: challenge.school.msu.ru

Предполагается, что двигатель будет работать на ксеноне или криптоне. Специалисты НИИ ПМЭ МАИ выбрали в качестве материала электродов углерод-углеродный композит, благодаря чему удалось добиться устойчивости к эрозии.

Ранее инженеры МАИ разработали двигатель для космических аппаратов формата кубсат (CubeSat). Так называют искусственные спутники Земли, состоящие из одного или нескольких кубиков с габаритами 10×10×10 см при массе одного элемента не более 1,33 кг. По своим характеристикам двигатель не имеет аналогов среди отечественных и иностранных разработок. Его суммарный импульс тяги (то, какое количество топлива нужно задействовать для достижения определенной скорости) превышает показатели других моторных устройств этого типа в десятки раз.

Источники: mai.ru, iz.ru

УДК 629.58

СОЗДАНИЕ «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ» НАВИГАЦИИ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

И.А. СМИРНОВ, Н.В. СУДАКОВ, к.т.н,
ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики»

Аннотация. Рассматриваются варианты применения алгоритмов машинного обучения систем управления автономных необитаемых подводных аппаратов. Приведен обзор существующих прикладных методов искусственного интеллекта. Выявлен спектр перспективных и актуальных задач, не нашедших решения на сегодняшний день, а также ключевые конструктивные и программно-аппаратные характеристики и параметры, относительно которых могут быть применены современные алгоритмические подходы анализа данных. Одной из основных задач выделена автономная подводная навигация, которая, в свою очередь, декомпозируется на следующие подзадачи: обработка информации с обзорно-поискового комплекса, предназначенной для обнаружения целевых объектов, и построение на ее основе траектории движения автономного необитаемого подводного аппарата.

Ключевые слова: МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ; ПОДВОДНАЯ НАВИГАЦИЯ; АВТОНОМНЫЙ НЕОБИТАЕМЫЙ АППАРАТ; МЕТОД ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА; НЕЙРОННЫЕ СЕТИ; КЛАССИФИКАЦИЯ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ; ГИДРОЛОКАТОР; МОРСКОЙ РОБОТ.

Для цитирования: Смирнов И.А., Судаков Н.В. Создание «интеллектуальной» навигации для автономных необитаемых подводных аппаратов // Перспективные технологии для систем безопасности. 2024. № 1 (3). С. 64–77.



CREATION OF «INTELLIGENT» NAVIGATION FOR AUTONOMOUS UNINHABITED UNDERWATER VEHICLES

I.A. SMIRNOV, N.V. SUDAKOV, PhD in Engineering,
ISSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics»

Abstract. *The variants of application of machine learning algorithms for control systems of autonomous uninhabited underwater vehicles are considered. An overview of existing applied methods of artificial intelligence is given. A range of promising and urgent tasks that have not been solved to date, as well as key design and hardware-software characteristics and parameters, relative to which algorithmic approaches to data analysis can be applied, are identified. One of the main tasks is autonomous underwater navigation, which in turn is decomposed into the following subtasks: processing information from the survey and search complex in order to detect target objects and building a trajectory based on it.*

Keywords: MACHINE LEARNING; UNDERWATER NAVIGATION; AUTONOMOUS UNINHABITED VEHICLE; ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHOD; NEURAL NETWORKS; CLASSIFICATION OF UNDERWATER OBJECTS; SONAR; MARINE ROBOT.

For citation: Smirnov I.A., Sudakov N.V. Creation of «intelligent» navigation for autonomous uninhabited underwater vehicles. *Perspektivnye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti* [Promising technologies for security systems], 2024, N 1 (3), pp. 64–77. (In Russ.).

Введение

Российская Федерация обладает одной из самых протяженных береговых линий в мире. Ее омывают воды трех океанов: Северного Ледовитого, Атлантического и Тихого. На территории нашей страны находится большое количество окраинных (Баренцево, Карское, Японское) и внутренних (Белое, Балтийское, Черное, Азовское) морей, каждое из которых обладает своими гидрофизическими и гидрологическими особенностями. По воде Россия граничит с 12 государствами, а суммарная протяженность морских границ составляет порядка 39 000 км.

Морской континентальный шельф представляет интерес в части разведки и добычи полезных ископаемых, разработки подводных месторождений нефти и газа. Не менее актуальными являются: проведение подледных работ, прокладка линий связи, возведение подводной инфраструктуры, экологический мониторинг, разведка и охрана акваторий. Однако значительная удаленность от берега, обширность акваторий, суровые климатические условия, большие глубины, а также сложности рельефа дна сильно ограничивают возможности использования водолазов и традиционных

видов подводной техники при решении перечисленных задач. Кроме того, их быстрое масштабирование не представляется возможным из-за необходимости привлечения большего количества узкопрофильных специалистов. Таким образом, остро встает вопрос повышения уровня автономности проводимых работ.

В экстремальных условиях наиболее перспективным считается применение автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), поскольку они не имеют функциональной зависимости от обеспечивающего судна-носителя и могут проводить работы на большой акватории, с высокой скоростью перемещения и сбора данных, в непосредственной близости от целевых объектов в условиях сложного рельефа. Участие оператора в управлении АНПА сводится к указанию целей и/или маршрута движения. В отличие от кабельных систем, в которых эффективность уменьшается пропорционально длине кабеля, АНПА полностью независим. Передача дополнительных корректирующих команд на борт аппарата осуществляется с помощью беспроводного канала связи (гидроакустического в погруженном состоянии).

Перечисленные преимущества позволяют использовать АНПА для решения актуальных и перспективных задач в автономном режиме, среди которых:

- длительное маневрирование по заданной программе в акватории с одновременным проведением океанологических, гидрофизических, гидрографических и биологических исследований;

- геолого-разведочные работы, включающие топографическую и фотовидео съемку морского дна, поиск полезных ископаемых на больших глубинах и предварительное определение химического состава геологических образований;

В экстремальных условиях наиболее перспективными считаются автономные необитаемые подводные аппараты, так как они могут функционировать независимо от судна-носителя и проводить работы на большой акватории, с высокой скоростью перемещения и сбора данных, в непосредственной близости от целевых объектов в условиях сложного рельефа.

- обзорно-поисковые работы, включая поиск и обследование затонувших объектов, инспекцию подводных сооружений и коммуникаций (трубопроводов, кабелей, водоводов), обследование и обслуживание подводных кабельных линий, оборудование районов донными маяками-ответчиками, поиск объектов и их идентификация;

- инженерные изыскания на стадии подготовки к подводному строительству: топографическая и фотовидеосъемка морского дна, акустическое профилирование и картографирование рельефа;

- подледные работы, мониторинг водной среды, оценка биоресурсов, обследование нижней кромки ледяных полей, подледная геология;

- работы военного назначения, противолодочная разведка, обеспечение безопасности объектов военной техники, обследование минных полей, сбор данных и постановка помех, слежение, обеспечение связи, освещение подводной обстановки [1–4].

Классификация АНПА по совокупности характеристик

Класс АНПА	Диаметр корпуса, мм	Вес, кг	Автономность (при базовой нагрузке), ч	Автономность (при максимальной нагрузке), ч	Объем полезной нагрузки, м ³
Переносные	80...230	До 45	До 10	10...20	До 0,025
Легкие	324	230	10...20	20...40	1...3
Средние	533	До 1360	20...50	40...80	4...6
Тяжелые	От 910	9000	100...300	От 400	15...30

На сегодняшний день АНПА в России и за рубежом представлены широкой номенклатурой изделий, классифицируемой по ряду параметров, таких как: характер выполняемых задач, размеры, масса, предельная глубина погружения, энергоемкость, принцип передвижения. В табл. 1 представлен пример классификации АНПА по совокупности характеристик [1].

Следует отметить, что, несмотря на все разнообразие существующих технических решений в области построения АНПА, до недавнего времени спектр выполняемых ими задач был ограничен (по данным MarketsandMarkets [5], порядка 85% операций, выполняемых подводными роботами, осуществляются в телеуправляемом режиме). Это связано с необходимостью синтеза системы оперативного планирования и принятия решений в ходе выполнения маршрутного задания миссии. Подавляющее большинство работ, проводимых АНПА, подразумевает выполнение задач в условиях частичного или полного отсутствия априорной информации об окружающей обстановке, отсутствия картографирования, работах в обширных акваториях с непрерывно меняющимися внешними условиями и

окружением. Кроме того, ситуация усугубляется отсутствием возможности навигационной коррекции по данным спутниковых навигационных систем, а также систем связи на периодической или постоянной основе.

Состав навигационного и гидроакустического комплексов современных АНПА позволяет осуществлять относительно точную подводную навигацию и производить высокоточную съемку окружающей акватории. Однако задачи высокоточного прохождения протяженных траекторий с коррекцией по данным гидролокаторов, а также задачи выделения и классификации окружающих объектов до последнего времени не были решены. Это связано с зависимостью от уровня развития вычислительных систем, методик обработки данных и разработки высокоэффективных источников питания. Активное развитие упомянутых наукоемких технологий в совокупности с существенным ростом вычислительных мощностей дали стимул к образованию такого направления, как машинное обучение, то есть совокупности методов искусственного интеллекта (ИИ), характерной чертой которых является не прямое решение задачи, а обучение за счет

применения множества сходных задач. В свою очередь, ИИ может быть применен для достижения нетривиальных целей, стоящих перед АНПА.

Среди методов ИИ можно выделить следующие фундаментальные направления:

- искусственные потенциальные поля;
- искусственные нейронные сети;
- нечеткая логика;
- эволюционные алгоритмы;
- роевые алгоритмы.

Для реализации задачи простого траекторного движения без большого количества внешних объектов и препятствий применяются традиционные подходы, такие как метод потенциального поля, основанный на фундаментальных физических явлениях (препятствие «отталкивает», а целевая точка «притягивает», рис. 1), метод одновременной локализации и картографирования (SLAM).

Ввиду динамичности изменения внешних параметров среды и окружения, а также нахождения в условиях полного или частичного отсутствия информации о фоноцелевой обстановке, задача автономной подводной навигации требует адаптивности алгоритмов к быстроменяющимся параметрам окружения, а также обучаемости, чего лишены классические алгоритмы ИИ. Особый интерес в решении поставленных задач представляют ис-

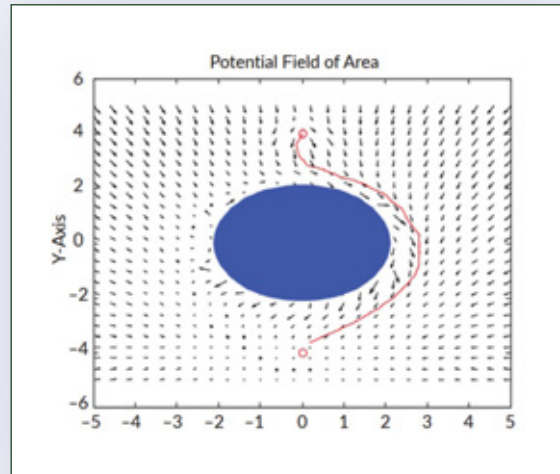


Рис. 1. Метод потенциального поля

кусственные нейронные сети (НС), обладающие способностью к обработке данных, распознаванию и классификации объектов, обучению, интерпретации данных.

В работе [6] авторы решают задачу навигации и планирования в реальном времени с помощью биоинспирированной НС. Она показала свою эффективность при решении задач точного извлечения информации о движении небольших объектов на зашумленном большом фоне. Такой подход в навигации АНПА позволяет реализовать управление аппаратом в недетерминированной среде, в больших акваториях при постоянно изменяющейся целевой обстановке. На рис. 2 представлена структура НС.

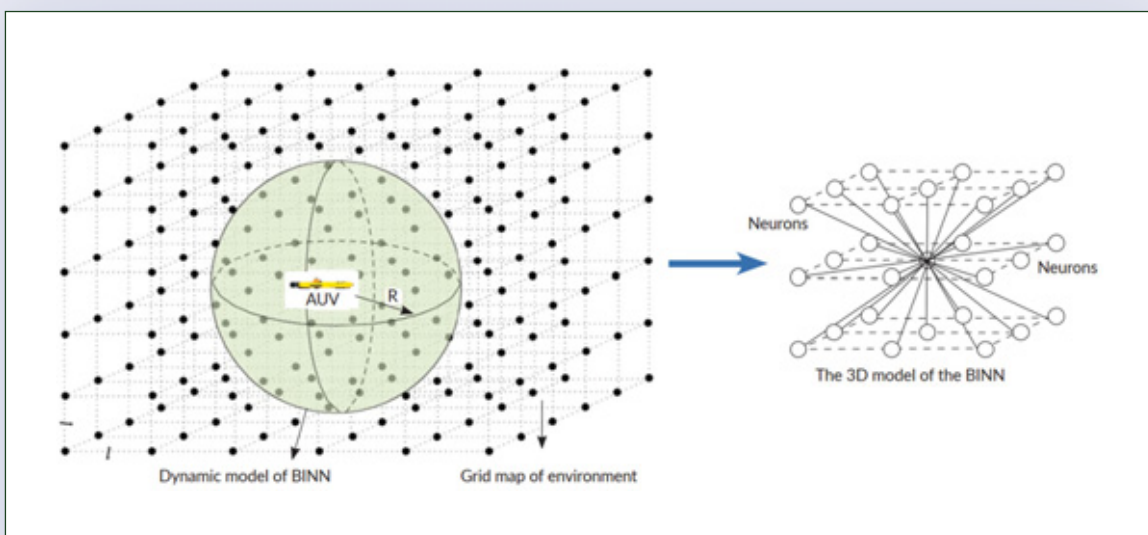


Рис. 2. Структура нейронной сети

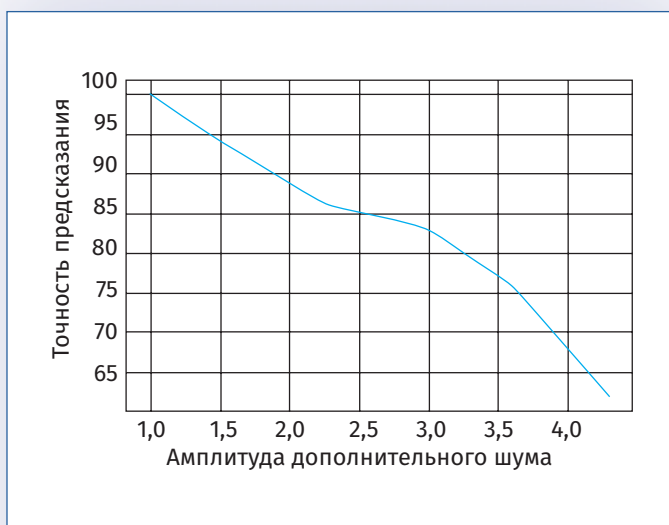


Рис. 3. Предсказание нейросетевым алгоритмом при классификации шумов танкера

Решение задачи обеспечения навигации также лежит в плоскости работы с системами связи. При наличии достаточного объема обучающих данных алгоритмы машинного обучения (нейронные сети) способны обнаруживать сложные взаимосвязи между признаками, особенностями сигналов и классами, к которым можно сигналы отнести. Кроме того, машинное обучение может обнаруживать связи между самими признаками сигналов. Анализ данных усложняется рядом проблем: недостаточный объем данных или их повреждение, реверберация и многолучевость при распространении звука. Классификация подводных акустических сигналов и шумов активно развивается и интересует исследователей из-за широкого спектра возможностей ее применения: обнаружение и определение типа морских судов, оценка влияния шумов прибрежных городов и портов на окружающую среду, предсказание возможных природных катаклизмов, классификация подводной флоры и фауны.

В диссертации «Нейросетевой метод идентификации морских объектов

по гидроакустическим шумам» автор (Кузин Д.А.) рассматривает алгоритмы обработки гидроакустических шумов для вычисления особенностей и закономерностей, присущих какому-либо классу биологического или техногенного шума, а также применение методов машинного обучения и НС для анализа большого объема акустических данных, полученных с гидроакустического приемника или набора датчиков, собранных в сенсорную сеть и располагающихся в акватории. На рис. 3 представлены результаты предсказания искусственной НС при классификации шумов танкера в зависимости от амплитуды дополнительного шума.

В работе [7] автор использует НС с нелинейной реконструкцией состояния, позволяющей компенсировать неточность измерений навигационной системы. Состояние АНПА между двумя реальными измерениями системы навигации восстанавливается с помощью НС, что дает оценочное положение аппарата.

Решение задачи мониторинга акватории предполагает регулярное отслеживание определенного набора характеристик (параметров) выделенного объекта. Иными словами, происходит непрерывное наблюдение и анализ состояния объекта, фиксирование динамики поведения соответствующих параметров с целью последующего вмешательства для их целенаправленного изменения. Среди множества возможных направлений применения систем подводного мониторинга можно выделить два основных вида работ. В первую очередь это работы исследовательского характера, направленные на решение проблем современной океанологии – сбор информации о физических параметрах водной среды (температура, соленость и т.д.). Другой вид касается подводно-технических работ, таких как обслуживание донных станций и измери-

тельных систем, обеспечение прокладки и регламентное обслуживание подводных кабелей и трубопроводов, участие в аварийно-спасательных операциях [8].

Как уже говорилось ранее, информационное взаимодействие АНПА с внешней средой для решения задачи мониторинга в широком диапазоне дальностей осуществляется с использованием гидроакустических средств, таких как гидролокаторы. Данные, получаемые с акустических устройств, представляют собой изображения рельефа дна/окружения с расположенными на нем объектами или препятствиями. Оценку изображения обычно дает оператор, который и определяет класс объекта. Для ряда задач, таких как навигация по рельефу, картографирование и т.д., то есть при большом объеме информации целесообразно распознавать изображения в автоматическом режиме. Однако, несмотря на широкое применение методов распознавания образов в различных областях, до настоящего времени этот вопрос не решен [9].

Сложность рассматриваемой общей задачи поиска подводных объектов с помощью получаемых изображений определяется высокой степенью изменчивости реальных условий, таких параметров, как ракурс, положение, освещение, цвет, форма и т.д.

Для поиска целевых донных объектов в работе [9] коллектив авторов использует сверточную НС с техникой переноса знаний для выделения и классификации объектов на изображениях гидролокатора бокового обзора (ГБО). Стоит отметить, что современные модели распознавания, построенные с применением НС, могут включать сотни параметров, а процесс тренировки требует миллионы тестовых изображений. Применение метода переноса обучения позволяет использо-

вать искусственную НС, предварительно натренированную на другом датасете (наборе данных), заменить ее классификатор и использовать в новой модели для другой задачи. На рис. 4 представлен результат тестирования программы классификации подводных объектов на изображениях с ГБО.

Для решения задачи мониторинга в диссертационной работе Смагина А.С. «Алгоритмы компьютерного зрения для оценки состояния подводных сетчатых ограждений» была разработана сверточная НС для автоматизации поиска повреждений и загрязнений сетчатых ограждений рыбноводных ферм. На рис. 5 представлен результат определения состояния сетчатых ограждений, полученных НС.

Стоит отметить, что использование НС непрерывно сопровождается созда-


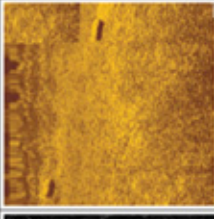
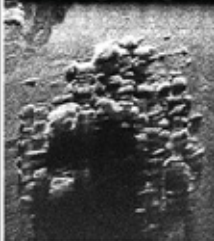
№ теста	Изображение	Вероятность отнесения объекта на изображении к категории, %				
		A	B	C	D	E
2		99.84	0.00	0.14	0.00	0.02
19		1.59	79.27	0.14	12.51	6.50
22		87.43	12.17	0.11	0.10	0.18

Рис. 4. Результаты тестирования программы классификации подводных объектов на изображениях с гидролокатора бокового обзора

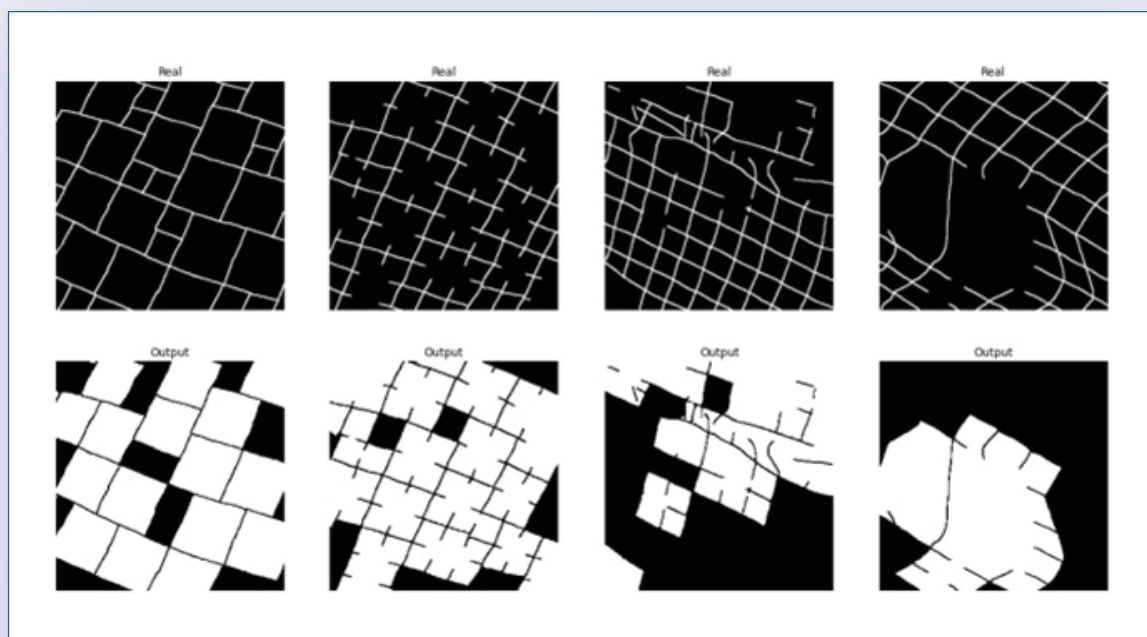


Рис. 5. Результат работы нейронной сети по поиску повреждений и загрязнений сеточных ограждений рыбоводных ферм

нием и улучшением наборов датасетов. От качества тренировочных данных напрямую зависит точность выходного слоя нейросети. На сегодняшний день существуют обширные наборы сырых неразметченных гидроакустических данных, однако полностью отсутствуют датасеты для обучения искусственных НС. При отсутствии необходимого объема обучающей выборки существуют алгоритмы его искусственного увеличения или аугментации [10]. Наиболее результативным методом искусственного увеличения датасета является генеративно-сопоставительная НС, состоящая из генератора и дискриминатора, которые в процессе взаимного обучения обеспечивают порождение изображений требуемой точности, из которых впоследствии можно формировать обучающие наборы данных.

Широкомасштабные задачи, стоящие перед морскими роботами, связанные с мониторингом или поисковыми работами (после стихийных бедствий или катас-

троф), с геологоразведкой, океанологией, производятся на огромных площадях и объемах водного пространства. В рамках подобных задач при временных ограничениях целесообразно использование группы АНПА. Так, например, в 2014 г. одиночно используемый АНПА Bluefin-21 за 360 ч, обследовав более 800 км² морского дна, не смог найти потерпевший крушение рейс Malaysia Airlines. В то же время согласованная работа группы АНПА компании Ocean Infinity в 2017 г. позволила обнаружить затонувшую подводную лодку S-42.

В работе [11] коллектив авторов использует генетические алгоритмы, способные находить за приемлемое время допустимые рациональные действия, удовлетворяющие всем ограничениям и относящиеся к итерационным алгоритмам, для решения двух задач динамического планирования групповых маршрутов АНПА: выполнения мультиобъектной обзорно-исследовательской миссии и

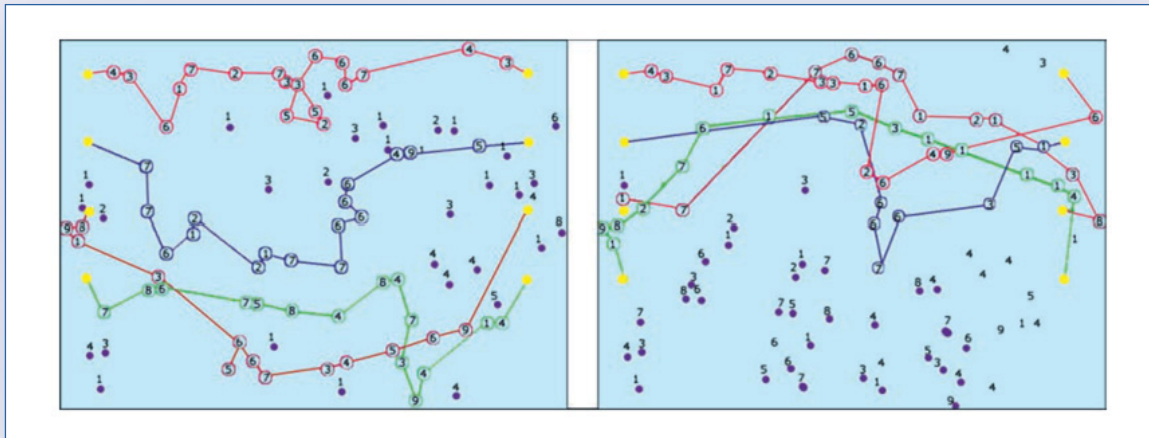


Рис. 6. Маршруты группы АНПА

миссии по регулярному освещению подводной обстановки.

Стоит отметить, что выполнение задач группового управления предъявляет существенные требования к системе связи между агентами внутри группы как напрямую, так и через другие АНПА (распределенная сеть) в процессе выполнения миссии.

В работе [12] авторы решают задачу управления группировкой АНПА, выполняющих коллективные целенаправленные действия в определенной области подводного пространства (Стратегии поведения группы АНПА и выборе оптимальных маршрутов в условиях неполной информации о внешней среде). Для распределения целей между АНПА используется генетический алгоритм, который выбирает порядок обхода целей по заданной целевой функции. На рис. 6 показаны маршруты АНПА при перемещении груп-



Рис. 7. Группа АНПА проекта CoCoRo

пы из заданного множества начальных положений в заданное множество конечных.

Решение задач группового управления АНПА возможно с применением роевых алгоритмов – децентрализованному методу, основанному на поведенческих паттернах социальных животных. Основная концепция роевых алгоритмов – это автономность, распределенное функционирование и самоорганизация. Построение системы планирования движения на

Основная концепция роевых алгоритмов – автономность, распределенное функционирование и самоорганизация. Построение системы планирования движения на основе таких алгоритмов предъявляет требования к системе связи аналогично использованию генетических (эволюционных) методов.

основе таких алгоритмов предъявляет требования к системе связи аналогично использованию генетических (эволюционных) методов.

Примером применения роевых методов в морской робототехнике является проект Collective Cognitive Robots (CoCoRo), представляющий собой группу АНПА для решения задач экологического мониторинга, а также исследования и добычи полезных ископаемых. Гетерогенная группа состоит из 40 морских роботов,

которые способны действовать согласованно (20 подводных роботов-разведчиков и 20 роботов, осуществляющих связь между разведчиками и базовой станцией-катамараном). На рис. 7 представлена группа АНПА проекта CoCoRo.

Часть перспективных задач, таких как мониторинг акватории, подразумевает равномерное распределение агентов системы по заданной акватории. В работе [13] проведено моделирование равномерного распределения роя АНПА

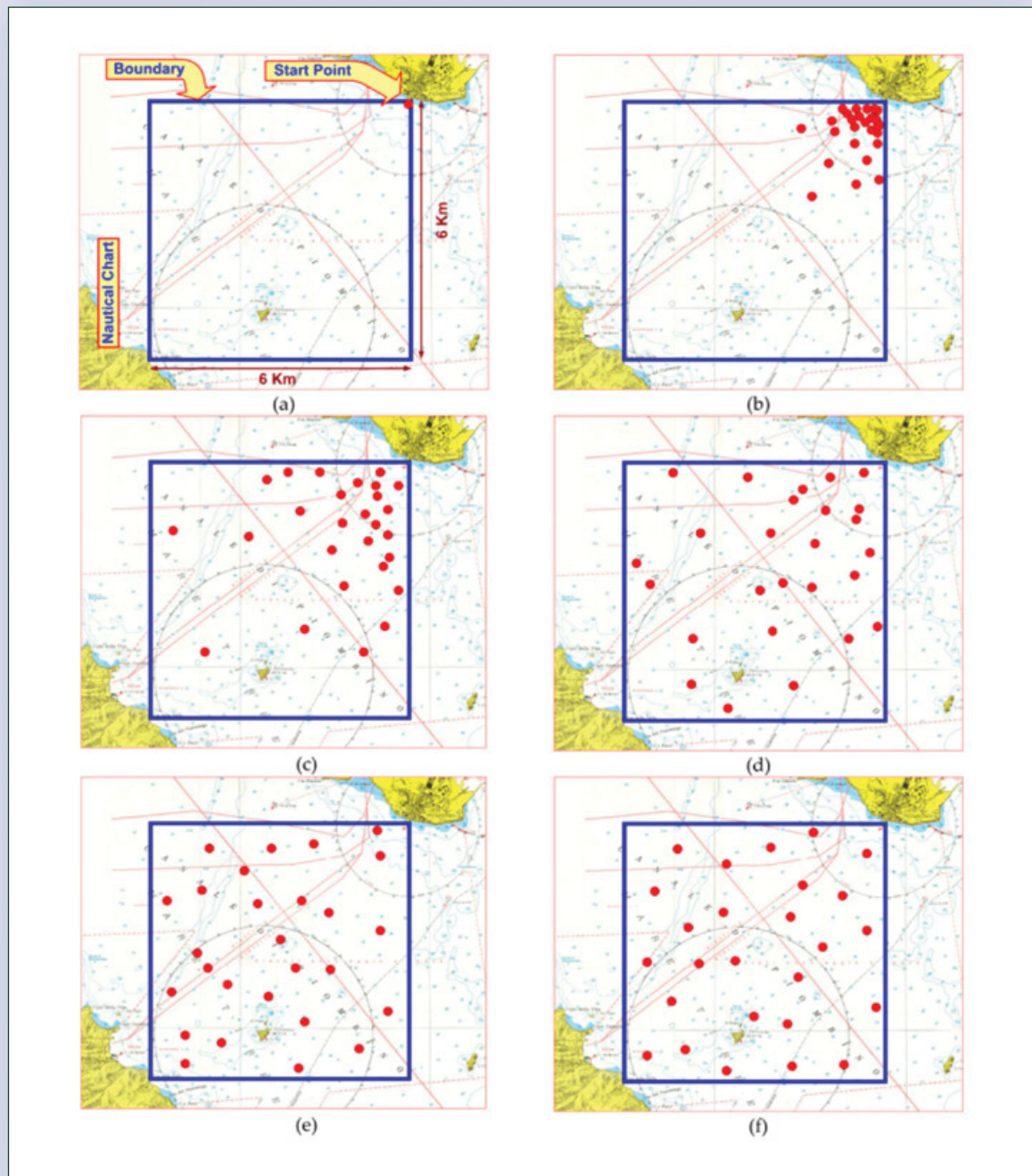


Рис. 8. Моделирование распределения роя АНПА по водному пространству

Таблица 2

Классификация методов машинного обучения для обеспечения задачи автономной навигации

Задача	Методы
Навигация в условиях присутствия единичных неподвижных препятствий, в том числе: следование по маршруту; картографирование	Искусственное потенциальное поле; метод одновременной локализации и картографирования
Навигация в условиях частичного или полного отсутствия информации о фоноцелевой обстановке в условиях наличия протяженных и подвижных объектов	Искусственные сверточные и биоинспирированные НС
Обзорно-поисковые работы, инспекция подводных сооружений и коммуникаций, обслуживание кабельных линий, в том числе: идентификация и классификация объектов; увеличение набора тренировочных данных	Искусственные сверточные НС; генеративно-состязательные НС
Океанографические изыскания, проведение гидрографических, биологических, гидрофизических исследований на протяженных акваториях	Генетические алгоритмы, роевой интеллект, биоинспирированные НС

по водному пространству (рис. 8), а в работе [14] – распределение интеллектуальных буев, дрейфующих подо льдом. Буи обеспечивают АНПА возможность уточнить свое местоположение, нивелируя ошибки показаний спутниковой навигационной системы, возникающие при подледном функционировании.

Таким образом, можно отметить следующее:

- спектр потенциальных актуальных задач, который может быть решен с применением АНПА, существенно возрос, ввиду активного развития вычислительных технологий и как следствие методов ИИ;

- на сегодняшний день существуют отечественные и зарубежные теоретические и практические наработки в части внедрения методов машинного обучения в алгоритмы управления АНПА с целью обеспечения задач автономной навигации;

- на практике отсутствует классификация фундаментальных методов машинно-

го обучения с увязкой на характер выполняемой АНПА задачи.

В табл. 2 представлена классификация методов машинного обучения с увязкой к характеру выполняемых АНПА задач, сформированная по результатам обзора и анализа существующих наработок в России и за рубежом.

Вывод

В работе приведена классификация современных отечественных и зарубежных образцов АНПА. Выявлен спектр перспективных и актуальных задач, не нашедших решения на сегодняшний день. Приведены обзор и анализ существующих отечественных и зарубежных решений в части применения методов машинного обучения для реализации алгоритмов управления автономными необитаемыми подводными аппаратами. По результатам обзора произведена классификация алгоритмов искусственного интеллекта с увязкой к характеру выполняемых АНПА задач.

Список литературы

1. Войтов Д.В. Автономные необитаемые подводные аппараты. М.: МОРКНИГА, 2015. 332 с.
2. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В. Создание интеллектуальных АНПА и проблемы интеграции научных исследований // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 1. С. 6–17.
3. Кузьмицкий М.А., Гизитдинова М.Р. Мобильные подводные роботы в решении задач ВМФ: Современные технологии и перспективы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4, № 3. С. 37–48.
4. Гизитдинова М.Р., Кузьмицкий М.А. Мобильные подводные роботы в современной океанографии и гидрофизике // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. Т. 3, № 1. С. 4–13.
5. Unmanned Underwater Vehicles (UUV) Market worth 5.20 Billion USD by 2022 // Markets and Markets. July 24, 2017.
6. Jianjun Ni., Liuying Wu., Pengfei Shi., Simon X. Yang. A Dynamic Bioinspired Neural Network Based Real-Time Path Planning. Computational Intelligence and Neuroscience, 2017, N 1, pp. 1–16, DOI: 10.1155/2017/9269742.
7. Guo J., Li D., He B. Intelligent Collaborative Navigation and Control for AUV Tracking. In IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, V. 17, N 3, pp. 1732–1741, DOI: 10.1109/TII.2020.2994586.
8. Кабанов А.А. Система 3D-зрения для подводного робототехнического комплекса / А.А. Кабанов, В.А. Крамарь, О.А. Крамарь // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2021. № 2 (54). С. 113–125.
9. Метод автоматической классификации подводных потенциально опасных объектов / Артюхин В.В. [и др.] // Технологии гражданской безопасности. 2019. Т. 6, № 1(59). С. 13–19.
10. Forsyth D.A. Computer Vision: A Modern Approach, 2nd Edition. David A. Forsyth, Jean Ponce – 2nd Edition – Pearson, 2011, 792 p., ISBN: 978-0-1360-8592-8.
11. Бычков И.В., Кензин М.Ю. Генетические алгоритмы в задачах планирования динамических миссий для группы автономных подводных роботов [Электронный ресурс]. URL: <https://dspace.enu.kz/jspui/bitstream/data/4892/1/geneticheskie.pdf?ysclid=lpaiyrqwe384541262> (дата обращения: 25.10.2023).
12. Киселев Л.В., Инзарцев А.В. Ситуационное управление группировкой автономных подводных роботов на основе генетических алгоритмов // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 2(8). С. 34–43.
13. Petritoli E., Cagnetti M., Leccese F. Simulation of Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) Swarm Diffusion. Sensors 2020, DOI: 10.3390/s2017495.
14. Norgren, Petter & Mo-Bjørkelund, Tore & Gade, Kenneth & Hegrenæs, Øyvind & Ludvigsen, Martin. Intelligent Buoys for Aiding AUV Navigation Under the Ice, 2020, DOI: 10.1109/AUV50043.2020.9267889.

References

1. Voytov D.V. *Avtonomnye neobitaemye podvodnye apparaty* [Autonomous uninhabited underwater vehicles]. Moscow: MORKNIGA Publ., 2015, 332 p. (In Russ.).
2. Kiselev L.V., Inzartsev A.V., Matvienko Yu.V. Creation of intelligent ANPA and problems of integration of scientific research // *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2006, N 1, pp. 6–17. (In Russ.).
3. Kuzmitsky M.A., Gizitdinova M.R. Mobile underwater robots in solving Navy tasks: Modern technologies and prospects // *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and applied hydrophysics], 2011, V. 4, N 3, pp. 37–48. (In Russ.).
4. Gizitdinova M.R., Kuzmitsky M.A. Mobile underwater robots in modern oceanography and hydrophysics // *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and applied hydrophysics], 2010, V. 3, N 1, pp. 4–13. (In Russ.).
5. Unmanned Underwater Vehicles (UUV) Market worth 5.20 Billion USD by 2022 // Markets and Markets. July 24, 2017.
6. Jianjun Ni., Liuying Wu., Pengfei Shi., Simon X. Yang. A Dynamic Bioinspired Neural Network Based Real-Time Path Planning. Computational Intelligence and Neuroscience, 2017, N 1, pp. 1–16, DOI: 10.1155/2017/9269742.
7. Guo J., Li D., He B. Intelligent Collaborative Navigation and Control for AUV Tracking. In IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, V. 17, N 3, pp. 1732–1741, DOI: 10.1109/TII.2020.2994586.
8. Kabanov A.A. Three-dimensional vision system for underwater robotic complex / A.A. Kabanov, V.A. Kramar, O.A. Kramar // *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: management and high technologies], 2021, N 2 (54), pp. 113–125. (In Russ.).
9. Method of automatic classification of underwater potentially dangerous objects / Artyukhin V.V. [et al.] // *Tekhnologiya grazhdanskoj bezopasnosti* [Technology of civil safety], 2019, Vol. 6, N 1(59), pp. 13–19. (In Russ.).
10. Forsyth D.A. Computer Vision: A Modern Approach, 2nd Edition. David A. Forsyth, Jean Ponce – 2nd Edition – Pearson, 2011, 792 p., ISBN: 978-0-1360-8592-8.

11. Bychkov I.V., Kenzin M.Yu. *Geneticheskie algoritmy v zadachah planirovaniya dinamicheskikh missij dlya gruppy avtonomnykh podvodnykh robotov* [Genetic algorithms in dynamic mission planning tasks for a group of autonomous underwater robots]. Available at: <https://dspace.enu.kz/jspui/bitstream/data/4892/1/genetic.pdf?ysclid=lpaiyrqwe384541262> (accessed: 25 October 2023). (In Russ.).

12. Kiselev L.V., Inzartsev A.V. Situational management of a group of autonomous underwater robots based on genetic algorithms // *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2009, N 2(8), pp. 34–43. (In Russ.).

13. Petritoli E., Cagnetti M., Leccese F. Simulation of Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) Swarm Diffusion. *Sensors* 2020, DOI: 10.3390/s2017495.

14. Norgren, Petter & Mo-Bjørkelund, Tore & Gade, Kenneth & Hegrenæs, Øyvind & Ludvigsen, Martin. Intelligent Buoys for Aiding AUV Navigation Under the Ice, 2020, DOI: 10.1109/AUV50043.2020.9267889.

Поступила в редакцию: 30.11.2023

Одобрена рецензентами: 05.12.2023

Принята к печати: 27.03.2024

Об авторах

Иван Алексеевич Смирнов* – сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики». Адрес для почтовых отправлений: 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А. E-mail: smirnovivan_198@mail.ru.

Ivan A. Smirnov* – employee of SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics». Postal address: 16A Nagatinskaya str., Moscow, 115487. E-mail: smirnovivan_198@mail.ru.

Николай Владимирович Судаков – кандидат технических наук, сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики».

Nikolai V. Sudakov – PhD in Engineering sciences, employee of SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics».

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

УДК 629.05

ОСОБЕННОСТИ ТРАВЛЕНИЯ ТОЛСТЫХ СЛОЕВ АЛЮМИНИЯ В ХЛОРСОДЕРЖАЩЕЙ ПЛАЗМЕ

Д.Ю. ОБИЖАЕВ, к.т.н., С.Ю. СУЗДАЛЬЦЕВ, к.т.н., С.А. ЖУКОВА, к.т.н., С.А. УЛЬЯНОВ,
ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики»

Аннотация. Проведены исследования процессов плазмохимического травления толстых алюминиевых слоев в смеси $\text{BCl}_3\text{-Cl}_2$. Показано, что для снижения подтравки под фоторезистивную маску и формирования вертикального профиля формируемого топологического рисунка необходимо использовать многостадийный итерационный процесс травления, а также дополнительные операции подготовки поверхности и удаления фоторезиста.

Ключевые слова: ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ; ФОТОРЕЗИСТИВНАЯ МАСКА; ФОТОЛИТОГРАФИЯ; АЛЮМИНИЕВЫЕ ДОРОЖКИ; ХЛОРСОДЕРЖАЩАЯ ПЛАЗМА; ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ РИСУНОК; ПАССИВАТОР.

Для цитирования: Обижаев Д.Ю. Особенности травления толстых слоев алюминия в хлорсодержащей плазме / С.Ю. Суздальцев, С.А. Жукова, С.А. Ульянов // Перспективные технологии для систем безопасности. 2024. № 1 (3). С. 78–86.

FEATURE OF THICK ALUMINUM LAYERS ETCHING IN CHLORINE SUBSTANCE PLASMA

D.YU. OBIZHAEV, PhD in Engineering, S.YU. SUZDALTSEV, PhD in Engineering,
S.A. ZHUKOVA, PhD in Engineering, S.A. YLYANOV,
**ISSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute
of Chemistry and Mechanics»**

Abstract. *Studies have been carried out on the processes of plasma-chemical etching of thick aluminum layers in a BCl_3 - Cl_2 mixture. It is shown that to reduce the undercut under the photoresist mask and form the vertical profile of the formed topological pattern, it is necessary to use a multi-stage iterative etching process, as well as additional operations of surface preparation and removal of photoresist.*

Keywords: PLASMA CHEMICAL ETCHING; PHOTORESISTIVE MASK; PHOTOLITHOGRAPHY; ALUMINUM TRACKS; CHLORINE-CONTAINING PLASMA; TOPOLOGICAL DRAWING; PASSIVATOR.

For citation: *Obizhaev D.Yu., Suzdaltsev S.Yu., Zhukova S.A., Ylyanov S.A. Feature of thick aluminum layers etching in chlorine substance plasma. Perspektivnye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti [Promising technologies for security systems], 2024, N 1 (3), pp. 78–86. (In Russ.).*

Введение

Алюминий, по сравнению с золотом или медью, обладает преимуществами при использовании его в качестве основного материала металлизации в устройствах микроэлектроники. Это обеспечивается его низкой себестоимостью, большой электропроводностью, малой скоростью термодиффузии в кремнии или оксиде кремния. «Сухое» плазмохимическое травление алюминия в хлорсодержащей плазме к настоящему моменту достаточно хорошо изучено [1–4]. Известно, что использование соединения BCl_3 в качестве основного плазмообразующего газа является более предпочтительным по сравнению с CCl_4 по причине того, что BCl_3 не является канцерогеном, не полимеризуется в плазме, обладает геттерной способностью к кислороду и парам воды [5].

В литературе достаточно хорошо описаны способы плазмохимического травления алюминия в смесях $\text{BCl}_3\text{--Cl}_2$, в которых обеспечивается высокая скорость удаления алюминия (Al) и диоксида кремния (SiO_2). Тем не менее технология травления слоев алюминия толщиной более 1,0 мкм с формированием воспроизводимого профиля боковых стенок не является тривиальной задачей, поскольку она сильно зависит от множества факторов: способа создания плазмы, нанесения и площади поверхности обрабатываемого алюминия, параметров используемой фоторезистивной маски и т.д.

Цель настоящей работы – исследование влияния на характеристики бокового профиля формируемых шин металлизации следующих условий: плазмохимического травления алюминия (соотношения BCl_3/Cl_2 , продолжительности процесса и мощности ВЧ-разряда); предварительной обработки пластины перед травлением; химической и плазмохимической обработки пластины после травления.

Подготовка образцов и проведение экспериментальных исследований

Использовали пластины монокристаллического кремния диаметром 100 мм. Слой SiO_2 толщиной 400 нм осаждали плазмохимическим методом при температуре подложкодержателя 280 °С, слой Al толщиной 1500 нм формировали методом магнетронного или электронно-лучевого распыления алюминиевой мишени. Для формирования фоторезистивной маски применяли контактную фотолитографию на основе позитивного плазмостойкого фоторезиста Megaposit SPR 220-3.0 толщиной 3000 нм (возможен Microposit S1813 – 1300 нм). Топологический рисунок представлял собой шины, ширину которых варьировали в диапазоне – от 4500 до 6000 нм. Процессы плазмохимического травления алюминия проводили методом реактивного ионного удаления материала с поверхности подложки. Пластины загружали в реактор и обрабатывали индивидуально, загрузка осуществлялась автоматическим манипулятором через шлюз.

Дефектность профиля алюминиевых дорожек исследовали методами сканирующей электронной микроскопии под прямым углом и под наклоном 45°.

Результаты

При проведении плазмохимического травления алюминия в смесях $\text{BCl}_3\text{--Cl}_2$ в случае использования фоторезистивных масок на боковых поверхностях формируемого топологического рисунка образуется пассивирующий «защитный» слой, состоящий из продуктов полимеризации BCl_3 , алюминия и разрушающегося от плазменного воздействия фоторезиста (рис. 1). Наличие этого слоя позволяет проводить глубокое травление алюминия без появления значительного подтрав

под маску. Форма защитного слоя сильно зависит от текущих технологических параметров [6].

Обнаружено, что малейшие остатки фоторезистов на обрабатываемой в BCl_3-Cl_2 поверхности приводят к появлению ярко выраженных и существенных дефектов из-за формирования пассивирующих слоев около каждого загрязнения. На рис. 1, б, в показаны области кремниевой подложки с участком фотолитографической маски на алюминии в виде круга диаметром 3,5 мкм. Боковая поверхность формируемого профиля покрыта слоем пассиватора. Вокруг топологического рисунка рассеяны мелкие загрязнения, также покрытые слоем пассиватора. Установ-

Формирование профиля боковых стенок зависит от способа создания плазмы, нанесения и площади поверхности обрабатываемого алюминия, параметров используемой фоторезистивной маски и т.д.

лено, что для эффективного травления в BCl_3-Cl_2 и получения чистой поверхности после проведения этапа фотолитографии необходимо провести дополнительную плазменную очистку в кислородсодержащей плазме. Отметим, что процессы плаз-

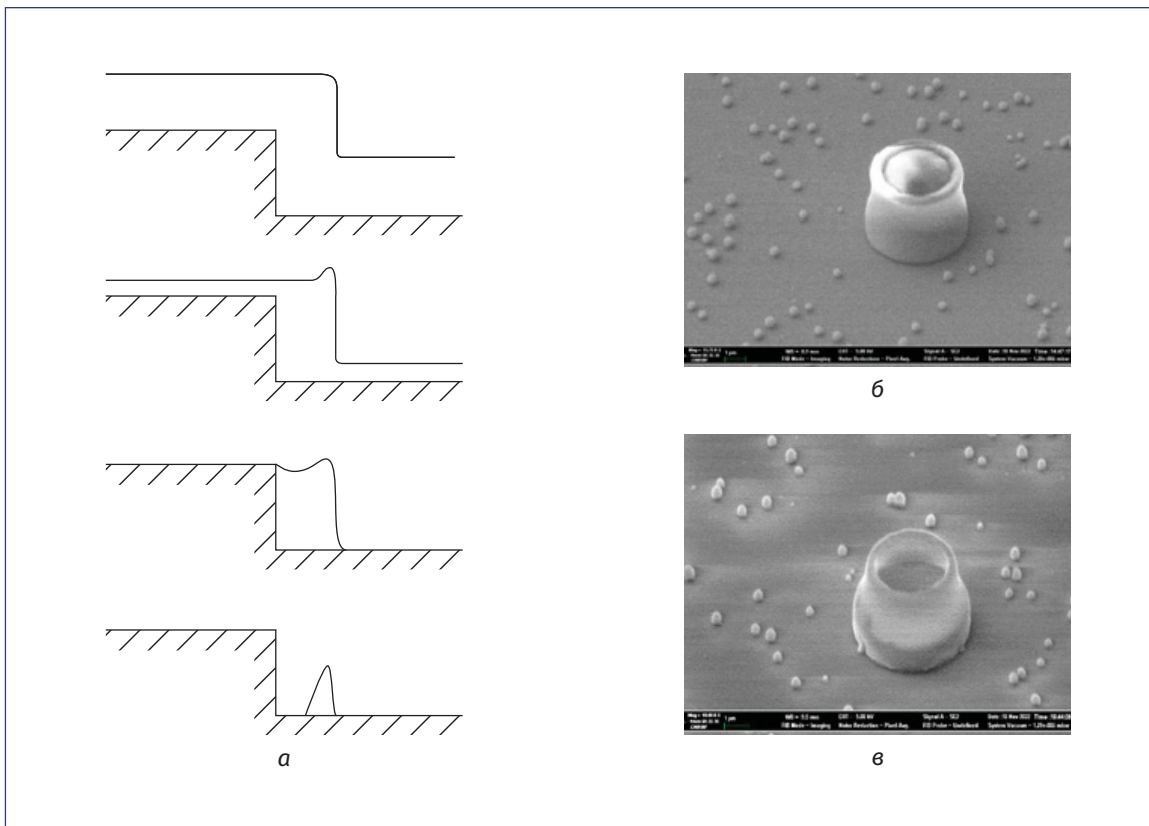


Рис. 1. Формирование слоя пассиватора при плазмохимическом травлении алюминия в смесях BCl_3-Cl_2 : а – варианты бокового профиля при осаждении слоя пассиватора при различных мощностях ВЧ-разряда [6]; б, в – микроэлектронные фотографии слоя пассиватора, сформированного на поверхности алюминия, покрытого фоторезистом при мощности ВЧ-разряда 200 и 300 Вт соответственно

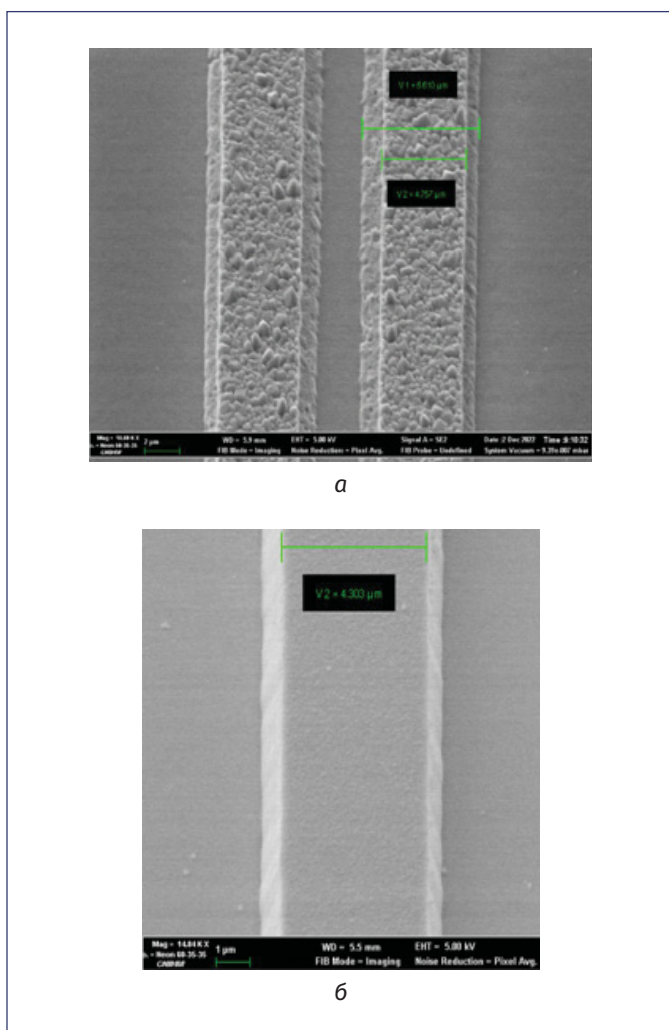


Рис. 2. Электронные микрофотографии алюминиевых шин на основе алюминия, сформированных методом распыления: а – электронно-лучевое; б – магнетронное

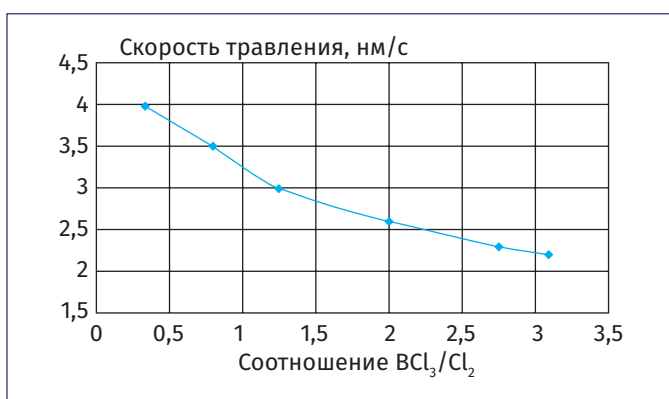


Рис. 3. Скорость травления алюминия от соотношения BCl_3/Cl_2 в газовой смеси

менной обработки без хлора не являются столь чувствительными к чистоте обрабатываемой поверхности. Представленные экспериментальные результаты травления получены на пластинах, подвергнутых предварительной очистке в плазме кислорода при мощности ВЧ-разряда 600 Вт и давлении 65 мТор.

Показано, что существенное влияние на боковой профиль формируемой алюминиевой шины оказывает способ нанесения алюминия (рис. 2). Так, использованный крупнозернистый алюминий, полученный методом электронно-лучевого распыления мишени, показал более высокую скорость травления в BCl_3-Cl_2 и привел к формированию дорожек с неровными стенками и пологим профилем травления (рис. 2, а). Образец, полученный методом магнетронного распыления, сформирован мелкозернистым алюминием, шины на его основе имеют существенно более гладкие стенки и вертикальный профиль (рис. 2, б).

При этом увеличение содержания доли Cl_2 в смеси BCl_3-Cl_2 приводит к повышению скорости травления алюминия. На рис. 3 представлена экспериментально полученная зависимость скорости травления алюминия от отношения BCl_3/Cl_2 в смеси реакционных газов при постоянном давлении в камере на уровне 20 мТор и мощности ВЧ-разряда 200 Вт. Зависимость коррелирует с ранее полученными данными [4, 5] и позволяет сформировать модель плазмохимического травления алюминия в газовой среде смеси BCl_3-Cl_2 , которая применима к конкретному технологическому оборудованию.

Представленное на рис. 3 увеличение концентрации Cl_2 по отношению к BCl_3 приводит не только к возрастанию скорости травления, но и ухудшает качество формируемого бокового профиля алюминиевых шин. Вероятно, это про-

исходит из-за того, что с возрастанием концентрации Cl_2 смещается характер травления от преобладания однородного послойного травления на травление по границам зерен по кристаллическим решеткам. Кроме того, смещение баланса приводит к ухудшению однородности формирования пассиватора и появлению в его стенках мелких дефектов. Через дефекты в стенках пассиватора хлор проникает к незащищенному алюминию и происходит процесс интенсивного травления по границам зерен с образованием полостей. На рис. 4 показан результат травления алюминия при отношении $\text{BCl}_3/\text{Cl}_2 = 0,4$ со сформированным слоем пассивации на основе продуктов реакции травления алюминия, фоторезиста и газовой смеси BCl_3-Cl_2 , отчетливо видны дефекты травления в виде полостей. Перед проведением микроскопии слой фоторезиста предварительно удален в плазме кислорода.

При смещении баланса в смеси BCl_3-Cl_2 в сторону повышения концентрации BCl_3 снижается скорость травления алюминия и, соответственно, продолжительность процесса. Это увеличивает тепловое воздействие плазмы на фоторезистивную маску и структуру в целом. Перегрев фоторезистивной маски и пленки алюминия не только приводит к сильному задубливанию фоторезиста с изменением геометрии маски, но и отслоению металлизации от подложки.

Для минимизации данного эффекта используют различные методы компенсации нагрева от плазмы: уменьшение мощности плазмы, увеличение скорости травления за счет увеличения рабочего давления газовой смеси в камере, проведение многоэтапного травления и т.п. При этом установлено, что только смена непрерывного режима травления на итерационный (многоэтапное трав-

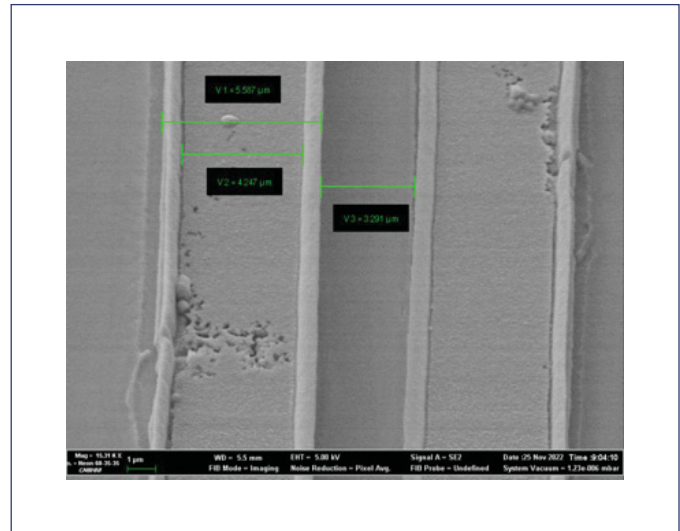


Рис. 4. Электронная микрофотография алюминиевых шин со слоями пассиватора и дефектами травления в виде пористых полостей

Увеличение концентрации Cl_2 по отношению к BCl_3 приводит не только к возрастанию скорости травления, но и ухудшает качество формируемого бокового профиля алюминиевых шин.

ление) позволяет оставить прежними ранее подобранные параметры процесса и проводить травление на заданную глубину. В данном случае пассиватор хорошо маскирует стенку алюминиевых шин и не позволяет подтравливать алюминий под фоторезистивную маску, тем самым обеспечивая формирование стенки с профилем, близким к вертикальному.

Сформированный пассиватор (рис. 5, а, б) образует прочные ленты, устойчивые как к кислородной плазме, так и к органическим растворителям, применяемым для удаления фоторезистов. Экспериментально показано, что слой пассивации преимущественно удаляется жидкостным травлением в водном рас-

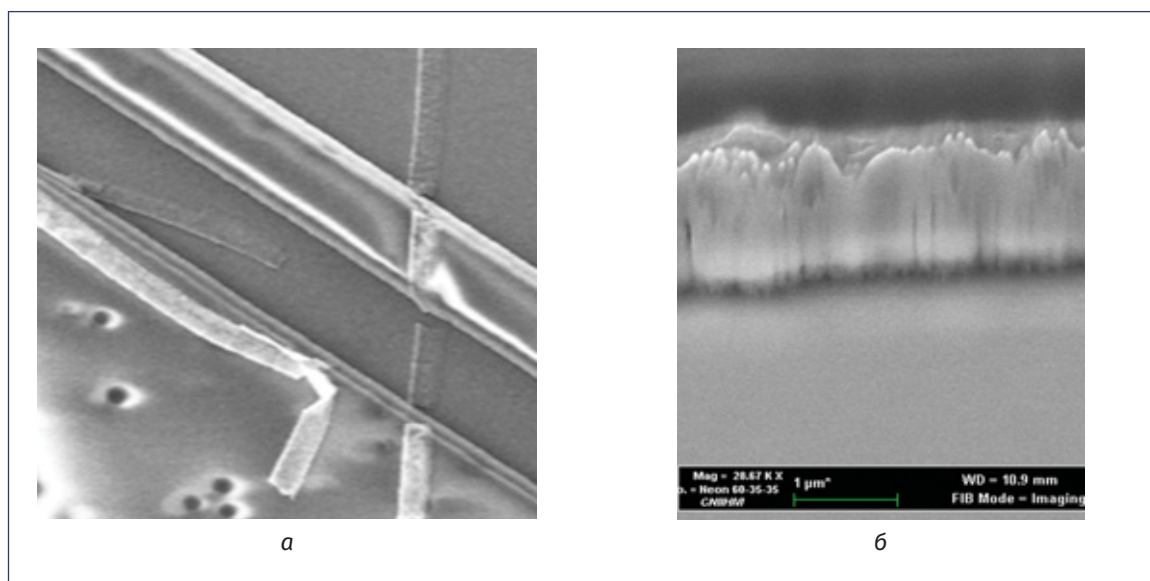


Рис. 5. Электронные микрофотографии: а – фрагмент алюминиевой шины, покрытой фоторезистом со следами пассиватора после их удаления методом жидкостного травления; б – боковая поверхность алюминиевой дорожки после проведения итерационного травления алюминия (боковая поверхность закрыта лентой пассиватора, фоторезист удален)

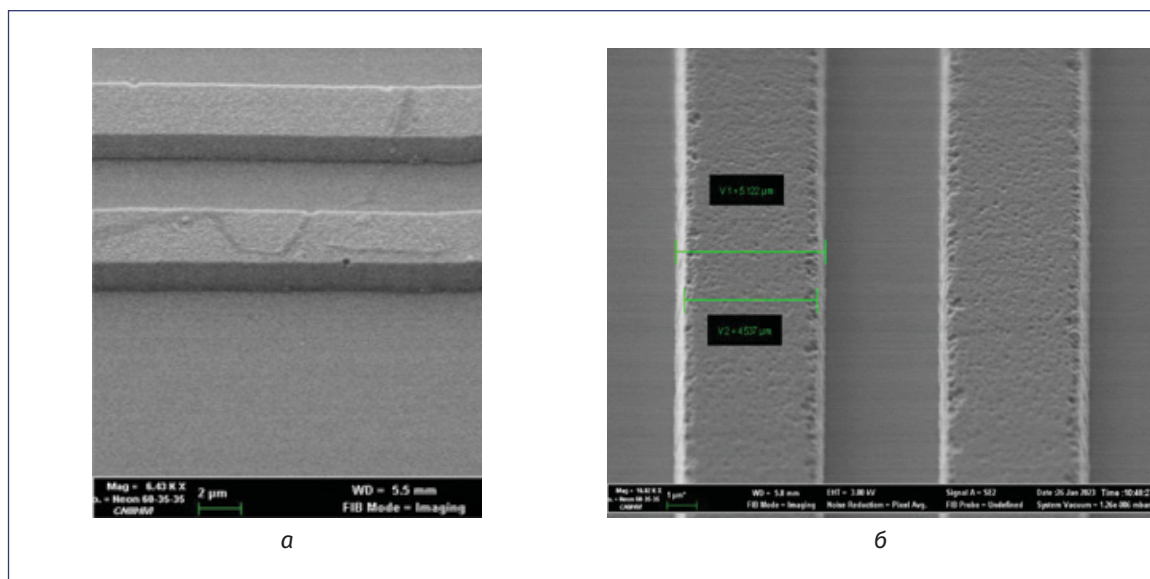


Рис. 6. Электронные микрофотографии алюминиевых шин после травления алюминия и удаления пассивации: а – под прямым углом; б – под углом 45°

творе H_3PO_4 , HNO_3 , CH_3COOH в течение 20...40 с, почти не затрагивая профиль алюминиевых шин. Это происходит за счет потери адгезии лент к поверхности алюминиевых шин при незначительном

подтравливании алюминия. Далее ленты пассиватора удаляют промывкой в деионизованной воде. Окончательную зачистку поверхности допустимо проводить в плазме смеси CF_4-O_2 .



Изображение: zelengarden.ru

В результате проведения исследований разработан технологический процесс плазмохимического травления алюминия, разделенный на 14 чередующихся итераций травления в газовой смеси $\text{BCl}_3/\text{Cl}_2 = 2$ при давлении 20 мТор и мощности ВЧ-разряда 200 Вт и остывания в вакууме в течение 60 с. Результат проведения технологического процесса травления алюминия показан на рис. 6.

Выводы

Для обеспечения плазмохимического травления пленки алюминия с минимальным подтравом под фоторезистивную маску, минимальным наклоном бокового профиля, отсутствием дефектности рисунка травления и стравленных областей необходимо использовать многостадийный итерационный процесс с технологическими операциями подго-

товки поверхности алюминия и операциями удаления пассивации и фоторезиста после его травления.

Предварительная плазмохимическая очистка в кислороде перед травлением обеспечивает удаление органических дефектов с открытой поверхности алюминия, что позволит избежать формирование маскирующих точек. Полученный многостадийный итерационный режим травления алюминия в газовой смеси $\text{BCl}_3\text{-Cl}_2$ позволяет равномерно удалять алюминий без задубливания фоторезиста и отслаивания металлизации ввиду минимизации теплового воздействия плазмы на структуру.

Последующее за операцией плазмохимического травления жидкостное травление в водном растворе H_3PO_4 , HNO_3 , CH_3COOH позволяет селективно удалить пассивацию с профиля алюминиевых шин.

Список литературы / References

1. *Nakazawa A.M., Verdonck P.* Plasma etching of aluminium using $\text{BCl}_3\text{-Cl}_2$ mixtures. LSI-PEE-EPUSP, Av. Prof. Luciano Gualberto trav 3, 158, 05508-900 São Paulo, SP.
2. *Hess D.W.* Plasma etching of aluminium. *Solid State Technology*, 1981? V. 34, N 4, pp. 189–194.
3. *Riley P.E.* Plasma etching of aluminium metallizations for ultralarge scale integrated circuits. *Journal of the Electrochemical Society*, 1993, V. 140, pp. 1518–1522.
4. *Lutze J.W., Perera A.H., Krusius J.P.* Anisotropic reactive ion etching of aluminium using Cl_2 , BCl_3 and CH_4 gases. *Journal of the Electrochemical Society*, 1990, V. 137, N 1, pp. 249–252.
5. *Lehmann H.W., Widmer R.* Reactive sputter etching of Al in BCl_3 . *Microelectronic Engineering*, 1983, N 1, pp. 3–27.
6. *Jershen Maa and Bernard Halon.* Anisotropic Dry Etching of Aluminum Films Deposited on Topographic Steps. *Materials Research Society Symp. Proc.*, 1986, pp. 68.

Поступила в редакцию: 27.11.2023

Одобрена рецензентами: 15.12.2023

Принята к печати: 27.03.2024

Об авторах

Денис Юрьевич Обижаев – кандидат технических наук, сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики».

Denis Yu. Obizhaev – PhD in Engineering sciences, employee of SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics».

Сергей Юрьевич Суздальцев – кандидат технических наук, сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики».

Sergey Yu. Suzdaltsev – PhD in Engineering sciences, employee of SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics».

Светлана Александровна Жукова* – кандидат технических наук, сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики». Адрес для почтовых отправлений: 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А. E-mail: ptsb@cniihm.ru (в теме указать «Для Жуковой С.А.»).

Svetlana A. Zhukova* – PhD in Engineering sciences, employee of SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics». Postal address: 16A Nagatinskaya str., Moscow, 115487. E-mail: ptsb@cniihm.ru (in the subject, specify «For S.A. Zhukova»).

Сергей Алексеевич Ульянов – сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики».

Sergey A. Ulyanov – employee of SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics».

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

ВОСТОЧНЫЕ НАНОКРАСКИ ДЛЯ САМОЛЕТОВ И ДИСПЛЕЕВ

Исследователи из японского университета Кобе разработали новый тип покрытия, который воспроизводит яркие краски любых цветов и отличается чрезвычайно малой плотностью (0,5 г на 1 м²), что позволяет заметно облегочить корпус самолета. А в Южной Корее цветковые наноструктуры решили использовать в современных дисплеях.

Изображение: alexpress.ru

Изобретение открывает прекрасные возможности для экономии веса при окраске авиалайнеров, которые вынуждены носить на себе от 270 до 540 кг дополнительного веса и расходовать топливо.

Основой нового покрытия являются сферы из кристаллического кремния нанометрового размера. Благодаря «резонансу Ми» они отражают свет во всех направлениях, но на определенных длинах волн. Меняя диаметр сфер, можно изменять длину волны – а с ней и оттенок покрытия.

Сферы не поглощают свет, а потому их материал не разрушается со временем. Для наибольшего отражения света нужно упаковать сферы неплотно, оставив между ними свободное место, что снижает плотность и вес итогового покрытия. Здесь нет эффекта переливчатости, как в природных аналогах, а благодаря малому размеру сфер из них нетрудно сделать материал для 3D-печати.

Согласно расчетам, чтобы получить яркое и устойчивое покрытие, достаточно создать слой толщиной всего 100...200 нанометров. Это позволит снизить вес краски для самолетов до 10% от нынешних показателей. Помимо экономии топлива это дает и экономию на восстановлении краски – поскольку покрытие не деградирует, самолет не нужно регулярно перекрашивать.

Параллельно в Южной Корее разработана революционная технология, позволяющая в режиме реального времени отображать цвета и формы благодаря изменениям в наноструктурах. Эта инновационная технология, предложенная профессором Канг Хи Ку и ее командой из Школы энергетики и химической инженерии UNIST, способна произвести революцию в различных областях, например, в создании умных полимерных частиц. Используя блок-сополимеры, исследовательская группа добилась самосборки фотонных кристаллических структур в больших масштабах, имитируя природные явления, наблюдаемые в крыльях бабочек и птичьих перьях. Отражая форму и направление наноструктур, эта технология позволяет визуализировать яркие цвета и замысловатые узоры в режиме реального времени. Прорыв в нанотехнологиях поможет создать дисплей, дающий цвет в реальном времени.

Источники: techcult.ru, innovanews.ru

УДК 004.056.53

ЗАЩИТА ХИМИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ОТ КИБЕРАТАК

И.В. ЕГОРОВ, к.т.н., С.А. ЧЕКАРЕВ, П.А. ЩАВЕЛЕВ, В.М. ВОЛКОВ,
ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт
химии и механики»

Аннотация. Рассматриваются несколько основных методов эффективной защиты химических предприятий от кибератак. Для обнаружения и предотвращения попыток несанкционированного доступа к информационной сети техногенных производств и блокировки вредоносного программного обеспечения рекомендуется использовать комбинацию различных механизмов шифрования и предупреждения.

Ключевые слова: ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ;
КИБЕРАТАКА; КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ;
КРИПТОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ;
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ;
СИСТЕМА ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВТОРЖЕНИЙ;
КОМБИНИРОВАНИЕ; ШИФРОВАНИЕ;
ВРЕДОНОСНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ.

Для цитирования: Егоров И.В. Защита химических предприятий от кибератак / И.В. Егоров, С.А. Чекарев, П.А. Щавелев, В.М. Волков // Перспективные технологии для систем безопасности. 2024. № 1 (3). С. 88–103.

Введение

В современном информационном пространстве кибератаки становятся все более распространенным явлением и представляют серьезную угрозу для различных секторов экономики, включая химическую промышленность. Предприятия, которые работают с опасными и взрывоопасными веществами, представляют особый интерес для преступников,

так как, например, успешный в их отношении спуфинг может иметь катастрофические последствия для окружающей среды и человеческого здоровья.

Химические производства являются объектами критической инфраструктуры, поэтому их защита имеет важное значение, и руководители таких предприятий должны предпринимать соответствующие меры для минимизации информационных рисков и угроз.

PROTECTION OF CHEMICAL ENTERPRISES FROM CYBERATTACKS

I.V. EGOROV, PhD in Engineering, S.A. CHEKAREV, P.A. SHCHAVELEV, V.M. VOLKOV
ISSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics»

Abstract: Several basic methods of effective protection of chemical enterprises from cyberattacks are considered. It is recommended to use a combination of various encryption and warning mechanisms to detect and prevent unauthorized access to the information network of man-made industries and block malicious software.

Keywords: CHEMICAL ENTERPRISES; CYBER ATTACKS; CYBERSECURITY; CRYPTOGRAPHIC METHODS OF PROTECTION; ACCESS CONTROL SYSTEM; INTRUSION PREVENTION SYSTEM; COMBINATION; ENCRYPTION; MALICIOUS SOFTWARE.

For citation: Egorov I.V., Chekmarev S.A., Shchavelev P.A., Volkov V.M. Protection of chemical enterprises from cyberattacks. *Perspektivnye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti* [Promising technologies for security systems], 2024, N 1 (3), pp. 88–103. (In Russ.).

Общая стратегия защиты от хакеров – комплексный подход, направленный на обеспечение безопасности информационных систем и данных предприятия. Целью такой стратегии является предотвращение несанкционированного доступа к системам, защита конфиденциальности и целостности данных, а также обеспечение непрерывности производственных процессов.

Кибератака на химическое предприятие – это злонамеренная деятельность, направленная на вторжение в компьютерные системы и сети сотрудников с целью нанести серьезные финансовые, операционные и репутационные последствия.

Самыми распространенными видами кибератак, которые могут быть направлены злоумышленниками на химические предприятия, являются:

получение несанкционированного доступа к системам управления производством для изменения параметров работы оборудования или сбоя техноло-

гических процессов, с целью создания аварийных ситуаций и катастроф;

использование вредоносного программного обеспечения (ПО) (вирусы, черви или троянские программы) для заражения компьютерных систем химического предприятия и утраты контроля над ними, кражи конфиденциальных данных (секретной документации) в рамках экономического шпионажа;

распространение мошеннических (фишинговых) писем, поддельных веб-сайтов или других методов социальной инженерии для получения доступа к учетным данным сотрудников;

перегрузка трафиком коммуникационных сетей с помощью DDoS-атак для снижения доступности систем и сервисов, что часто приводит к финансовым потерям.

Кибератаки могут быть различными по своей природе и масштабу, но их основная цель – это нарушение нормальной работы предприятия, кража интеллекту-

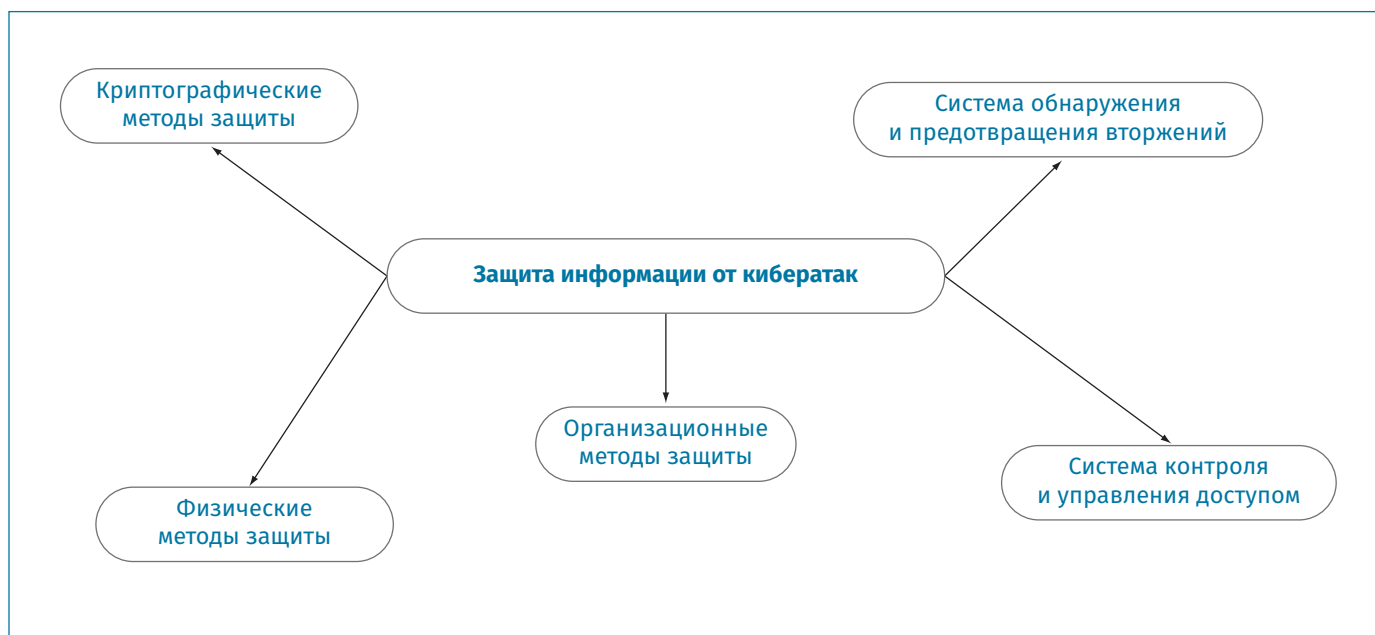


Рис. 1. Методы защиты информации на химических предприятиях от кибератак

альной собственности, прерывание производственных процессов или даже угроза безопасности персонала из-за создания аварийной ситуации.

Информационные системы, используемые на химических предприятиях, как правило, содержат конфиденциальную информацию о процессах производства, технологиях и т.д., которые являются важными для производства и могут быть использованы злоумышленниками для нанесения вреда, в отдельных случаях – для подготовки к террористическим или диверсионным актам.

В связи с вышеизложенным, химические предприятия должны обладать высоким уровнем защиты своей информационной инфраструктуры, чтобы предотвратить несанкционированный доступ к конфиденциальной информации. Защита от кибератак и других видов угроз является важной и актуальной задачей, требующей комплексного подхода. Для этого могут использоваться различные методы обеспечения безопасности (рис. 1).

Криптографические методы защиты информации

Криптография является дисциплиной, посвященной методам обеспечения конфиденциальности, целостности и доступности данных. Во взаимосвязи с повышением уровня сложности исследований в области химии справедливо предположить, что сознательное использование методологий криптографии является неотъемлемым фактором в защите данных на предприятиях данной сферы [1].

В частности, речь идет о применении различных алгоритмов и техник, направленных на шифрование информации. Этот процесс сводится к преобразованию исходных данных в неизвестный для постороннего наблюдателя формат, что обеспечивает конфиденциальность данных [2].

Криптографическая защита используется в отношении критически важных систем и информационных данных химического предприятия, таких как рецептуры дорогостоящих составов, химические

формулы уникальных веществ и т.д. Она может включать специальные методы кодирования данных и протоколов, управление ключами шифрования и многофакторную аутентификацию пользователей [3, 4].

Впрочем, для начала следует определить, какие данные нуждаются в защите, и выбрать соответствующие методы криптования. Например, для защиты конфиденциальных данных, связанных с исследованиями и разработкой, может использоваться асимметричное шифрование, при котором данные кодируются одним ключом и декодируются другим, тогда как для защиты информации о тонкостях производственных процессов достаточно симметричного шифрования, при котором используется один и тот же секретный ключ и в обоих случаях.

Многообразие методов криптографической защиты данных на химических предприятиях представлено на рис. 2.

Шифрование данных является одним из важнейших инструментов для защиты химических предприятий от кибератак.


Оно позволяет обеспечить конфиденциальность и целостность данных путем их преобразования в непонятный вид для неавторизованных лиц.

Чаще всего на производстве со статусом повышенной опасности применяется шифрование:

всех информационных сведений, хранящихся на серверах и других устройствах с помощью сильных алгоритмов и управления ключами (обычно применяется как к базам данных, так и к отдельным файлам);

коммуникаций между сотрудниками и системами для защиты переписки и диалогов, которое обеспечивается за счет использования закодированных каналов связи, таких как VPN-туннели (от англ. Virtual Private Network – «виртуальная частная сеть») или зашифрованные мессенджеры;

устройств и носителей данных (жесткие диски, USB-накопители и смартфоны) для предотвращения несанкционированного доступа к информации в случае утери или кражи гаджета;



Шифрование данных является одним из важнейших инструментов для защиты предприятий от кибератак, позволяющим обеспечить конфиденциальность и целостность данных, преобразовывая в непонятный вид.

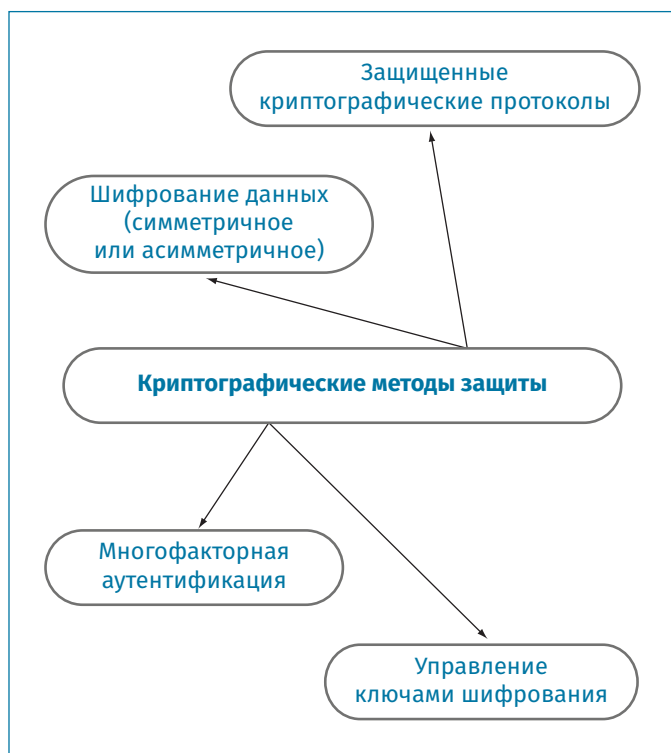


Рис. 2. Криптографические методы защиты информации от кибератак

систем управления производственными процессами для предотвращения изменения данных, контролирующей работу промышленного оборудования.

Защищенные криптографические протоколы применяются как дополнительное средство обеспечения безопасности химических предприятий от кибератак.

В этом случае для защиты коммуникаций между различными системами и устройствами рекомендуется использовать, например, TLS (от англ. Transport Layer Security – «безопасность транспортного уровня») или SSH (от англ. Secure Shell – «безопасная оболочка»). Эти протоколы обеспечивают кодирование данных и аутентификацию сторон, что позволяет предотвратить несанкционированный доступ и подмену информации.

Не лишними будут и сильные криптографические алгоритмы, а также до-

статочно длинные ключи. Это поможет предотвратить взлом и компрометацию защищенных систем. Кроме того, регулярное обновление криптографических протоколов и алгоритмов является важным для предотвращения уязвимостей и использования устаревших методов взлома.

Управление ключами шифрования. Последние используются для защиты конфиденциальной информации: данных о процессах производства, патентов, коммерческих секретов, результатов научных исследований и т.д.

Чтобы эффективно управлять ключами шифрования они должны:

генерироваться случайным образом с использованием надежных алгоритмов, что гарантирует недоступность ключей для злоумышленников;

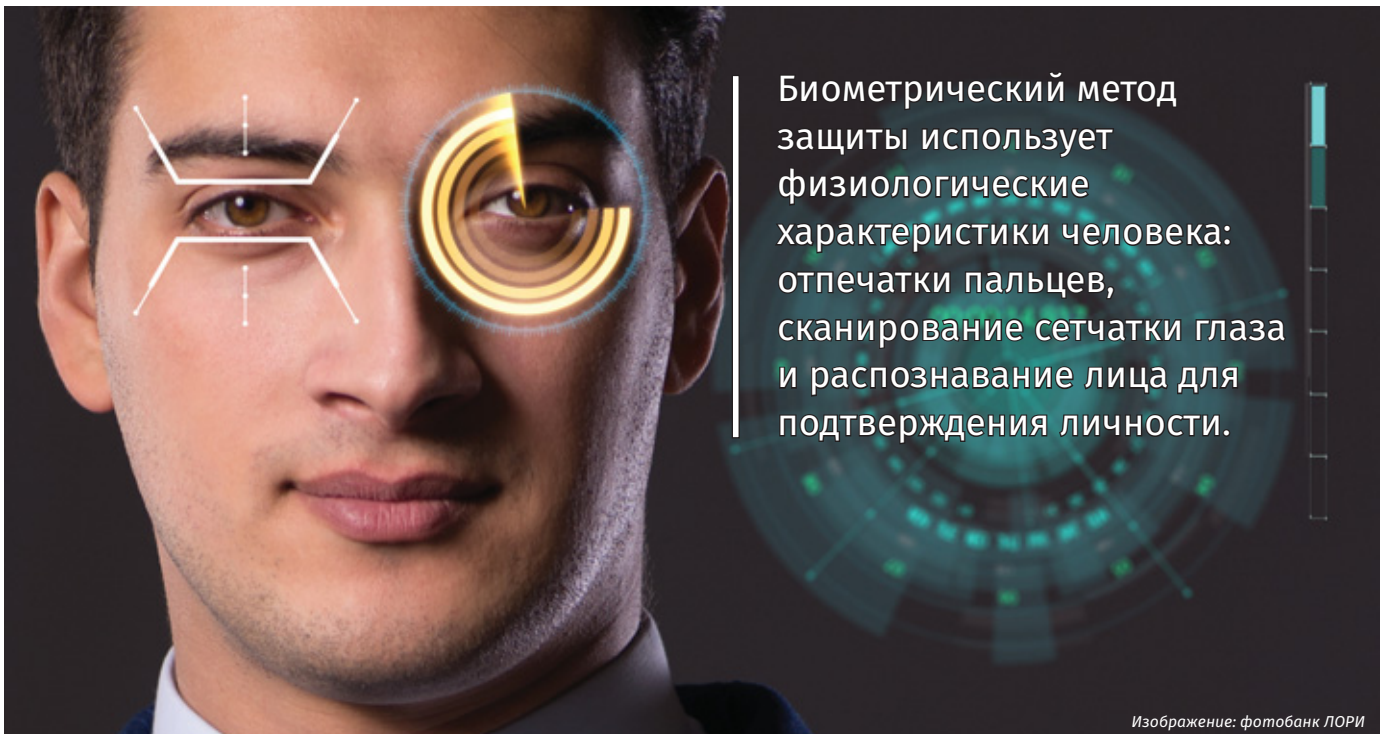
храниться в защищенном месте, например, в аппаратном средстве безопасности или зашифрованной базе данных, что предотвратит несанкционированный доступ к ключам;

распределяться только среди сотрудников, которым они необходимы для выполнения своих задач и только через безопасные каналы связи, чтобы предотвратить их перехват или подмену, для чего могут использоваться протоколы обмена ключами (например, протокол Диффи-Хеллмана);

периодически обновляться для предотвращения возможности взлома или компрометации ключей, что позволит обеспечить долгосрочную безопасность системы;

немедленно быть отозваны и уничтожены в случае утраты или компрометации, что поможет предотвратить несанкционированный доступ к защищенной информации.

Управление ключами шифрования является сложным процессом, требующим внимания к деталям и строгого



Биометрический метод защиты использует физиологические характеристики человека: отпечатки пальцев, сканирование сетчатки глаза и распознавание лица для подтверждения личности.

Изображение: фотобанк ЛОРИ

соблюдения процедур безопасности. Этот процесс должен быть частью общей стратегии безопасности химического предприятия и взаимодействовать с другими мерами защиты.

Многофакторная аутентификация требует от пользователя предоставления нескольких форм распознавания личности, таких как пароль, биометрические данные, аппаратные токены (устройства с уникальным паролем) и т.д.

Существует несколько методов аутентификации, которые могут быть использованы для защиты химических предприятий:

- парольный, при котором пользователи должны ввести уникальный набор символов для получения доступа к системе (необходимо использовать сложные надежные пароли и регулярно менять их);
- двухфакторный, предполагающий, что помимо пароля пользователи обязаны предоставить дополнительную форму ау-

тентификации, например, одноразовый код, отправленный на их мобильный телефон, что повышает безопасность, так как злоумышленнику будет сложнее получить доступ к системе, даже если он узнал пароль;

биометрический, использующий физиологические характеристики человека, такие как отпечатки пальцев, сканирование сетчатки глаза или распознавание лица для проверки подлинности (данный метод обычно более надежен, так как исключает возможность подделки физических характеристик пользователя);

метод сертификации и цифровых подписей, позволяющий осуществить проверку подлинности пользователей и устройств при удаленном доступе к системам.

Несмотря на все свои преимущества, криптография имеет и некоторые ограничения. Во-первых, сложность шифровальных алгоритмов и высокие вычислительные требования, применяемые к

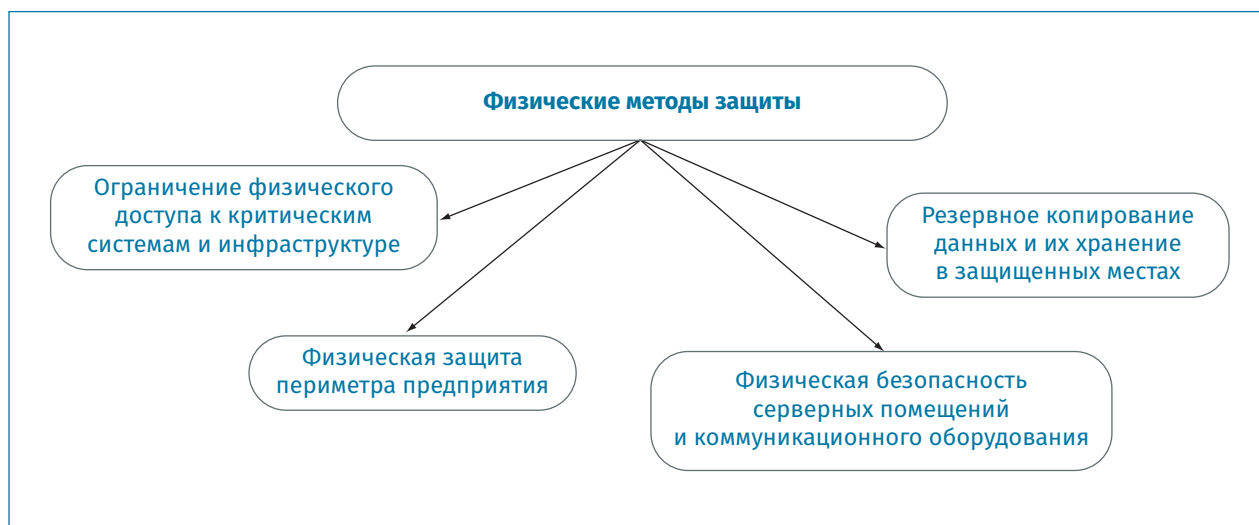


Рис. 3. Физические методы защиты информации от кибератак

ним, могут привести к замедлению процессов обработки данных, что особенно актуально для химических предприятий, где требуется быстрая и непрерывная обработка больших объемов информации. Во-вторых, кодировка может создать дополнительные сложности в управлении ключами шифрования.

Необходимо отметить, что криптографическая защита является лишь одной из составляющих комплексной системы безопасности химического предприятия. Применение наряду с ней физических методов позволяет предотвратить те виды кибератак, которые требуют, например, физического доступа к системам или инфраструктуре предприятия.

Физические методы защиты информации

Для физической защиты (ФЗ) информации применяются организационные мероприятия и совокупность средств, которые способны препятствовать несанкционированному проникновению или доступу неуполномоченных лиц к защищаемому объекту. ФЗ является од-

ним из важнейших компонентов стратегии защиты химических предприятий от кибератак [5, 6]. Основные методы ФЗ информации представлены на рис. 3.

К основным методам, которые могут быть использованы для ФЗ, относят следующие:

ограничение физического доступа к критическим системам и инфраструктуре, которое может быть реализовано через использование систем электронного контроля доступа, систем видеонаблюдения и охранной сигнализации;

физическая защита периметра предприятия: достигается за счет использования различных барьеров и препятствий (ограждения, ворота, инфракрасные датчики);

физическая безопасность серверных помещений и коммуникационного оборудования, где хранятся и обрабатываются данные, включая использование биометрической аутентификации, системы контроля доступа, а также систем пожаротушения и датчиков протечек;

резервное копирование данных на случай их потери в случае успешной кибератаки или другого инцидента (резервные

копии данных должны храниться в защищенных местах, быть зашифрованы и доступны только авторизованным лицам).

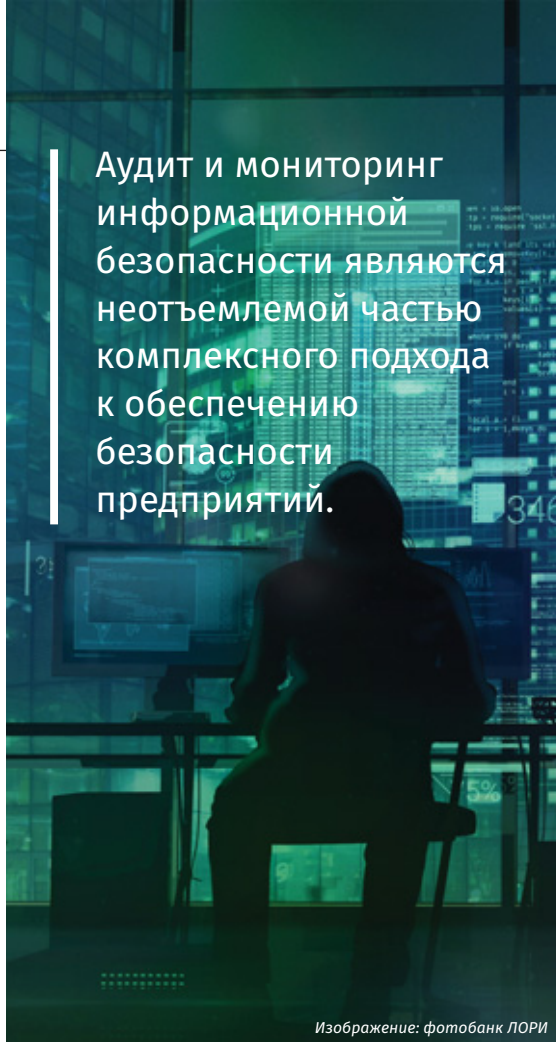
Улучшение физической безопасности предприятия является эффективным способом устранения или минимизации уязвимостей. Однако важно понимать, что кибератаки часто осуществляются удаленным способом через локальные сети. В этом случае к перечисленным мерам следует добавить организационные методы защиты информации.

Организационные методы защиты информации

В связи с растущим количеством кибератак на химические предприятия необходимо постоянно увеличивать уровень безопасности системы и внедрять регулярно обновляемые организационные методы защиты (рис. 4), которые включают: аудит и мониторинг информационной безопасности (ИБ), регулярное обновление ПО и обучение сотрудников основам кибербезопасности.

Аудит и мониторинг ИБ являются неотъемлемой частью комплексного подхода к обеспечению безопасности химических предприятий.

Аудит и мониторинг информационной безопасности являются неотъемлемой частью комплексного подхода к обеспечению безопасности предприятий.



Изображение: фотобанк ЛОРИ

Аудит позволяет провести комплексное исследование системы ИБ предприятия на соответствие установленным стандартам и политикам безопасности и выявить возможные уязвимости. В процессе аудита производится оценка текущего состояния защиты предприятия, выявление

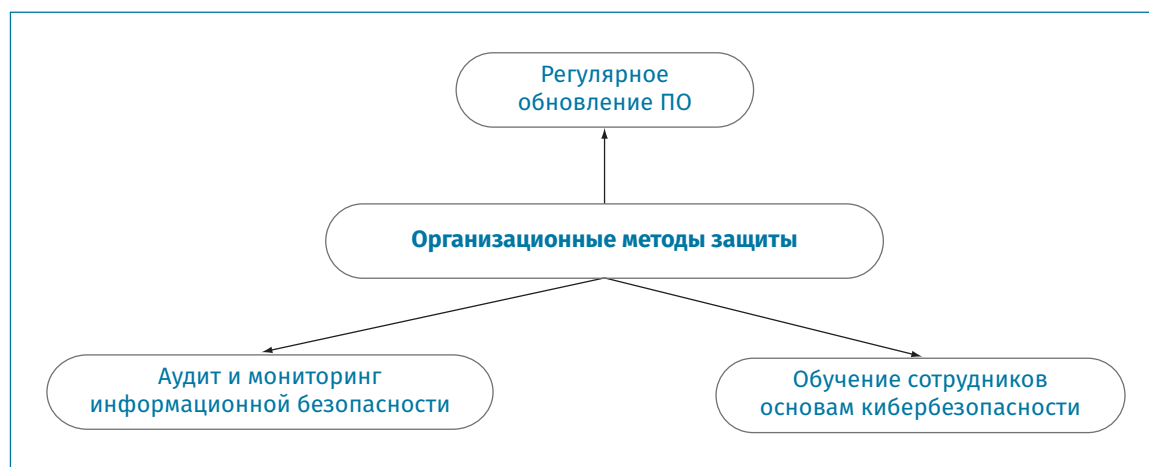


Рис. 4. Организационные методы защиты

возможных угроз и рисков, а также анализ системы управления ИБ.

Мониторинг представляет собой непрерывное наблюдение за инфраструктурой и сетями химического производства с помощью специальных программных и аппаратных средств. Он позволяет обнаруживать атаки, вторжения и несанкционированные действия в режиме реального времени.

Комбинация аудита и мониторинга способствует своевременному выявлению уязвимостей и предотвращению кибератак, а также защите предприятия от нежелательного доступа, кражи данных и других угроз.

Аудит и мониторинг ИБ являются непрерывными процессами, которые требуют постоянного обновления и анализа. Комбинированное использование ключей шифрования с аудитом и мониторингом поможет создать надежную систему защиты химических предприятий от кибератак.

Регулярное обновление ПО проводится для исправления в нем ошибок и до-

бавления новых функций, что напрямую влияет на безопасность информационной системы (ИС) предприятия. По мере развития технологий и появления очередных угроз в сфере кибербезопасности, разработчики ПО отслеживают и устраняют уязвимости в своих программных продуктах. Это позволяет предприятию получать актуальные функции и инструменты для защиты данных и информационной инфраструктуры. Обновления могут включать новые антивирусные сигнатуры, защиту от DDoS-атак или от вредоносных программ и т.д.

Обновление ПО также необходимо для поддержки совместимости с новыми технологиями и операционными системами. Старые программы и устаревшее ПО могут не соответствовать новым требованиям безопасности и быть более подверженными кибератакам. Кроме того, современное ПО создает предпосылки для улучшения производительности ИС химического предприятия. Устранение ошибок и оптимизация кода программы

Организационные методы защиты информации должны регулярно обновляться и адаптироваться к новым видам кибератак, поэтому их эффективность и уровень безопасности следует постоянно контролировать и улучшать.

позволяют более эффективно использовать вычислительные ресурсы и улучшить отклик системы на запросы пользователей.

Регулярное обновление ПО является неотъемлемой частью общей стратегии кибербезопасности химического предприятия, которое позволяет устранить уязвимости, совместимости, повысить производительность и быть готовым к новым угрозам.

Обучение сотрудников основам кибербезопасности является еще одним важным способом защиты химических предприятий от кибератак.

Каждый работник должен знать, как распознавать подозрительные электронные письма, сообщения и другие виды социальной инженерии. Необходимо обучить их политикам и процедурам безопасности, установленным предприятием: правила использования и замены паролей, доступа к конфиденциальной информации, хранения и утилизации данных. Немаловажным в этой связи является

обеспечение безопасности персональных рабочих станций и сетей: установка обновлений и ПО, использование сильных (надежных) паролей и ограничение доступа к конфиденциальным данным. Персонал обязан знать, как сообщать о подозрительной активности или потенциальных кибератаках, а компания должна иметь процедуры для своевременного реагирования на эти сообщения.

Проведение симуляций кибератак и тренировок помогает сотрудникам применять знания в реальных ситуациях. Это может включать ролевые игры, испытания на реальных или виртуальных системах и другие формы практической тренировки.

Общая цель обучения заключается в том, чтобы сотрудники были осведомлены о кибербезопасности и понимали свою роль в обеспечении защиты химического предприятия от вторжения извне. Постоянное обновление и повторение обучения также является важным, учитывая постоянно меняющуюся угрозу кибератак и новые методы их реализации.

Важно отметить, что рассмотренные организационные методы защиты информации должны регулярно обновляться и адаптироваться к новым видам кибератак, поэтому их эффективность и уровень безопасности следует постоянно контролировать и улучшать в соответствии с обновленными требованиями безопасности. Однако для более эффективной защиты необходимо также использовать технические средства, такие как система контроля и управления доступом.

Система контроля и управления доступом

Система контроля и управления доступом (СКУД) (рис. 5) – совокупность программно-аппаратных технических реше-



Рис. 5. Основные меры СКУД

ний, позволяющих управлять доступом на заданной территории [7]. В контексте защиты от кибератак СКУД может использоваться для ограничения физического и логистического доступа к определенным зонам (зданиям, цехам, помещениям), устройствам и информационным ресурсам химического предприятия. СКУД может включать использование биометрических технологий при аутентификации

Система контроля и управления доступом – эффективный инструмент, который способен создать защищенную рабочую среду и предотвратить возможные киберугрозы.

(сканеры отпечатков пальцев, распознавание лиц или голоса) и другие меры.

К некоторым важным мерам СКУД относятся:

биометрическая аутентификация пользователей – процесс определения подлинности личности пользователя с помощью его персональных биометрических данных;

ограничение физического доступа – контроль физического доступа к зданиям и помещениям предприятия с использованием электронной пропускной системы, биометрических идентификаторов и видеонаблюдения, что помогает предотвратить несанкционированный доступ посторонних лиц к критическим зонам и оборудованию химического предприятия;

управление привилегиями – ограничение доступа пользователей к определенным ресурсам и функциям с учетом их должности и полномочий, что помогает предотвратить несанкционированный доступ и уменьшить риск внутренних угроз;

регистрация перемещений – фиксация информации о входах и выходах сотрудников и посетителей, что позволяет отслеживать активности, обнаруживать потенциально подозрительное поведение и реагировать на возможные угрозы;

интеграция с другими системами безопасности – единый комплексный подход к защите, который обеспечивает более эффективное обнаружение и реагирование на угрозы с помощью систем видеонаблюдения и сигнализации, а также системы обнаружения и предотвращения вторжений.

Вышеперечисленные меры СКУД помогают обеспечить безопасность химических предприятий и должны быть реализованы в сочетании с другими мерами безопасности, такими как шифрование данных, аудит и мониторинг ИБ,

обучение сотрудников основам кибербезопасности.

СКУД – это эффективный инструмент, создающий защищенную рабочую среду и предотвращающий возможные киберугрозы. Помимо СКУД, еще одним ключевым техническим средством для защиты химических предприятий от кибератак является система обнаружения и предотвращения вторжений.

Система обнаружения и предотвращения вторжений может быть реализована как отдельная система, так и система общей безопасности информационных ресурсов организации.

Система обнаружения и предотвращения вторжений

Система обнаружения и предотвращения вторжений (СОПВ) (рис. 6) – это комплекс программно-аппаратных средств, предназначенных для обнаружения, анализа и предотвращения несанкционированных попыток доступа к информационным ресурсам предприятия или внедрения вредоносного кода (вирусов, троянов и прочего) [8]. СОПВ является важным компонентом общей стратегии безопасности для защиты химических предприятий от кибератак.

Основными функциями СОПВ являются:

отслеживание сетевой активности – проведение анализа сетевого трафика и сравнения его с известными шаблонами нормальной активности на наличие аномальной или подозрительных активностей (необычное поведение пользователей или попытки проникновения в систему извне);

анализ и классификация кибератак – проведение глубокого анализа обнаруженных аномалий, определение их типа и характера, применение соответствующих защитных механизмов;

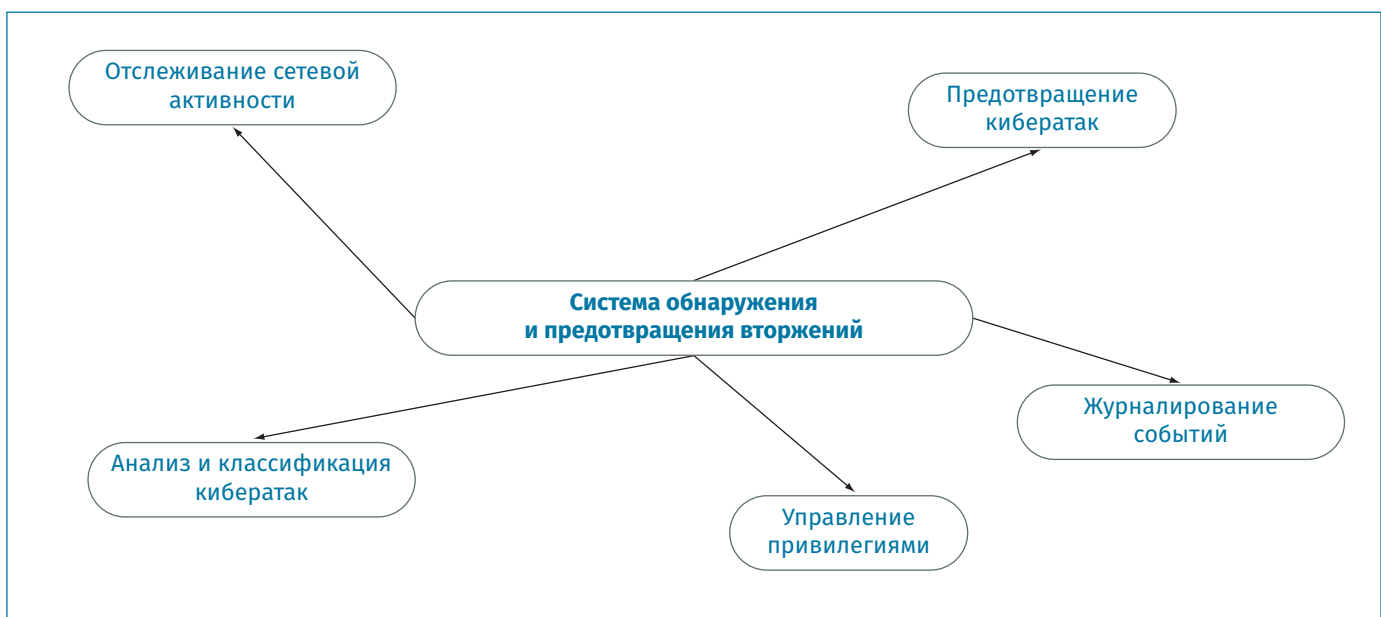


Рис. 6. Основные функции СОПВ

предотвращение кибератак – выполнение мер по предотвращению вторжений в режиме реального времени путем уведомления системных администраторов, блокировки угрожающего сетевого трафика, отключения скомпрометированных устройств или применения других защитных механизмов;

журналирование событий – сохранение статистики по обнаруженным атакам для последующего анализа и проведения расследований.

СОПВ может быть реализована как в виде отдельной, так и в рамках общей системы безопасности информационных ресурсов организации. Она защищает от несанкционированного доступа, повышает безопасность и надежность работы системы, а также предупреждает возможные угрозы для целостности и конфиденциальности данных.

Одним из компонентов системы безопасности компьютерных сетей являются брандмауэры, которые используются для обнаружения и предотвращения вторжений.

Брандмауэры (межсетевые экраны) – это программные или аппаратные уст-

ройства, которые контролируют доступ к сети и фильтруют трафик на основе определенных правил. Они работают как барьер между внутренней и внешней сетью, контролируя трафик, проходящий через него. Брандмауэры могут блокировать попытки входа в систему из внешней сети, а также предотвращать распространение вирусов и других вредоносных программ внутри сети.

Брандмауэры и СОПВ могут использоваться одновременно для обеспечения более эффективной защиты от кибератак: брандмауэры способны блокировать трафик на основе заданных правил, а СОПВ выявлять попытки обойти брандмауэры, чтобы получить доступ к системе.

Примеры кибератак на химические предприятия

Как уже было отмечено ранее, кибератаки на химические предприятия представляют серьезную угрозу для безопасности и стабильности производства. Из истории можно вспомнить несколько известных примеров виртуальных вторжений, которые привнесли существенные разрушения и ущерб не только для предприятий, но и для международного сообщества в целом.

Одна из самых масштабных и опасных кибератак произошла в 2010 г. в иранском городе Натанз. Объектом злоумышленников стало ядерное предприятие [9]. Запустив вирус «Stuxnet», создатели этой киберугрозы сумели проникнуть в систему управления производством, нарушив тем самым работу около 1000 центрифуг для обогащения уранового топлива. «Stuxnet» – это мощная компьютерная



программа, разработанная с целью проникновения и удаленного контроля системы. Вирус нового поколения, функционирующий по принципу «запустить и забыть», способен был атаковать любой объект в киберпространстве. Уникальность «Stuxnet» заключалась не только в возможности поразить любой компьютер, даже не подключенный к сети Интернет, но и в перепрограммировании его целей. Таким образом, иранская ядерная программа была приостановлена, правда на непродолжительное время.

В 2011 г. десятки научно-исследовательских предприятий в мире, занимающихся исследованиями и разработками в химической отрасли и в области материаловедения для оборонной промышленности, стали мишенью новой волны атак под названием «Nitro», в ходе которой с помощью компьютерного вируса «Poison Ivy» была украдена конфиденциальная информация, хранящаяся на зараженных компьютерах. Согласно отчету [10], опубликованному компанией «Symantec», киберпреступников интересовали исключительно технические документы, представляющие коммерческую тайну: конструкторская документация, формулы получения химических реактивов и материалов, а также технология производства.

Еще одним примером является атака на крупнейшую нефтехимическую саудовскую компанию «Saudi Aramco» в 2012 г. В результате виртуального нападения вышли из строя порядка 30 000 компьютеров. Злоумышленникам с помощью вируса «Shamoon» удалось заблокировать работу компании в течение нескольких недель, что привело к огромным убыткам, нарушению добычи и производства. Вирус «Shamoon» – зашифрованный компьютерный вирус, созданный для кражи информации, воздействия на энергетические (нефтяные) компании

и атакующий компьютеры, работающие под управлением операционной системы Microsoft Windows. Уникальность вируса в том, что он поражает даже отключенные от сети Интернет компьютеры и не дает возможности перезагрузить компьютер, жестко блокируя его [11].

Еще одним взломом, который потряс химическую промышленность, стало нападение на малазийскую компанию «Petronas» в 2014 г. Неизвестные хакеры украли конфиденциальную информацию компании, включая разработки в области нефтехимического производства. Это стало не только катастрофичным с точки зрения потенциальных убытков для компании, но также и потенциально опасным с точки зрения нарушения интеллектуальной собственности и конкурентоспособности [12].

Рассмотренные примеры кибератак являются наглядным подтверждением того, насколько в современном мире киберугрозы становятся все более серьезными и деструктивными. С каждым годом такие атаки приобретают более тонкие и опасные формы, поэтому защита информационных систем является одной из ключевых задач для химических предприятий. Необходимо продолжать развивать и улучшать меры безопасности, иначе последствия могут быть разрушительными для предприятий, сотрудников и окружающей среды.

Выводы

Химическая промышленность играет ключевую роль в экономике, обеспечении основных потребностей общества, и защита предприятий этой сферы от кибератак является важной составляющей общей безопасности государства. Вместе с тем противодействие киберугрозам требует комплексного подхода, включаю-

щего технические, организационные и физические меры.

Комбинируемое использование всех рассмотренных методов обеспечивает многоуровневую защиту и позволяет создать идеальное решение для проблемы кибербезопасности. Каждый метод дополняет друг друга, создавая комплексную систему защиты высокого уровня. Криптографическая защита обеспечивает конфиденциальность и целостность данных, физическая – предотвращает несанкционированный физический доступ, организационная – создает безопасную культуру работы сотрудников, СКУД – контролирует физический доступ, а СОПВ – обнаруживает и предотвращает потенциальные угрозы.

Общая стратегия защиты химических предприятий от кибератак должна быть гибкой и регулярно обновляться в соответствии с новыми вызовами и технологическими изменениями. Для достижения максимальной защиты отраслевых производств рекомендуется на регулярной основе осуществлять сотрудничество с экспертами в области кибербезопасности, проводить регулярный аудит и мониторинг систем для обнаружения и устранения уязвимостей, а также следить за актуальными публикациями и исследованиями в этом направлении. Только такой подход способен минимизировать риски, обеспечить надежную защиту химического предприятия от различного рода хакеров.

Список литературы

1. Васильева И.Н. Криптографические методы защиты информации: учебник и практикум для вузов. М.: Издательство Юрайт, 2022. 349 с.
2. Иванов М.А., ЧуGUNков И.В. Криптографические методы защиты информации в компьютерных системах и сетях. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 399 с.
3. Stallings W. Cryptography and Network Security: Principles and Practice, 7th Edition. London, Pearson Education, 2017. 753 p.
4. Зенков А.В. Информационная безопасность и защита информации: учебное пособие для вузов. М.: Издательство Юрайт, 2022. 104 с.
5. Шейдаков Н.Е., Тищенко Е.Н. Физические основы защиты информации: учебное пособие. Ростов н/Д.: РГЭУ (РИНХ), 2013. 187 с.
6. Russell D., Arlow P. Industrial Security: Managing Security in the 21st Century. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2015. 207 p.
7. Ворона В.А., Тихонов В.А. Системы контроля и управления доступом. М.: Горячая линия-Телеком, 2010. 272 с.
8. Аграновский А.В., Хади Р.А. Новый подход к защите информации – системы обнаружения компьютерных угроз. Ростов н/Д.: ФГНУ НИИ «Спецвузавтоматика», 2007. № 04 (167). 24 с.
9. Самые громкие кибератаки XXI века [Электронный ресурс]. URL: https://gb.ru/posts/hackers_attacks_xxi (дата обращения: 24.07.2023).
10. Химические предприятия под прицелом киберпреступников [Электронный ресурс]. URL: <https://itmag.pro/news/security/chemical-enterprises-hacker-attacks> (дата обращения: 24.07.2023).
11. Хакеры взломали крупнейшую нефтяную компанию [Электронный ресурс]. URL: <https://news.myseldon.com/ru/news/index/254708983> (дата обращения: 24.07.2023).
12. Malaysia Lost RM1 Billion to Hackers in 2014, Says Cybersecurity Firm [Электронный ресурс]. URL: <https://www.imoney.my/articles/malaysia-lost-rm1-billion-to-hackers-in-2014-says-cybersecurity-firm> (дата обращения: 24.07.2023).

References

1. Vasil'eva I.N. *Kriptograficheskie metody zashchity informatsii: uchebnik i praktikum dlia vuzov* [Cryptographic methods of information protection: textbook and workshop for universities]. Moscow, Izdatel'stvo IUrait Publ., 2022, 349 p. (In Russ.).

2. Ivanov M.A., CHugunkov I.V. *Kriptograficheskie metody zashchity informatsii v komp'iuternykh sistemakh i setiakh* [Cryptographic methods of information protection in computer systems and networks]. Moscow, NIIAU MIFI Publ., 2012, 399 p. (In Russ.).
3. Stallings W. *Cryptography and Network Security: Principles and Practice*, 7th Edition. London, Pearson Education, 2017, 753 p.
4. Zenkov A.V. *Informatsionnaia bezopasnost' i zashchita informatsii: uchebnoe posobie dlia vuzov* [Information security and information protection: a textbook for universities]. Moscow, Izdatel'stvo IUralt Publ., 2022, 104 p. (In Russ.).
5. Sheidakov N.E., Tishchenko E.N. *Fizicheskie osnovy zashchity informatsii: uchebnoe posobie* [Physical foundations of information protection: textbook]. Rostov-on-Don: RGEU (RINKH) Publ., 2013, 187 p. (In Russ.).
6. Russell D., Arlow P. *Industrial Security: Managing Security in the 21st Century*. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2015, 207 p. (In Russ.).
7. Vorona V.A., Tikhonov V.A. *Sistemy kontrolya i upravleniia dostupom* [Access control and management systems]. Moscow, Goriachaia liniia-Telekom Publ., 2010, 272 p. (In Russ.).
8. Agranovskii A.V., Khadi R.A. *Novyi podkhod k zashchite informatsii – sistemy obnaruzheniia komp'iuternykh ugroz* [A new approach to information protection – computer threat detection systems]. Rostov-on-Don: FGNU NII Spetsvuzavtomatika Publ., 2007, N 04 (167), 24 p. (In Russ.).
9. *Samye gromkie kiberataki 21 veka* [The loudest cyberattacks of the 21st century]. Available at: https://gb.ru/posts/hackers_attacks_xxi/ (accessed: 24 July 2023). (In Russ.).
10. *Khimicheskie predpriatiia pod pritselom kiberprestupnikov* [Chemical enterprises under the sights of cybercriminals]. Available at: <https://itmag.pro/news/security/chemical-enterprises-hacker-attacks/> (accessed: 24 July 2023). (In Russ.).
11. *Knakery vzlomali krupneishuiu neftianuiu kompaniiu* [Hackers hacked the largest oil company]. Available at: <https://news.myseldon.com/ru/news/index/254708983/> (accessed: 24 July 2023). (In Russ.).
12. *Malaysia lost 1 billion yuan due to hackers in 2014, according to a cybersecurity firm*. Available at: <https://www.imoney.my/articles/malaysia-lost-rm1-billion-to-hackers-in-2014-says-cybersecurity-firm/> (accessed: 24 July 2023). (In Russ.).

Поступила в редакцию: 18.09.2023

Одобрена рецензентами: 21.09.2023

Принята к печати: 27.03.2024

Об авторах

Иван Викторович Егоров* – кандидат технических наук, сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики». Адрес для почтовых отправлений: 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А. E-mail: orgsertifica@cniihm.ru.

Ivan V. Egorov* – PhD in Engineering sciences, SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics». Postal address: 16A Nagatinskaya str., Moscow, 115487. E-mail: orgsertifica@cniihm.ru.

Сергей Александрович Чекарев – сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики».

Sergei A. Chekarev – employee of SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics».

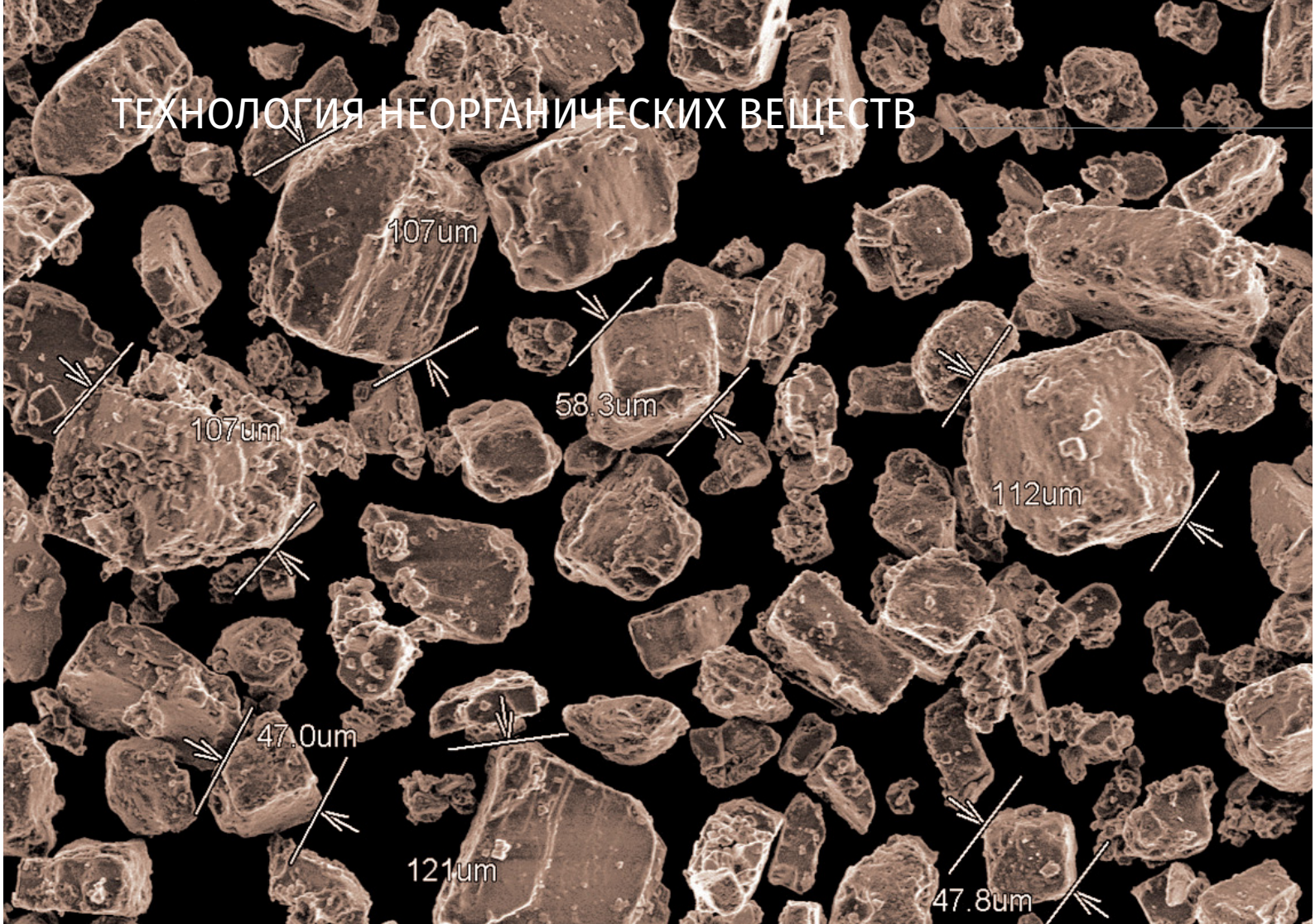
Павел Андреевич Щавелев – сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики».

Pavel A. Shchavalev – employee of SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics».

Виктор Михайлович Волков – сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики».

Viktor M. Volkov – employee of SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics».

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).



УДК 66-911.6

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКА ХЛОРИДА КАЛИЯ С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ*

Л.Л. ХИМЕНКО, д.т.н., Р.А. БЕРДНИКОВ, В.И. МАЛИНИН, д.т.н., проф., А.В. ЕЛЬКИН
ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Аннотация. Исследованы режимы получения порошка-иммитатора хлорида калия с заданными размерами и формой частиц для обкатки перспективного ракетно-прямоточного двигателя. Подобран оптимальный вариант, пригодный для наработки требуемого вещества в лабораторных условиях. Методом сканирующей электронной микроскопии определена форма частиц полученного порошка.

Ключевые слова: ГРАНУЛИРОВАННОЕ ТОПЛИВО; ХЛОРИД КАЛИЯ; ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ; СЫПУЧЕСТЬ.

Для цитирования: *Хименко Л.Л.* Исследование режимов получения порошка хлорида калия с заданными свойствами / Р.А. Бердников, В.И. Малинин, А.В. Елькин // Перспективные технологии для систем безопасности. 2024. № 1 (3). С. 104–111.

* Исследование проведено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

INVESTIGATION OF THE MODES OF OBTAINING POTASSIUM CHLORIDE POWDER WITH SPECIFIED PROPERTIES

L.L. KHIMENKO, Grand PhD in Engineering, R.A. BERDNIKOV, V.I. MALININ,
Grand PhD in Engineering, Prof., A.V. ELKIN

Federal Autonomous Educational Institution of Higher Education «Perm National Research Polytechnic University»

Annotation. *The production modes of the potassium chloride immitter powder with the given size and shape of particles for running-in of a promising straight-through rocket engine were investigated. The optimal option suitable for the production of the required substance in laboratory conditions has been selected. The shape of the particles of the obtained powder was determined by scanning electron microscopy.*

Keywords: GRANULAR PROPELLANT; POTASSIUM CHLORIDE; CRUSHING OF SOLIDS; FLOWABILITY.

For citation: *Khimenko L.L., Berdnikov R.A., Malinin V.I., Yelkin A.V. Investigation of the modes of obtaining potassium chloride powder with specified properties. Perspektivnye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti [Promising technologies for security systems], 2024, N 1 (3), pp. 104–111. (In Russ.).*

Введение

Для создания нового поколения ЛА необходимы энергетические установки (ЭУ), обладающие следующими свойствами: многократное включение и много разовое использование. Гранулированное топливо (ГТ) – перспективный вид топлива, подходящий для ЭУ с заданными свойствами. Разработка как ЭУ, так и нового высокоэффективного ГТ – комплексная задача. Соображения экономии и безопасности требуют, чтобы первичная отработка системы подачи ГТ энергоустановки проводилась с заменой энергонасыщенных компонентов инертным имитатором, обладающим сходными реологическими свойствами.

В качестве модельного порошка-имитатора гранулированного топлива выбран хлорид калия вследствие близких значе-

ний плотности: $\sim 1,9$ г/см³ для гранулированного топлива на основе перхлората аммония и циклотетраметилентетрамина и $1,984$ г/см³ для хлорида калия [1].

Условия испытаний предполагают дисперсность частиц хлорида калия преимущественно в диапазоне от 50 до 100 мкм, при этом порошок с требуемой дисперсностью в продаже отсутствует, более того, наличие фракции менее 100 мкм в промышленном хлориде калия рассматривается как подлежащая искоренению проблема, ухудшающая товарные свойства продукта, такая фракция именуется «пылевидной» [2].

Таким образом, получение мелкодисперсного порошка хлорида калия в количестве нескольких десятков килограмм в лабораторных условиях представляет собой самостоятельную задачу.

Таблица 1

Результат отсева 100 г хлорида калия на вибростенде с амплитудой 2,0 мм

Ячейка сита, мкм	Масса остатка на сите, г	Содержание фракции, %
160	60,5	60,5
94	25,0	25,0
50	13,5	13,5

Таблица 2

Результат отсева 242 г хлорида калия на вибростенде с амплитудой 2,0 мм

Ячейка сита, мкм	Масса остатка на сите, г	Содержание фракции, %
900	0,8	0,3
630	1,3	0,5
400	11,3	4,7
315	20,9	8,7

Таблица 3

Результат отсева 240 г хлорида калия на вибростенде с амплитудой 2,0 мм

Ячейка сита, мкм	Масса остатка на сите, г	Содержание фракции, %
315	32,2	13,48
71	194,1	81,2

Таблица 4

Результат отсева 220 г молотого хлорида калия на вибростенде с амплитудой 2,0 мм

Ячейка сита, мкм	Масса остатка на сите, г	Содержание фракции, %
160	80,0	36,4
94	69,0	31,4
56	52,0	23,6
50	12,0	5,5

Согласно литературным данным, механическое измельчение позволяет достичь среднего размера частиц 1 мкм.

Существуют физический, химический, физико-химический и механический способы производства мелкодисперсных порошков [3]. При использовании последнего получение искомого вещества осуществляется в мельницах, дробилках, атриторах. Эффективность измельчения и средний размер частиц определяется свойствами измельчаемого материала, конструкцией соответствующего аппарата, а также временем измельчения [4].

Согласно литературным данным, механическое измельчение позволяет достичь среднего размера частиц 1 мкм [4, 5], при этом соответствующее оборудование более доступно, чем аппараты, предназначенные для прочих способов (распылительная сушка, напыление и т.д.). Перекристаллизация с резким охлаждением в лабораторных условиях, вероятно, привела бы к образованию мелких кристаллов правильной формы, но их размер превосходил бы требуемую величину. Ввиду вышеизложенного нами был избран механический способ измельчения.

Описание эксперимента по измельчению хлорида калия

Для наработки искомого порошка был выбран легкодоступный хлорид калия марки ГОСТ 4568–95. Анализ дисперсности соли показал, что размер основной массы частиц значительно превышает требуемую величину (табл. 1–3). Остаток с размером частиц меньше 71 мкм составил 12,7 г или 5,3%.

С целью получения порошка требуемой дисперсности указанный хлорид калия подвергали измельчению на молотковой дробилке «Molot-400» при частоте 50 Гц с последующим рассевом на лабораторном вибростенде HAVER & BOECKER 59302 OELDF (рис. 1). Выбор молотковой дробилки связан с необходимостью сохранить форму частиц в виде многогранников, что сложнее обеспечить при измельчении истиранием.

Влажность в помещении, в котором осуществлялся рассев, составляла 65...67%. Очевидно, что чем меньше масса взятого порошка, тем качественнее происходит его разделение по фракциям. С другой стороны, минимальная масса вещества требуемой дисперсности составляет 15 кг, вследствие чего загрузка небольших количеств соли приводит к колоссальным затратам времени. Таким образом, подбор наиболее оптимальных условий отсева представляет собой самостоятельную задачу.

Пробный рассев 220 г молотого хлорида калия в течение 15 мин при амплитуде 2,0 мм показал хороший результат: порядка 29% от общей массы соли отвечали требуемым условиям (табл. 4), однако в дальнейшем этот результат не воспро-



Рис. 1. Лабораторный вибростенд HAVER & BOECKER

изводился, и аналогичная величина составляла порядка 18...20%. Также следует отметить, что времени отсева (15 мин) недостаточно при работе с большими объемами порошка.

С целью подбора наиболее оптимальной массы и времени отсева молотого хлорида калия брали навесок порошка в 200 и 600 г, измеряя массу фракции между ситами 56 и 94 мкм через равные промежутки времени. Полученные результаты представлены в табл. 5 и 6, а также в графическом виде на рис. 2.

Таблица 5

Содержание фракции между ситами 56 и 94 мкм после отсева 200 г молотого хлорида калия на вибростенде при амплитуде 2,0 мм

Время отсева t, мин	Масса фракции m, г	Содержание фракции, %
2	19,84	10,0
4	27,20	14,0
6	31,60	16,0
10	37,20	18,6
14	46,40	23,2

Таблица 6

Содержание фракции между ситами 56 и 94 мкм после отсева 600 г молотого хлорида калия на вибростенде при амплитуде 2,0 мм

Время отсева t, мин	Масса фракции m, г	Содержание фракции, %
2	36,41	6,0
4	59,80	10,0
6	75,10	12,5
8	85,00	15,0
10	95,00	16,0
12	100,00	17,0
14	107,40	18,0

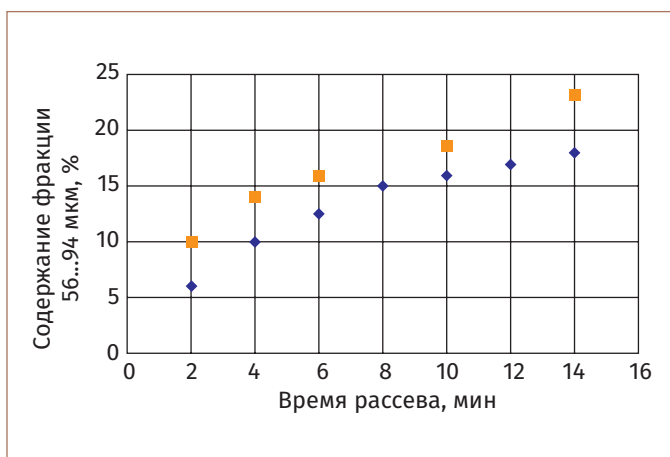


Рис. 2. Зависимость содержания фракции 56...94 мкм от массы навески и времени рассева:
 ■ – навеска 200 г; ◆ – навеска 600 г

На основании полученных результатов для потокового рассева были выбраны масса навески 170...220 г, что примерно соответствует слою соли 120...150 мл, взятой в мерный стакан, и время рассева 6...7 мин.

Полученные таким образом первые 6 кг искомого порошка были проанализированы на содержание искомой фракции (табл. 7). Согласно полученным данным, дисперсность порошка соответствует заявленным требованиям.

Форму полученных в результате помола и рассева частиц исследовали методом сканирующей электронной микро-

Таблица 7

Результат рассева фракции, полученной при расसेве в течение 6 мин молотого хлорида калия между ситами 56 и 94 мкм

Ячейка сита, мкм	Содержание фракции, %
160	0,37
125	3,9
100	2,1
50	70,4
Менее 50	29,0

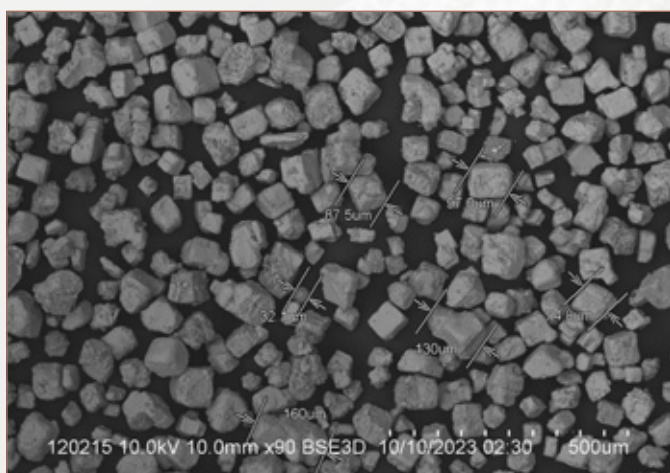


Рис. 3. Микрофотография частиц исходного хлорида калия ГОСТ 4568-95, увеличение в 90 раз

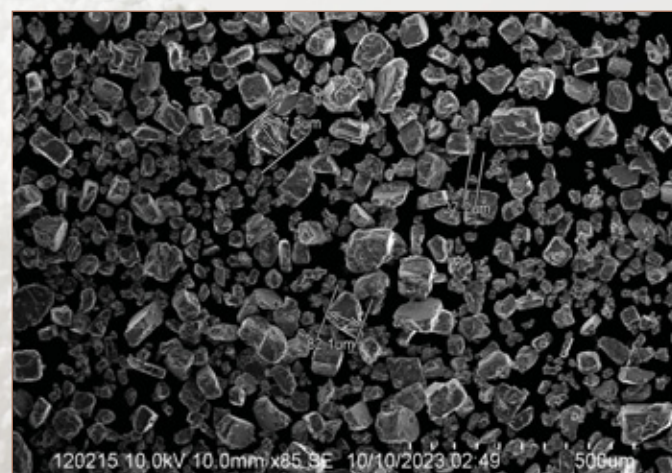


Рис. 4. Микрофотография частиц, полученных при рассеве в течение 6 мин молотого хлорида калия ГОСТ 4568-95 между ситами 56 и 94 мкм, увеличение в 85 раз

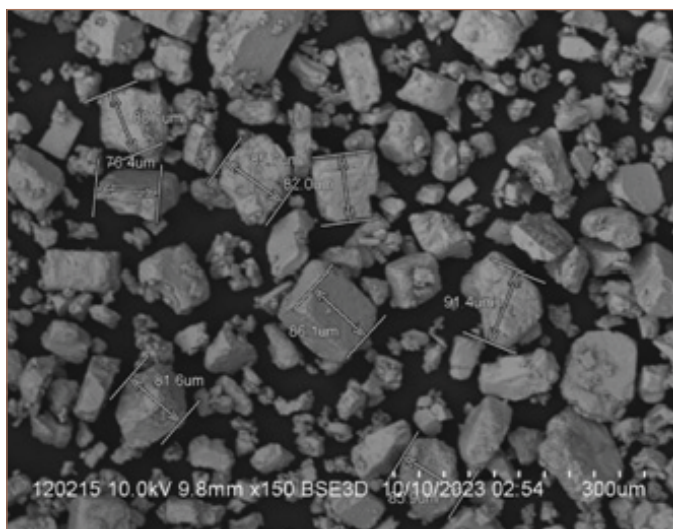


Рис. 5. Микрофотография частиц, полученных при расसेве в течение 6 минут молотого хлорида калия ГОСТ 4568–95 между ситами 56 и 94 мкм, увеличение в 150 раз

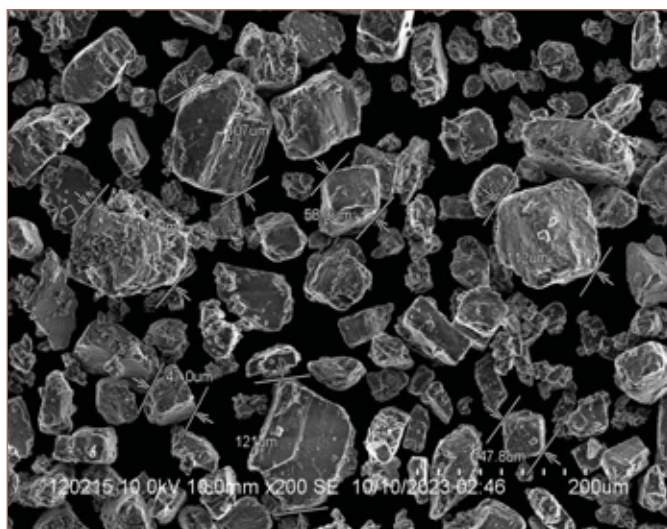


Рис. 6. Микрофотография частиц, полученных при рассеве в течение 6 минут молотого хлорида калия ГОСТ 4568–95 между ситами 56 и 94 мкм, увеличение в 200 раз

скопии. Частицы как исходного (рис. 3), так и молотого (рис. 4–6) хлорида калия представляют собой многогранники, что также удовлетворяет заявленным требованиям, поскольку течение порошка происходит тем легче, чем форма частиц ближе к сферической, при этом сферические частицы в указанных условиях заведомо не образуются. Насыпная плотность полученного порошка составила 1,045 г/мл при свободном насыпании и 1,090 г/мл при уплотнении.

Сыпучесть перхлората аммония и модельного хлорида калия ГОСТ 4568–95 с сопоставимым размером частиц определяли и сравнивали по следующей методике: стеклянный цилиндр устанавливали в центр пластины из органического стекла, на которой нанесены окружности диаметром от 10 до 200 мм. Навеску испытуемого порошка массой 50 г без встряхиваний и уплотнений насыпали в стеклянный цилиндр, после этого цилиндр плавно поднимали, производили замер двух перпендикулярных диаметров d_1 и d_2 (рис. 7) рассыпанного порошка.

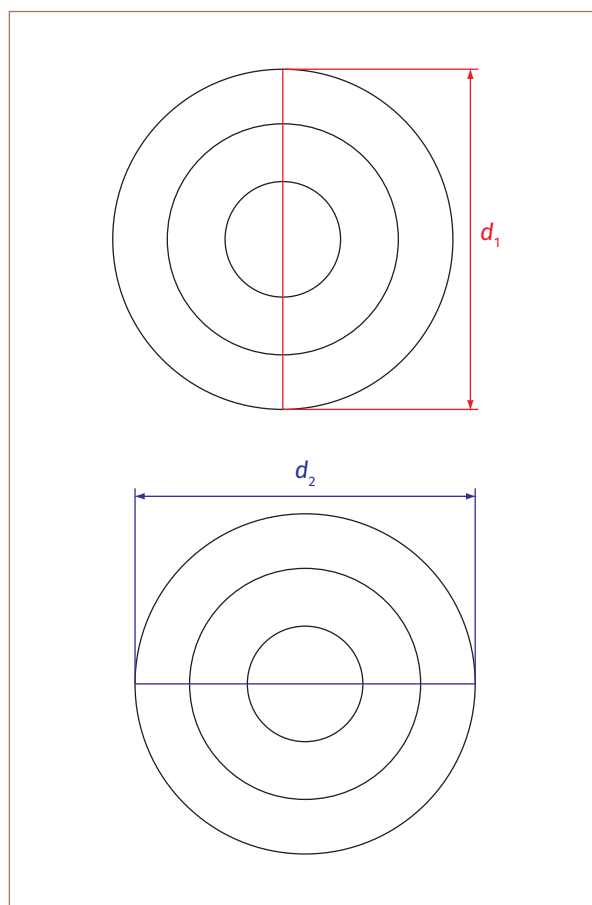


Рис. 7. Схематичное расположение измеряемых диаметров

**Рассыпаемость хлорида калия и перхлората аммония
и смесей на их основе**

Соль/добавка	Рассыпаемость хлорида калия ГОСТ 4568–95, см		Рассыпаемость перхлората аммония, см	
	d_1	d_2	d_1	d_2
–	18,0	19,6	18,0	18,0
Аэросил 0,2% масс.	20,0	21,0	19,8	18,4
Карбоксиметилцеллюлоза 0,2% масс.	20,0	21,0	17,6	18,0
Ортофосфат кальция 0,2% масс.	19,0	20,0	17,8	19,0

Добавки по 0,2% масс. аэросила, карбоксиметилцеллюлозы и ортофосфата кальция не препятствуют течению исходных порошков хлорида калия и перхлората аммония.

Для каждого образца проводили три параллельных определения, выводили среднее арифметическое. Аналогичным методом дополнительно была произведена предварительная оценка добавок аэросила, карбоксиметилцеллюлозы и ортофосфата кальция на сыпучесть исследуемых порошков после 48 ч хранения. Результаты измерений представлены в табл. 8. Присутствие указанных добавок не вносит существенного различия в значения рассыпаемости перхлората аммония и хлорида калия после непродолжительного хранения, таким образом, порошок-имитатор может использоваться с соответствующими

компонентами, применяемыми в работе с перхлоратом аммония.

Выводы

Разработан метод получения порошка-имитатора для гранулированного топлива на основе перхлората аммония с сопоставимыми значениями плотности и сыпучести на основе легкодоступного галургического хлорида калия, наработано 15 кг порошка-имитатора. Сопоставимость значений сыпучести основы гранулированного топлива – перхлората аммония – и хлорида калия подтверждает корректность использования последнего в качестве порошка-имитатора. Показано, что добавки по 0,2% масс. аэросила, карбоксиметилцеллюлозы и ортофосфата кальция не препятствуют течению исходных порошков хлорида калия и перхлората аммония, что делает перспективным исследование их влияния на свойства порошков при более длительном хранении в качестве антислеживающих добавок.

Список литературы

1. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. Изд. 2-е, испр. и доп. Л.: Химия, 1978. 392 с.
2. Кузьминых К.Г., Пойлов В.З. Термообработка суспензии галургического хлорида калия различной дисперсности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2016. № 1. С. 103–113.

3. Гадалов В.Н. О методах получения порошковых материалов и быстрозакристаллизованных ультрадисперсных порошков. Обзор / А.В. Филонович, И.В. Ворначева, В.М. Рощупкин // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 6. С. 31–39.

4. Дмитренко Д.В., Бледнова Ж.М., Русинов П.О. Механическое измельчение твердых порошковых материалов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 112. С. 765–777.

5. Шаков А.А., Еремина М.А., Ломаева С.Ф. Механохимический способ приготовления высокодисперсного порошка гадолиния // Химическая физика и мезоскопия. 2023. Т. 25. № 2. С. 209–216.

References

1. Rabinovich V.A., Khavin Z.Ya. *Kratkij himicheskij spravochnik. Izd. 2-e, ispr. i dop. Himiya* [Brief chemical reference. Ed. 2nd, ispr. and additional. Leningrad, Chemistry Publ., 1978, 392 p.

2. Kuzminykh K.G., Poilov V.Z. Heat treatment of a suspension of halurgic potassium chloride of various dispersities. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Himicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Chemical technology and biotechnology], 2016, N 1, pp. 103–113.

3. Gadalov V.N., Filonovich A.V., Vornacheva I.V., Roshchupkin V.M. On the methods of obtaining powdered materials and rapidly crystallized ultrafine powders. Overview. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii* [Procurement production in mechanical engineering], 2016, N 6, pp. 31–39.

4. Dmitrenko D.V., Blednova Zh.M., Rusinov P.O. Mechanical grinding of solid powder materials. *Politematicheskij setевой elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], 2015, N 112, pp. 765–777.

5. Shakov A.A., Eremina M.A., Lomaeva S. F. Mechanochemical method of preparation of highly dispersed gadolinium powder. *Himicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical physics and mesoscopy], 2023, Vol. 25, N 2, pp. 209–216.

Поступила в редакцию: 02.02.2024

Одобрена рецензентами: 09.02.2024

Принята к печати: 27.03.2024

Об авторах

Людмила Леонидовна Хименко* – доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Технология полимерных материалов и порохов» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». Адрес для почтовых отправок: 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский просп., д. 29. E-mail: lhimenko@yandex.ru.

Lyudmila L. Khimenko* – Grand PhD in Engineering sciences, Associate Professor, Head of the Department «Technology of Polymer Materials and Gunpowder» FSAEI HE «Perm National Research Polytechnic University». Postal address: 29 Komsomolsky Ave., Perm, Perm Territory, 614990. E-mail: lhimenko@yandex.ru.

Роман Александрович Бердников – аспирант кафедры «Технология полимерных материалов и порохов» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Roman A. Berdnikov – PhD Student of the Department «Technology of Polymer Materials and Gunpowder» FSAEI HE «Perm National Research Polytechnic University».

Владимир Игнатьевич Малинин – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Vladimir I. Malinin – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department «Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems», FSAEI HE «Perm National Research Polytechnic University».

Андрей Владимирович Елькин – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Andrey V. Elkin – PhD Student of the Department «Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems», FSAEI HE «Perm National Research Polytechnic University».

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

УДК 550.835.2

СНИЖЕНИЕ ПОРОГОВ РЕГИСТРАЦИИ α - И β -ИЗЛУЧАЮЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОДЕ

Изображение: фотобанк ЛОРИ

LOWERING DETECTION THRESHOLDS OF ALPHA AND BETA-EMITTING RADIONUCLIDES IN WATER

С.П. НИКИТАЕВ, д.т.н., проф., С.А. ЧЕРНОВ, к.х.н.,
М.Б. КАЗАКОВА,
ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-
исследовательский институт химии и механики»

Аннотация. Показано решение актуальной технической задачи по выбору оптимальной конструкции специализированного устройства детектирования α - и β -радионуклидов с учетом ограничений, связанных с влиянием длительных воздействующих эксплуатационных факторов на показатели чувствительности измерительного прибора.

Ключевые слова: α - и β -ИЗЛУЧЕНИЕ;
 α - и β -РАДИОНУКЛИДЫ; МЕТОД ДЕТЕКТИРОВАНИЯ;
РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ; ВОДНАЯ СРЕДА.

Для цитирования: Никитаев С.П., Чернов С.А.,
Казакова М.Б. Снижение порогов регистрации
 α - и β -излучающих радионуклидов в воде //
Перспективные технологии для систем
безопасности. 2024. № 1 (3). С. 112–123.

S.P. NIKITAEV, Grand PhD Engineering, Prof.,
S.A. CHERNOV, PhD Chemical, M.B. KAZAKOVA,
SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central
Research Institute of Chemistry and Mechanics»

Abstract. The solution of the actual technical problem of choosing the optimal design of the specialized device for detecting α - and β - radionuclides is given, taking into account the limitations associated with the influence of long-term operating factors on the sensitivity indicators of the detector.

Keywords: ALPHA AND BETA RADIATION;
ALPHA AND BETA RADIONUCLIDES; DETECTION METHOD;
RADIATION MONITORING; AQUEOUS MEDIUM.

For citation: Nikitaev S.P., Chernov S.A., Kazakova M.B. Lowering detection thresholds of α - and β -emitting radionuclides in water. *Perspektivnyye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti* [Promising technologies for security systems], 2024, N 1(3), pp. 112–123. (In Russ.).

Введение

В ранее опубликованной статье [1] были рассмотрены существующие методы и специализированные устройства детектирования α - и β -радионуклидов в водной среде, функционирующие в реальном (квазиреальном) масштабе времени. Теоретическими расчетами доказана ожидаемая минимальная детектируемая активность излучающих частиц в воде, которая находится в известном противоречии со скоростью проведения контроля и массогабаритными характеристиками подобных приборов.

В этой связи актуальной технической задачей является поиск оптимальной конструкции специализированного устройства детектирования α - и β -радионуклидов с учетом ограничений, связанных с влиянием длительных воздействующих эксплуатационных факторов на показатели чувствительности прибора.

Целевой функцией оптимизации является максимальный сбор полезного светового сигнала для регистрации α - и β -излучения непосредственно из водного раствора с учетом низких длин пробега заряженных частиц при обеспечении максимальной чистоты детектирующих пластин и поверхностей измерительной камеры в целом. В такой постановке оптимизационной задачи класс приборов и устройств детектирования, основанных на указанном принципе, является новым.

Основная часть

Основным α - и β -излучающим радионуклидом, определяющим фоновые показатели контролируемой питьевой воды, является радон-222 (^{222}Rn) с дочерними продуктами распада, содержание которых в измерительном объеме может изменяться в зависимости от различных внешних факторов [2, 3]. Влияние радонового фона в воде в реальных условиях эксплуатации на показатели частоты ложных тревог требует изучения с целью оптимизации параметров обработки измерительной информации.

Для теоретического обоснования возможности снижения порога обнаружения удельной активности β -излучающих радионуклидов в воде использовали формулу [4]:

$$A_v = \frac{k\sqrt{N_\phi} + \frac{q^2}{2} - q\sqrt{k\sqrt{N_\phi} + \frac{q^2}{4} + N_\phi}}{\text{ЭР}_\beta \cdot T_3},$$

где $\text{ЭР}_\beta = 0,0437$ – эффективность регистрации β -излучения, имп./с/Бк/кг; $k = 4$ – параметр превышения порога обнаружения над фоном (в единицах СКО фона, σ); $T_3 = 300$ – время экспозиции, с; $N_\phi = n_\phi \cdot T_3$ – счет фона за время измерения экспозиции T_3 , имп.; n_ϕ – скорость счета фона, имп./с; A_v – порог обнаружения, Бк/кг; $q = 0$ – квантиль нормального распределения для вероятности обнаружения $(1 - P)$; $P = 0,5$ – вероятность обнаружения.

Порог обнаружения является функцией фоновой скорости счета, теоретическая зависимость указанной функции приведена на рис. 1.

Для снижения порогов регистрации β -излучающих радионуклидов в воде [5, 6]

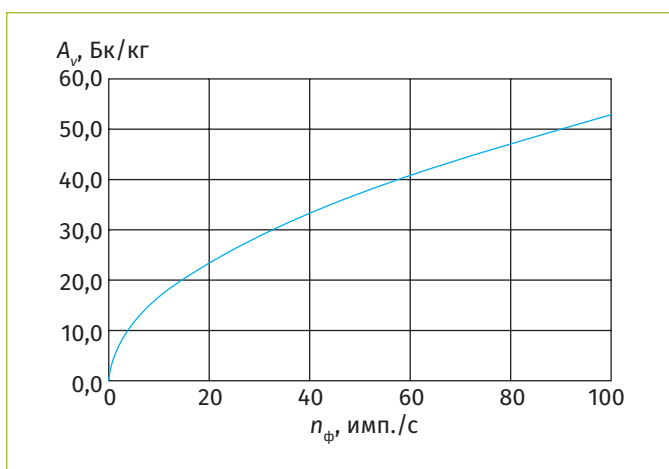


Рис. 1. Зависимость порога обнаружения β -излучения от фоновой скорости счета

следует минимизировать фоновую скорость счета, вызванную внешним излучением, которая обусловлена регистрацией фонового γ -излучения от объектов и материалов окружающей среды и жесткой компоненты вторичного космического излучения (в основном μ -мезонов).

Гамма-излучение от внешней среды можно уменьшить, окружая измерительную камеру защитным свинцовым экраном определенной толщины, ослабляющим интенсивность излучения. Исходя из этого практическими задачами исследования являются:

обоснование выбора оптимальной толщины свинцового экрана с использованием полученных экспериментальных данных;

определение степени влияния космического излучения и целесообразность применения метода регистрации по результатам экспериментальных данных.

Исследования проводились с помощью макетов измерительного блока и блока пробоподготовки, подробное описание которых дано в работе [1]. В составе детектирующей ячейки использовались сцинтилляционные пластины. Для оценки порога их чувствительности готовили водный раствор ^{222}Rn с заданной объемной активностью [2, 3]. Объем концентрата активного вещества для подготовки пробы рассчитывали по формуле:

$$V_k = V_0 \frac{A_v \cdot \rho \cdot V_v}{A_0},$$

где V_k – отбираемый объем концентрата, мл; V_0 – объем водного концентрата ^{222}Rn в таре для хранения, мл; A_0 – активность ^{222}Rn в объеме V_0 на момент изготовления

раствора, Бк; A_v – требуемая удельная активность водного раствора ^{222}Rn , Бк/кг; $\rho = 1 \text{ кг/л}$ – плотность воды; V_v – объем тары для разведения водного концентрата ^{222}Rn , л.

В отобранный концентрат добавляли питьевую воду до заполнения всего объема тары V_v .

Определение чувствительности к β -излучению калия-40 (^{40}K) в пробах воды проводили сериями измерений проб с разными значениями его удельной активности (A_v): 1000, 500 и 100 Бк/кг.

Пробу водного раствора хлорида калия с требуемой удельной активностью готовили из сухого порошка KCl . Массу навески рассчитывали по формуле:

$$m_{\text{KCl}} = \frac{A_v \cdot \rho \cdot V}{a_{\text{KCl}}},$$

где m_{KCl} – масса разводимого порошка хлорида калия, г; A_v – необходимая удельная активность ^{40}K в пробе, Бк/кг; $\rho = 1 \text{ кг/л}$ – плотность воды; V – объем воды для растворения хлорида калия (не менее 1,5 л), л; a_{KCl} – удельная активность порошка хлорида калия, Бк/г.

Результаты измерений в графическом виде приведены на рис. 2 и 3.

Всего было произведено 880 измерений, в ходе которых зафиксировано два ложных срабатывания по β -каналу, что соответствует частоте ложных срабаты-

В ходе измерений было зафиксировано два ложных срабатывания по β -каналу, что отвечает требованиям к устройству детектирования.

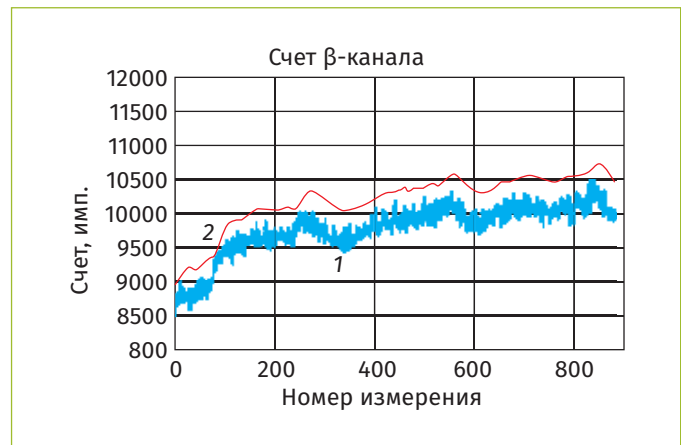
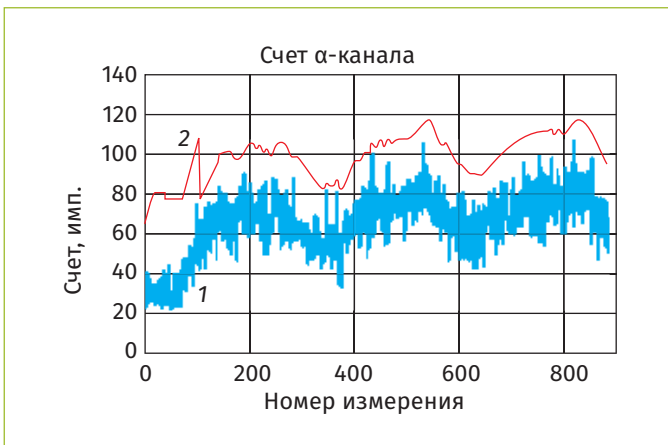
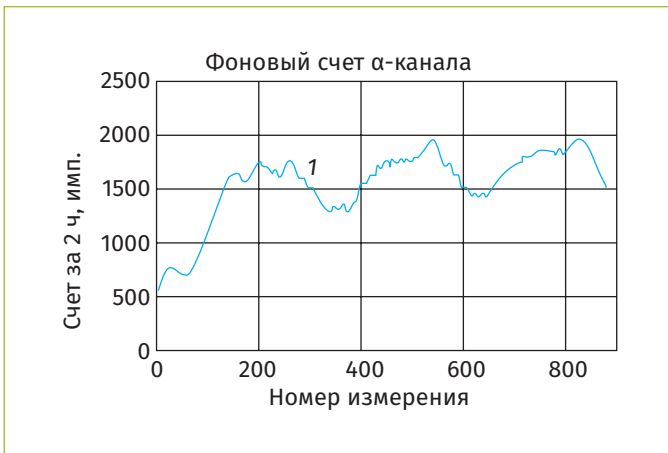


Рис. 2. Результаты измерений (α -канал) в проточном режиме: 1 – N_{α} ; 2 – П1

Рис. 3. Результаты измерений (β -канал) в проточном режиме: 1 – N_{β} ; 2 – П1

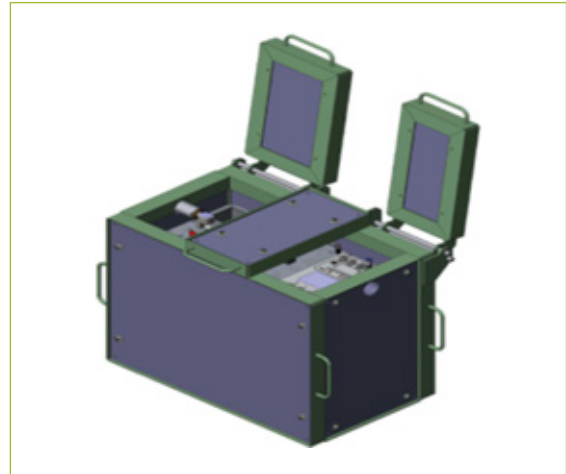
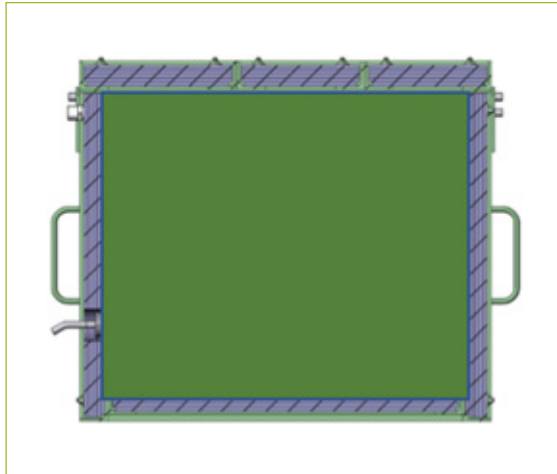


Рис. 4. Общий вид экспериментального защитного экрана

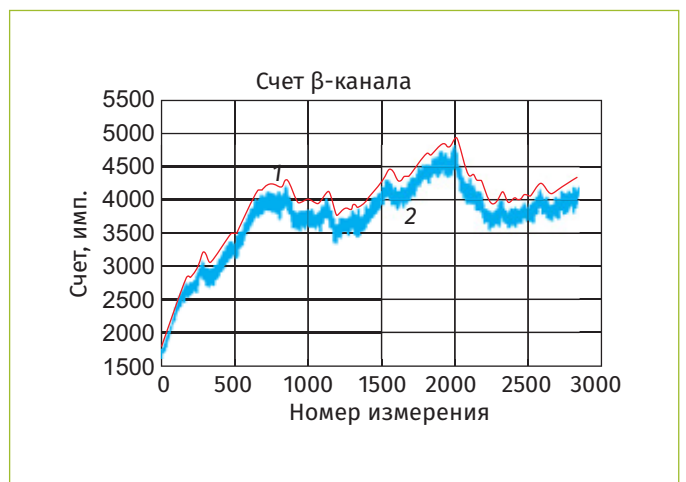
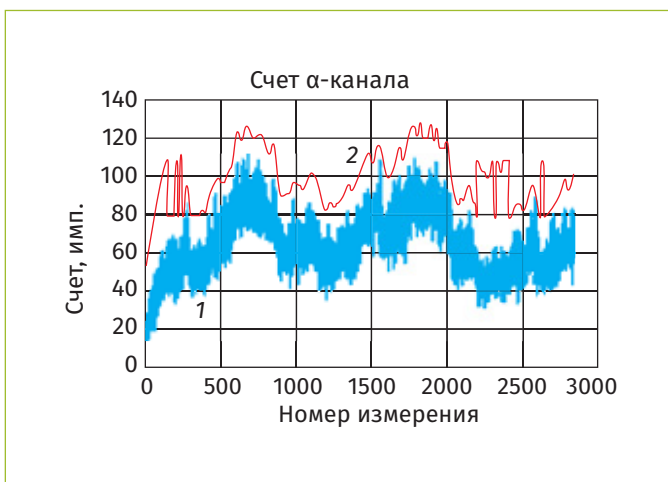
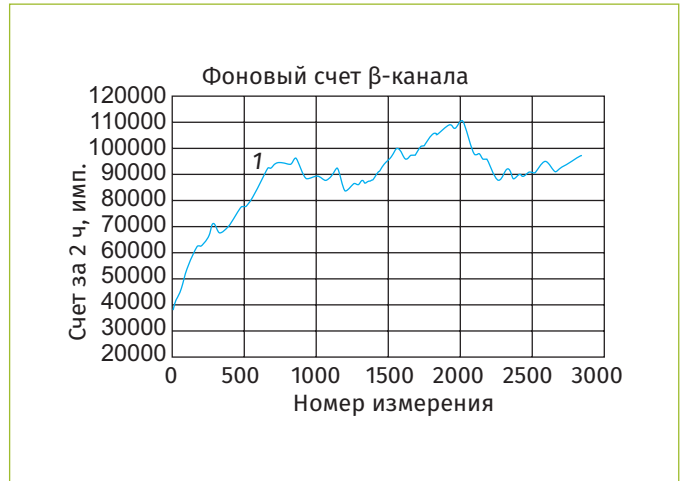


Рис. 5. Результаты измерений (α -канал) в проточном режиме с применением защитного экрана: 1 – N_{α} ; 2 – П1

Рис. 6. Результаты измерений (β -канал) в проточном режиме с применением защитного экрана: 1 – N_{β} ; 2 – П1

ваний, равной $ЧЛС_{\beta} = 2,3 \cdot 10^{-3}$, и отвечает требованиям к устройству детектирования, предусматривающим вероятность ложных срабатываний не более одного на 100 измерений.

С целью оценки частоты ложных срабатываний была проведена непрерывная серия измерений в проточном режиме с применением экспериментального свинцового защитного экрана с толщиной стенок от 6 до 30 мм.

Эскиз общего вида экспериментального защитного экрана приведен на рис. 4.

Результаты измерений (α -канал) в проточном режиме с применением защитного экрана приведены на рис. 5.

Результаты измерений (β -канал) в проточном режиме с применением защитного экрана приведены на рис. 6.

Всего было произведено 2837 измерений, в ходе которых зафиксировано одно ложное срабатывание по α -каналу и три – по β -каналу, что соответствует частоте ложных срабатываний, равной $ЧЛС_{\alpha} = 3,5 \cdot 10^{-4}$, $ЧЛС_{\beta} = 1,0 \cdot 10^{-3}$, и отвечает требованиям к устройству детектирования, предусматривающим вероятность ложных срабатываний не более одного на 100 измерений.

Полученные экспериментальные данные и результаты расчета эффективности регистрации ($ЭР_{\beta}$) радионуклида ^{40}K приведены в табл. 1.

Анализ данных, представленных на рисунках, показывает, что применение свинцового защитного экрана практически не влияет на фоновые показатели α -канала. Максимальные значения

Таблица 1

Экспериментальные данные и результаты расчета эффективности регистрации радионуклида ^{40}K

Наименование характеристики	Обозначение	Значение характеристики	Примечание
Фоновый счет β -канала, имп.	N_{ϕ}	4195	–
Время измерения фона, с	T_{ϕ}	900	–
Удельная активность ^{40}K в исследуемой пробе, Бк/кг	A_v	100	–
Счет β -канала за время измерения пробы с водным раствором ^{40}K , имп.	N_{β}	2706	–
Время измерения пробы (экспозиции), с	T_{β}	300	–
Средняя скорость счета β -канала при измерении пробы с водным раствором ^{40}K , имп./с	n_{β}	4,36	$n_{\beta} = (N_{\beta}/T_{\beta}) - (N_{\phi}/T_{\phi})$
Эффективность регистрации радионуклида ^{40}K , имп./с/Бк/кг	$ЭР_{\beta}$	0,0436	$ЭР_{\beta} = n_{\beta}/A_v$

Примечание. Расчетная оценка МДА_n производилась с округлением в большую сторону до значения, кратного 5, при следующих допущениях: вероятность обнаружения 0,5 ($q = 0$); вероятность ложных срабатываний $3,2 \cdot 10^{-5}$ ($k = 4$).

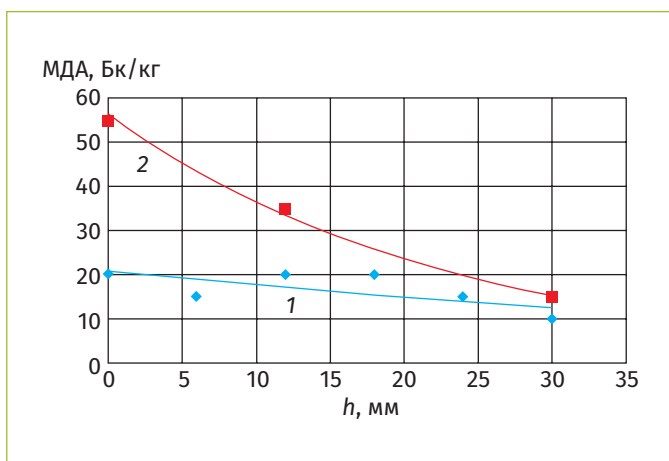


Рис. 7. Графики зависимости МДА для β -излучения радионуклида ^{40}K от толщины свинцовой защиты при различных уровнях фоновой нагрузки: 1 – МДА1; 2 – МДА2

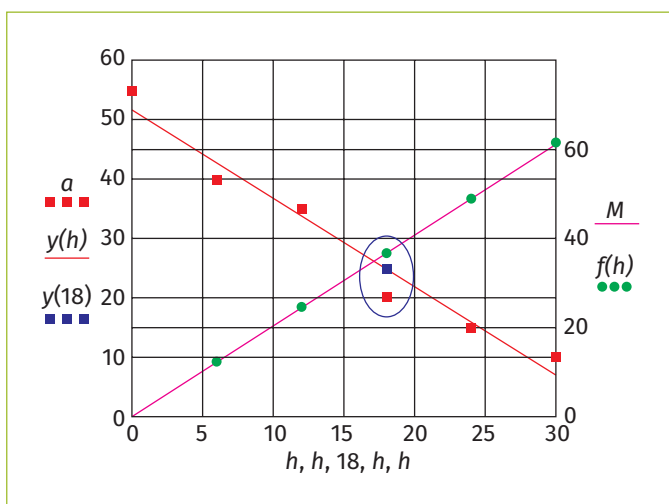


Рис. 8. Графическое представление поиска оптимальной толщины защитного экрана

фоновых показателей β -канала (оценка приведена для первых 880 измерений), которые соответствуют длительности серии измерений без защиты, снижаются в 2,5 раза.

Рассмотрим результаты оценки минимальной детектируемой активности (МДА) устройства для β -излучения радионуклида ^{40}K .

На основании полученных экспериментальных данных был построен график зависимости МДА для β -излучения радионуклида ^{40}K от толщины свинцовой защиты. Значения удельной активности для построения графика были отобраны по следующему критерию: минимальное значение удельной активности для заданной толщины защиты, при котором было зафиксировано не менее 9 тревожных срабатываний в серии из 10 измерений, что соответствует вероятности обнаружения $P = 0,5$. Полученная зависимость приведена на рис. 7. Значения МДА (20 Бк/кг в отсутствие защиты) обеспечиваются низким уровнем естественного фона 0,07 мкЗв/ч.

Сравнение графиков зависимостей МДА для β -излучения



Изображение: фотобанк ЛОРИ

Комплекс для анализа параметров воды

радионуклида ^{40}K от толщины свинцовой защиты при различных уровнях фоновой нагрузки (0,07 мкЗв/ч при измерении МДА1 и 0,12 мкЗв/ч – МДА2) показывает, что при толщине свинцовой защиты, равной 30 мм, изменение внешнего естественного фона в 1,7 раза не оказывает заметного влияния на МДА макетной установки. При уменьшении толщины свинца воздействие естественного фона становится более заметно. В случае полного отсутствия защиты ($h = 0$ мм) экспериментально полученные значения МДА при двух различных уровнях фоновых нагрузок отличаются более чем в 2 раза:

$\text{МДА1}_0 = 20$ Бк/кг, при уровне естественного γ -фона $H_1 = 0,07$ мкЗв/ч;

$\text{МДА2}_0 = 55$ Бк/кг, при уровне естественного γ -фона $H_2 = 0,12$ мкЗв/ч.

Оптимальная толщина свинцового экрана с использованием полученных экспериментальных данных вычислена по следующим уравнениям и ограничениям:

$$\left\{ \begin{array}{l} y(h) = 33,739 - 0,642 \cdot h \rightarrow \min \text{ МДА} \\ f(h) = 2,043 \cdot h \rightarrow \text{opt}f(h) \\ h \leq 30 \text{ мм} \\ n \geq 9 \\ M < 80 \text{ кг} \end{array} \right. .$$

Результаты вычислений приведены на рис. 8.

Таким образом, оптимальная толщина защитного свинцового экрана составляет 18 мм при ограничениях по его массе (менее 40 кг) и минимальном значении детектируемой активности водной среды от 20 до 25 Бк/кг.

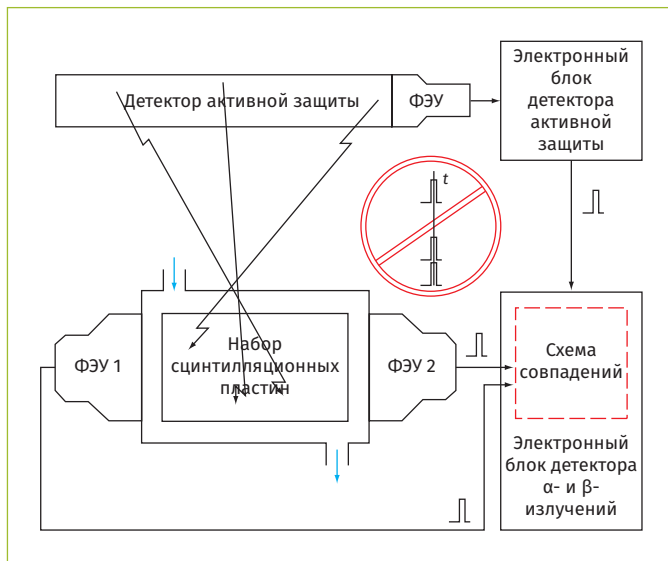


Рис. 9. Функциональная схема проведения испытаний узла активной защиты

В связи с тем, что космическая составляющая внешнего фона имеет высокую проникающую способность, в том числе и через свинец, для ослабления фоновой компоненты применяют так называемую активную защиту.

Технически активная защита представляет собой сцинтилляционный детектор, расположенный со стороны верхней полусферы по отношению к измери-

Так как космическая составляющая внешнего фона имеет высокую проникающую способность, то для ослабления фоновой компоненты применяют активную защиту, принцип действия которой основан на исключении из рассмотрения сигналов, одновременно зарегистрированных детектором активной защиты и основным измерительным прибором.

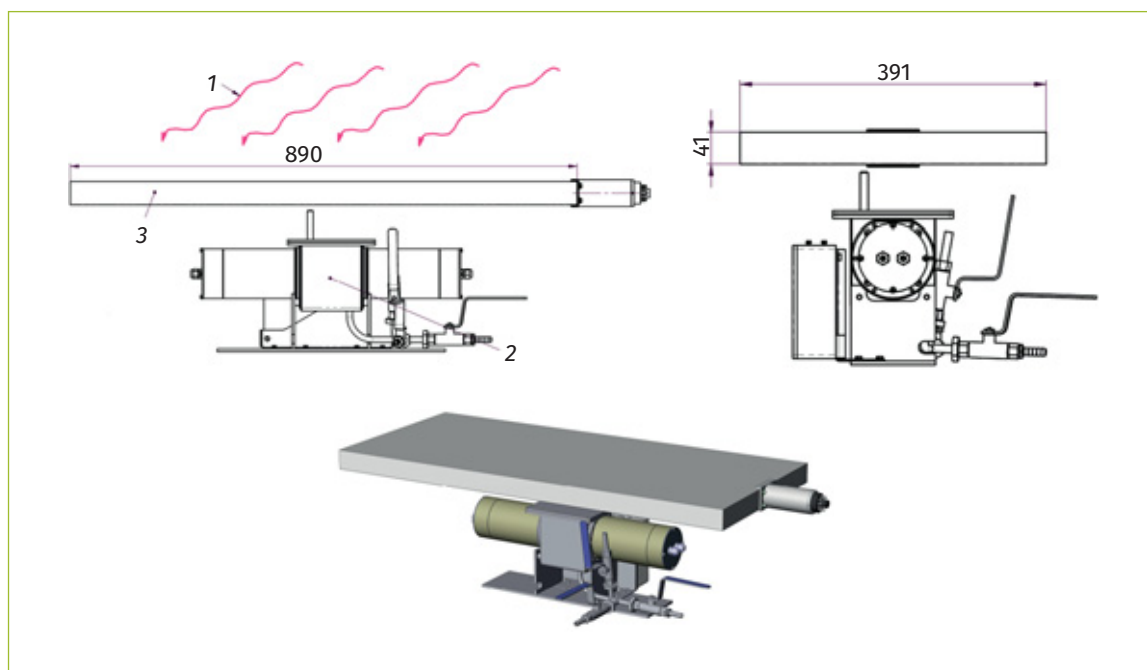


Рис. 10. Эскиз схемы проведения испытаний узла активной защиты: 1 – внеземное излучение – космические лучи; 2 – блок измерительный; 3 – пластиковый сцинтиллятор (масса 16 кг)

тельной части, благодаря которому его импульсы в момент совпадения сигналов с основным измерительным прибором исключаются из рассмотрения.

Принцип ее действия основан на исключении из рассмотрения сигналов, одновременно (в рамках заданного временного окна) зарегистрированных де-

Таблица 2
Определение эффективности регистрации радионуклида ⁴⁰K

Наименование характеристики	Значение характеристики		Примечание
	Защита выкл.	Защита вкл.	
Фоновый счет β-канала N_{ϕ} , имп.	9706	7122	–
Время измерения фона T_{ϕ} , с	900	900	–
Удельная активность ⁴⁰ K в исследуемой пробе A_v , Бк/кг	100	100	–
Счет β-канала за время измерения пробы с водным раствором ⁴⁰ K N_{β} , имп.	3956	3033	–
Время измерения пробы T_{β} , с	300	300	–
Средняя скорость счета β-канала при измерении пробы с водным раствором ⁴⁰ K n_{β} , имп./с	2,40	2,20	$n_{\beta} = (N_{\beta}/T_{\beta}) - (N_{\phi}/T_{\phi})$
Эффективность регистрации радионуклида ⁴⁰ K $\mathcal{E}P_{\beta}$, имп./с/Бк/кг	0,0240	0,0220	$\mathcal{E}P_{\beta} = n_{\beta}/A_v$

Таблица 3

Результаты оценки степени влияния активной защиты на МДА прибора

Состояние активной защиты	N_{β} , имп.	МДА _{β} , Бк/кг
Выключена	9706	18,2
Включена	7122	17,0

Условные обозначения: N_{β} – количество событий регистрации в β -канале при измерении пробы за 900 с, имп.; МДА _{β} – оценка минимальной детектируемой активности по β -каналу, Бк/кг.

Примечание. Расчетная оценка МДА производилась при следующих допущениях: вероятность обнаружения 0,5 ($q = 0$); вероятность ложных срабатываний $3,2 \cdot 10^{-5}$ ($k = 4$); эффективность регистрации по β -каналу при выключенной активной защите $\mathcal{E}P_{\beta 0} = 0,0240$ имп./с/Бк/кг; эффективность регистрации по β -каналу при включенной активной защите $\mathcal{E}P_{\beta 1} = 0,0220$ имп./с/Бк/кг.

тектором активной защиты и основным измерительным прибором. Вероятность того, что синхронная регистрация вызвана независимыми случайными событиями, мала, по сравнению с тем, что одновременное срабатывание обоих детекторов вызвано одним событием – фиксированием космической частицы, «прошивающей» насквозь как один, так и другой прибор и оставляя в них часть своей энергии. Таким образом, исключая из рассмотрения компоненту скорости счета, спровоцированную одновременной регистрацией, возможно снизить фоновую скорость счета, вызванную космическим излучением.

Функциональная схема проведения экспериментальных исследований с узлом активной защиты приведена на рис. 9. Эскиз схемы активной защиты – на рис. 10.

Экспериментальные данные и результаты расчета эффективности регистрации ($\mathcal{E}P_{\beta}$) радионуклида ^{40}K для различных состояний активной защиты приведены в табл. 2.

Результаты измерения фоновых показателей для различных состояний активной защиты, а также расчетные значения МДА β -канала приведены в табл. 3.

Анализ результатов, приведенных в табл. 3, показывает незначительное сни-



жение МДА радионуклида ^{40}K (на 6,6%) при включении активной защиты с использованием предложенной конструктивной схемы, что не исключает влияния космической составляющей внешнего фона.

Выводы

Результаты оценки МДА радионуклида ^{40}K показали эффективность внешней свинцовой защиты, которая позволяет снизить уровень внешнего воздействия в 1,5–2,5 раза в зависимости от естественного γ -фона. При этом с ростом его величины эффективность применения защиты возрастает.

Цель исследования достигнута: определена оптимальная толщина защиты (с точки зрения эффективности подавления фона) и ее массы, составляющая 18 мм (три листа по 6 мм).

Порог обнаружения β -излучающих радионуклидов в воде при времени измерения 5 мин и вероятности обнаружения 0,5 при доверительной вероятности 0,95 составляет не более 30 Бк/кг.

Результаты оценки степени влияния активной защиты на значения фоновой скорости счета β -детектирующего канала показывают незначительное снижение МДА радионуклида ^{40}K (на 6,6%) при использовании предложенной конструктивной схемы узла активной защиты.

Проведение дальнейших исследований в рассматриваемой предметной области целесообразно продолжить в направлении получения достоверных оценок порогов детектирования α - и β -активных радионуклидов в пробах воды при достаточно коротких временах экспозиции – от единиц секунд по α -каналу и десятков секунд по β -каналу.

Список литературы

1. Никитаев С.П., Чернов С.А., Казакова М.В. Оценка ожидаемых показателей детектирования α , β -радионуклидов в водной среде // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 2. С. 96–114.
2. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010.
3. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009.
4. ГОСТ Р 51635-2000. Мониторы радиационные ядерных материалов. Общие технические условия. М.: «ИПК Издательство стандартов», 2000.
5. МР 2.6.1.0064-12. Радиационный контроль питьевой воды методами радиохимического анализа. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2013. 74 с.
6. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения. М.: «Информационно-издательский центр Минздрава России», 2000.

References

1. Nikitaev S.P., Chernov S.A., Kazakova M.B. Estimation of expected indicators of detection of α , β -radionuclides in the aquatic environment. *Perspektivnye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti* [Promising technologies for security systems]. 2023, N 2, pp. 96–114. (In Russ.).
2. SP 2.6.1.2612-10. *Osnovnye sanitarnye pravila obespecheniya radiacionnoj bezopasnosti (OSPORB-99/2010)* [Basic sanitary rules for ensuring radiation safety (OSPORB-99/2010)]. Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor Publ., 2010. (In Russ.).
3. SanPiN 2.6.1.2523-09. *Normy radiacionnoj bezopasnosti (NRB-99/2009)* [Radiation safety standards (NRB-99/2009)]. Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor Publ., 2009 (In Russ.).
4. GOST R 51635-2000. *Monitory radiacionnye yadernyh materialov. Obshchie tekhnicheskie usloviya*. [Nuclear radiation material monitors. General specifications], Moscow, «IPK Publishing House of Standards» Publ., 2000 (In Russ.).

5. MR 2.6.1.0064-12. *Radiacionnyj kontrol' pit'evoj vody metodami radiohimicheskogo analiza* [Radiation monitoring of drinking water by radiochemical analysis methods]. Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor Publ., 2013, 74 p. (In Russ.).

6. SanPiN 2.1.4.1074-01. *Pit'evaya voda. Gigienicheskie trebovaniya k kachestvu vody centralizovannyh sistem pit'evogo vodosnabzheniya. Kontrol' kachestva. Gigienicheskie trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti sistem goryachego vodosnabzheniya*. [Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control. Hygienic requirements for ensuring the safety of hot water supply systems]. Moscow, «Information and Publishing Center of the Ministry of Health of Russia» Publ., 2000. (In Russ.).

Поступила в редакцию: 19.02.2024

Одобрена рецензентами: 21.02.2024

Принята к печати: 27.03.2024

Об авторах

Сергей Павлович Никитаев – доктор технических наук, профессор ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики».

Sergey P. Nikitaev – Grand PhD in Engineering sciences, Professor SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics».

Сергей Александрович Чернов* – кандидат химических наук, старший научный сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики». Адрес для почтовых отправок: 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А. E-mail: mail@cniihm.ru.

Sergey A. Chernov* – PhD in Chemical sciences, senior researcher SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics». Postal address: 16A Nagatinskaya str., Moscow, 115487. E-mail: mail@cniihm.ru.

Марта Борисовна Казакова – ведущий научный сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики».

Marta B. Kazakova – leading researcher SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics».

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

УДК 550.344; 550.348; 622.235

ЭКОНОМИЧНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ РЕЗКИ ПОРОД И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

С.И. ДОРОШЕНКО, к.т.н., А.С. ИВАНОВ, В.А. МАЛЫХ, П.А. РОМАНЕНКОВ,
АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»

Н.П. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.,
ФГБОУ ВО «БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»

А.В. СКРИПКА, к.т.н., В.А. КОРШУНОВА, к.г.-м.н.,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»

Аннотация. *Оцениваются возможности технологии ударно-волновой резки при разрушении скальных пород, сносе сооружений и проведении спасательных операций. Приведены характеристики степеней разрушений, методы и способы разбора завалов. Дан анализ развития критических ситуаций со смертностью пострадавших. Показаны существенное сокращение расхода взрывчатого вещества и повышение эффективности представленного инновационного инструмента для структур МЧС и предприятий горной промышленности.*

Ключевые слова: УДАРНО-ВОЛНОВАЯ РЕЗКА; БИЛИНЕЙНЫЙ ЗАРЯД; МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ; ВОЛНА МАХА; ЭКСПЕРИМЕНТ; ГОРНАЯ ПОРОДА; БЕТОННЫЙ БЛОК.

Для цитирования: *Дорошенко С.И. Экономичный инструмент для эффективного разрушения пород и железобетонных конструкций / Н.П. Михайлов, А.С. Иванов, В.А. Малых, П.А. Романенков, А.В. Скрипка, В.А. Коршунова // Перспективные технологии для систем безопасности. 2024. № 1 (3). С. 124–135.*

Введение

В настоящее время сохраняется тенденция роста чрезвычайных ситуаций (ЧС). В области гражданской обороны основной задачей является проведение аварийно-спасательных и других неотложных работ при возникновении опасностей для населения как при военных конфликтах, так и при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера. Они направлены на спасение жизни и сохранение здоровья людей, снижение ущерба

для окружающей среды и материальных потерь, прекращение действия опасных факторов и локализацию зон.

В планах действий по предупреждению и ликвидации ЧС, наряду с созданием группировки сил куда могут включаться подразделения гражданской обороны, в том числе поисково-спасательные службы и формирования, предусматривается применение различных средств поиска и расчистки завалов, в том числе взрывчатых материалов. Актуальность данной



AN ECONOMICAL TOOL FOR EFFECTIVE DESTRUCTION OF ROCKS AND REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

S.I. DOROSHENKO, PhD in Engineering, A.A. IVANOV, V.A. MALYKH, P.A. ROMANENKOV,
JSC «Scientific and Production Enterprise «Radar mms»

N.P. MIKHAILOV, Grand PhD in Engineering, Prof.,
Baltic State Technical University D.F. Ustinov Voenmekh

A.V. SKRIPKA, PhD in Engineering, V.A. KORSHUNOVA, PhD in Geology and Mineralogy,
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

Abstract. *The possibilities of shock wave cutting technology in the destruction of rocks, demolition of structures and rescue operations are evaluated. The characteristics of the degrees of destruction, methods and methods of debris analysis are given. The analysis of the development of critical situations with the mortality of victims is given. A significant reduction in the consumption of explosives and an increase in the efficiency of the presented innovative tool for the structures of the Ministry of Emergency Situations and mining enterprises are shown.*

Keywords: SHOCK WAVE CUTTING; BILINEAR CHARGE; MATHEMATICAL MODEL; MACH WAVE; EXPERIMENT; ROCK; CONCRETE BLOCK.

For citation: Doroshenko S.I., Ivanov A.A., Malykh V.A., Romanenkov P.A., Mikhailov N.P., Skripka A.V., Korshunova V.A. An economical tool for effective destruction of rocks and reinforced concrete structures. *Perspektivnye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti* [Promising technologies for security systems], 2024, N 1 (3), pp. 124–135. (In Russ.).



Рис. 1. Механизированные спасательные работы



Рис. 2. Применение техники при механическом демонтаже зданий и конструкций

статьи стоит в том, что авторы представляют инновационный способ ударно-волновой резки, владение которым обеспечит высокий темп спасательных работ в обрушенных зданиях, причем с высокой степенью безопасности. Кроме того, описанная технология может быть полезной как для горной промышленности, так и для строительной отрасли.

Цель работы – показать эффективность ударно-волновой резки в различных условиях применения, а также дать расчеты, подтверждающие это в ходе сравнения с ранее существующими способами.

Способы ведения работ по демонтажу конструкций, зданий и сооружений

Для обрушения (демонтажа) конструкций зданий применяются способы, которые подразделяются на механизиро-

ванный (основной), термический, взрывной, электрогидравлический, или их комбинации [1].

МЕХАНИЗИРОВАННЫЙ СПОСОБ. При механизированном способе применяются (рис. 1):

экскаваторы и экскаваторы-разрушители со сменным навесным оборудованием: гидравлическими ножницами, грейферным захватом, фрезой, клиномолотом, шар-молотом и т.п. Длина стрел в зависимости от высоты объекта достигает 60 м – для объектов высотой 50 м. При большей высоте предусматривается устройство пандуса, позволяющего вести работы на безопасном расстоянии. Применяют гидравлические экскаваторы, а также автокраны, грузоподъемные краны на пневмоколесном или гусеничном ходу с универсальными гидравлическими захватами (рис. 2). Для вскрытия ас-



Рис. 3. Снос зданий (сооружений) взрывным способом

Проблемы применения взрывного способа можно решить, применив инновационный метод, который предусматривает укладку билинейных зарядов ударно-волновой резки.

фальтобетонных покрытий, быстрого разрушения бетонных и железобетонных конструкций используется гидравлический молот в качестве рабочего сменного органа к экскаватору-погрузчику;

станки с алмазными отрезными дисками – при резке бетона и железобетона толщиной до 450 мм;

алмазный канат – стальной трос с расположенными на нем алмазными втулками, для специального автомата с двигателем и системой роликов, управляющих движением каната. Используется при больших толщинах бетона, железобетона, кирпича и природного камня;

клиновые раскалыватели с применением гидроцилиндра;

электрогидравлические и дизельные роботы со сменным навесным оборудованием.

В стесненных условиях, когда другие способы не могут быть использованы,

снос производится ручным пневматическим и электрифицированным инструментом: отбойные молотки, пневматические бетоноломы, механические пилы, лебедки, домкраты и др.

ТЕРМИЧЕСКИЙ СПОСОБ. К средствам термического воздействия на материалы разрушенных конструкций относятся:

- кислородное копье;
- газоструйное порошково-кислородное копье;
- порошково-кислородный резак;
- реактивно-струйная горелка;
- электродуговое плавление.

Высокопроизводительные термические способы разрушения монолитных железобетонных конструкций основаны на применении источника тепла в форме высокотемпературного газового потока или электрической дуги. С помощью этих способов производится прожигание в бетоне отверстий диаметром 30...20 мм и

глубиной до 4 м и резка бетона и железобетона толщиной 300...400 мм.

ВЗРЫВНОЙ СПОСОБ. К средствам взрывного воздействия на материал конструкций относятся:

- взрывчатые вещества;
- гидровзрыв.

Гидровзрыв применяют для дробления и раскалывания материала строительных конструкций. При электрогидравлическом способе разрушения железобетонных монолитных плит применяется эффект гидравлического удара высокого давления, возникающего в ограниченном объеме жидкости, при электрическом разряде.

Взрывной способ сноса (разрушения) с использованием взрывчатых веществ рекомендуется применять на свободных площадках (рис. 3). В стесненных условиях застройки этот способ требует устройства защиты от разлета осколков и пыли. Подобные проблемы можно решить и другим способом, применив инновационный метод взрывных работ с укладкой билинейных зарядов ударно-волновой резки. Эта технология позволяет оперативно с высокими экономическими показателями решать задачи и в горной промышленности, и при строительстве.

Аварийно-спасательные работы в завалах

Чрезвычайные ситуации независимо от характера и причин их возникновения также порождают сложные инженерные задачи, связанные с выполнением больших объемов аварийно-спасательных и других неотложных мероприятий.

Особенно это заметно в ходе работ в завалах при ликвидации последствий землетрясений, взрывов, обрушений зданий и сооружений.

ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАВАЛОВ. Завалы образуются вследствие обрушения (демонтажа) зданий и сооружений, вызванных землетрясениями, взрывами, бурями, ураганами, смерчами, селями, оползнями и другими природными и техногенными явлениями. Характер завала зависит от источника (причины) его образования, типа и длительности действия поражающего фактора, типа и этажности зданий, особенностей застройки и других факторов. Степень разрушения зданий подразделяется на четыре категории (таблица).

Завалы представляют собой хаотичное нагромождение крупных и мелких обломков строительных конструкций, технологического оборудования, коммунально-

Таблица

Характеристика степеней разрушения зданий

Степень	Характеристика
Слабая	Частичное разрушение внутренних перегородок, кровли, дверных и оконных коробок, легких построек и др. Основные несущие конструкции сохраняются. Для полного восстановления требуется капитальный ремонт
Средняя	Разрушение меньшей части несущих конструкций. Большая часть несущих конструкций сохраняется и лишь частично деформируется. Может сохраняться часть ограждающих конструкций (стен), однако при этом второстепенные и несущие конструкции могут быть частично разрушены. Здание выводится из строя, но может быть восстановлено
Сильная	Разрушение большей части несущих конструкций. При этом могут сохраняться наиболее прочные элементы здания, каркасы, ядра жесткости, частично стены и перекрытия нижних этажей. При сильном разрушении образуется завал. В большинстве случаев восстановление нецелесообразно
Полная	Полное обрушение (демонтаж) здания, от которого могут сохраниться только поврежденные (или неповрежденные) подвалы и незначительная часть прочных элементов. При полном разрушении образуется завал. Здание восстановлению не подлежит



Рис. 4. Поиск и обнаружение людей в завалах

энергетических устройств, мебели и т.д.

В толще завалов могут оставаться крупные щели, через которые свободно проходят запахи и звуки от находящегося там человека. Это облегчает поиски людей, оказавшихся в завалах (рис. 4).

Объем завалов при разрушении жилых зданий достигает 35...50%, промышленных – 15...20%. В первом случае максимальный потолок обломков колеблется от 1/5 до 1/7 высоты сооружения, а во втором – от 1/4 до 1/10. Пустоты составляют 40...60%. Средний угол откосов завалов – 30°.

Разрушение зданий в ходе ЧС сопровождается блокированием людей и их поражением.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРАЖЕНИЯ. Число безвозвратных потерь в момент разрушения зданий и сооружений в среднем может составлять величину, равную

10...20% от общего числа пострадавших.

Поражение при катастрофах сопровождается, как правило, механическими травмами пострадавших разной степени:

- 40% – легкая;
- 20% – средняя;
- 20% – тяжелая;
- 20% – крайне тяжелая.

На третьи или четвертые сутки с момента землетрясения люди, находящиеся под завалами, начинают гибнуть от переохлаждения, жажды и других причин. В результате через 7–10 дней шансы обнаружить живого человека под обломками практически равны нулю. Как правило, около половины пострадавших (40...50%) не в состоянии заявить о своем существовании из-за полученных травм. В первые сутки после поражения при отсутствии медицинской помощи летальность среди пострадавших может достигать 40%. В

7–10

дней. Именно столько времени есть у спасателей, чтобы найти и спасти пострадавших под завалами, после этого срока шансы обнаружить живого человека практически равны нулю.

этой связи необходимо максимально быстро проделать проходы в завалах к имеющимся пустотам с людьми и это можно реализовать взрывным способом с применением билинейного заряда (БЛЗ), направленного на наиболее прочные элементы здания – каркасы, ядра жесткости и т.д.

Билинейный заряд ударно-волновой резки

Эта технология с ее уникальными характеристиками довольно подробно раскрыта в работах [2, 3]. В представленных публикациях исследовался готовый промышленно изготовленный заряд. В настоящей статье представлены результаты испытаний БЛЗ ударно-волновой резки, изготавливаемых непосредственно на объекте выполнения взрывных работ из любого взрывчатого вещества (ВВ). Учитывая степень готовности зарядов, технологичность их применения, относительно небольшие массы ВВ, отсутствие запреградного действия, можно утверждать, что технология позволяет в кратчайшие сроки решить спасательные задачи, в том числе и в завалах бетонных конструкций, выполнять другие специ-

альные работы, связанные с резкой (разрушением) различных материалов.

Ударно-волновая резка основана на использовании экстремальных (Маховских) режимов интерференции ударных волн, образованных в материале при синхронной детонации параллельных зарядов на поверхности преграды.

Разрушение происходит практически без массопереноса вследствие взаимодействия трех волн разгрузки за фронтом волны Маха. В результате преграда разрезается по линии наименьшего сопротивления плоскими трещинами. Установлено, что между массой ударно-волнового заряда и толщиной разрезаемой преграды сохраняется линейная зависимость.

Для оценки возможности применения резки горных пород выполнены аналитические расчеты кинематических параметров столкновения ударных волн параллельных зарядов в граните.

Как известно, скорость ударных волн D_v в граните остается равной скорости звука C до давлений $p \leq 37$ ГПа [4]. В общем случае образование ударных волн конической и цилиндрической формы происходит при условии $D_n > D_v = C$, где D_n – скорость детонации зарядов.



Основным параметром, определяющим режим интерференции волн, является угол их столкновения α . Нерегулярный (Маховский) режим реализуется при $\alpha \geq \alpha_{кр} \approx 68...74^\circ$ [5].

Аналитическими методами расчета получена зависимость углов α при столкновении конических волн $D_n \geq C$ [5]:

$$\sin(\alpha/2) = \sqrt{1 - \frac{\cos^2 \beta}{1 + y/L}}, \quad (1)$$

где $\beta = \arcsin \frac{D_v}{D_n} = \arcsin \frac{C}{D_n}$; L – расстояние между зарядами; y – расстояние от поверхности преграды до точки столкновения волн. Для цилиндрических волн $\beta = 0$, и по формуле (1) получаем:

$$\sin(\alpha/2) = \sqrt{1 - \frac{L}{y+L}}. \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что для цилиндрических волн режим нерегулярного столкновения реализуется в широком диапазоне параметров БЛЗ, что обеспечивает их применение для разрушения горных пород, бетона и других кристаллических сред.

Физическая сущность ударно-волновой резки заключается в формировании и последующем взаимодействии достаточно сложного цуга ударных и отраженных волн. На рис. 5 показан характер изменения давления при многоволновом нагружении.

В результате суперпозиции отраженных волн разрушение пород осуществляется отрывом, что требует меньших энергетических затрат.

По итогам теоретических и экспериментальных исследований в Балтийском государственном техническом университете «Военмех» им. Д.Ф. Устинова с участием специалистов Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России и АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс» разработан ряд конструкций ударно-волновых зарядов [6, 7].

Для совершенствования технологии ударно-волновой резки проведены теоретические исследования разрушения



Изображение: фотобанк ЛОРИ

Применение ударно-волновой резки для расчистки горных пород



Рис. 6. Резание пород с помощью БЛЗ

преград импловивными (симметрично сходящимися) ударными волнами. Разработаны физические и математические модели, описываемые системами уравнений [8, 9].

На базе ООО «Промстройвзрыв» проведены испытания по резке горных пород и бетонных блоков импловивными ударными волнами. Для этого применялись БЛЗ на основе патронированных эмульсионных взрывчатых веществ нитронит-П и гелпор [10].

Эксперименты по применению БЛЗ проводились при ликвидации нависания (козырьков) скального массива над участком строящейся автодороги «Санкт-Петербург – Сортавала». Размеры нависающего массива – 3,1×1,3×1,5 м. Площадь реза до 3,5 м². Заряды располагались по поверхности блока двумя параллельными рядами по линии реза. Расстояние между рядами – 100 мм (рис. 6).

Симметричное столкновение ударных волн в массиве обеспечивалось одновременным инициированием.

В результате подрыва наблюдалось сквозное разделение блока в плоскости симметрии БЛЗ. Удельный расход взрывчатого вещества составил 1,26 г/см², что в 2–5 раз меньше показателей при отколе массива сосредоточенным зарядом.

Предварительно демонстрация заряда ударно-волновой резки выполнялась на 18 испытательном полигоне инженерных



Рис. 7. Перебитие бетонного блока толщиной 520 мм с помощью БЛЗ

войск Вооруженных Сил РФ по ранее утвержденной программе и методике. В ходе работ были проведены сравнительные подрывы зарядов ударно-волновой резки и инженерных кумулятивных зарядов, в том числе и по бетонным блокам (рис. 7) с помощью БЛЗ [2]. Эти испытания были взяты за основу при натурных работах на базе ООО «Промстройвзрыв», где и были проведены испытания по резке горных пород импловзивными ударными волнами.

Выводы

1. Ударно-волновая резка пород является инновационной технологией для горной промышленности, взрывных работ при сносе сооружений и спасательных операций в завалах зданий и сооружений.

2. Использование билинейных зарядов, реализующих резку волнами Маха, позволит существенно снизить расход взрывчатых материалов и время проведения работ.

Список литературы

1. СП 325.1325800.2017. Здания и сооружения. Правила производства работ при демонтаже и утилизации [Электронный ресурс]. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/d2a/SP-325.-Demontazh.pdf> (дата обращения: 20.07.2023).
2. Дорошенко С.И., Иванов А.С., Малых В.А. Ударно-волновая резка – инновационный инструмент эффективных и безопасных взрывных работ // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 1 (01). С. 110–121.
3. Дорошенко С.И. Ударно-волновая резка: безопасные спасательные работы под водой / С.И. Дорошенко, А.С. Иванов, В.А. Малых, П.А. Романенков, А.В. Скрипка, В.В. Яхеев // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 2 (02). С. 44–60.
4. Российская Федерация. Правительство. О классификации ЧС природного и техногенного характера: Постановление Правительства РФ от 13.09.1996 № 1094. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант». URL: <https://www.garant.ru/?ysclid=lqbz8542o9220670726> (дата обращения: 29.11.2023).
5. Кутузов Б.Н. Взрывные работы. М.: Недра, 1988. С. 232–235.
6. Пат. 2701600 С2 Российская Федерация. Заряд для разрезания твердых материалов: заявл. 03.07.2017; опубл. 30.09.2019 / Н.П. Михайлов [и др.]; заявитель БГТУ.
7. Пат. 204402 Российская Федерация. Удлиненный заряд взрывчатого вещества: заявл. 19.05.2020; опубл. 24.05.2021 / С.И. Дорошенко [и др.]; заявитель БГТУ.
8. Михайлов Н.П. Технологические основы управления ударно-волновыми процессами: дис. ... д-ра техн. наук / Н.П. Михайлова. СПб.: БГТУ «Военмех», 2001.
9. Михайлов Н.П., Дорошенко С.И., Бригадин И.В. Совершенствование технологии резки, сварки и упрочнения металлов // Взрывное дело. 2023. № 109/67. С. 101–117.
10. Основы математического моделирования процессов взрыва и удара: учебник / Н.П. Михайлов. СПб.: БГТУ «Военмех», 2012. 202 с.

References

1. SP 325.1325800.2017. *Zdaniya i sooruzheniya. Pravila proizvodstva rabot pri demontazhe i utilizacii* [Buildings and structures. Rules of work during dismantling and disposal]. Available at: <https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/d2a/SP-325.-Demontazh.pdf> (accessed: 20 July 2023). (In Russ.).
2. Doroshenko S.I., Ivanov A.S., Malykh V.A. Shock wave cutting – an innovative tool for efficient and safe blasting operations *Perspektivnye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti* [Promising technologies for security systems], 2023. N 1 (01). P. 110–121. (In Russ.).
3. Doroshenko S.I., Ivanov A.A., Malykh V.A., Romanenkov P.A., Skripka A.V., Yaheev V.V. Shock wave cutting: safe underwater rescue operations. *Perspektivnye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti* [Promising technologies for security systems], 2023, N 2 (02), pp. 44–60. (In Russ.).
4. Russian Federation. Government. *O klassifikacii ChS prirodno i tekhnogenno haraktera* [On the classification of natural and man-made emergencies]. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 13.09.1996 N 1094, dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Garant». Available at: <https://www.garant.ru/?ysclid=lqbz8542o9220670726> (accessed: 29 November 2023). (In Russ.).

5. Kutuzov B.N. *Vzryvnye raboty* [Blasting]. Moscow, Nedra, Publ., 1988, pp. 232–235. (In Russ.).
6. Patent N 2701600 C2 Russian Federation. *Zaryad dlya razrezaniya tverdykh materialov* [Charge for cutting solid materials], zayavl. 03.07.2017; opubl. 30.09.2019, N.P. Mihajlov [i dr.], zayavitel' BGTU. (In Russ.).
7. Patent N 204402 Russian Federation. *Udlinennyj zaryad vzryvchatogo veshchestva* [Elongated explosive charge], zayavl. 19.05.2020; opubl. 24.05.2021, S.I. Doroshenko [i dr.], zayavitel' BGTU. (In Russ.).
8. Mikhailov N.P. *Tekhnologicheskie osnovy upravleniya udarnovolnovymi processami* [Technological foundations of shockwave process control]. Dis. d-ra tekhn. nauk N.P. Mihajlova, St. Petersburg, BGTU «Voenmekh», Publ., 2001. (In Russ.).
9. *Mikhailov N.P., Doroshenko S.I. Brigadin I.V.* Improving the technology of cutting, welding and hardening of metals. *Vzryvnoe delo* [Explosive business], 2023, N 109/67, pp. 101–117. (In Russ.).
10. *Osnovy matematicheskogo modlirovaniya processov vzryva i udara* [Fundamentals of mathematical modeling of explosion and impact processes]. Uchebnik, N.P. Mihajlov, St. Petersburg, BGTU «Voenmekh», Publ., 2012, 202 p. (In Russ.).

Поступила в редакцию: 14.12.2023

Одобрена рецензентами: 01.02.2024

Принята к печати: 27.03.2024

Об авторах

Станислав Иванович Дорошенко* – кандидат технических наук, начальник лаборатории разработки химических и механических систем АО «НПП «Радар ммс», заслуженный военный специалист Российской Федерации, лауреат Государственной премии им. Г.К. Жукова. Адрес для почтовых отправлений: 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А. E-mail: stasdoroshenko@mail.ru.

Stanislav I. Doroshenko* – PhD in Engineering sciences, head of the Laboratory for the development of chemical and mechanical systems of JSC «Scientific and Production Enterprise «Radar mms», honored military specialist of the Russian Federation, laureate of the State Prize G.K. Zhukov. Postal address: 37, lit. A Novoselkovskaya str., St. Petersburg, 197375. E-mail: stasdoroshenko@mail.ru.

Андрей Сергеевич Иванов – заместитель директора НПК АО «НПП «Радар ммс», Санкт-Петербург.

Andrey S. Ivanov – deputy director of JSC «Scientific and Production Enterprise «Radar mms», St. Petersburg.

Вадим Александрович Малых – инженер-конструктор 1 категории АО «НПП «Радар ммс», Санкт-Петербург.

Vadim A. Malykh – design engineer of the 1st category of JSC «Scientific and Production Enterprise «Radar mms», St. Petersburg.

Павел Андреевич Романенков – начальник отдела АО «НПП «Радар ммс», Санкт-Петербург.

Pavel A. Romanenkov – department head of JSC «Scientific and Production Enterprise «Radar mms», St. Petersburg.

Николай Павлович Михайлов – доктор технических наук, профессор кафедры «Боеприпасы и взрыватели» Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова.

Nikolay P. Mikhailov – Grand PhD in Engineering Sciences, Prof. of the Department of Ammunition and Fuses Baltic State Technical University «VOENMEH» D.F. Ustinov.

Александр Владимирович Скрипка – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой горноспасательного дела и взрывобезопасности ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России», Санкт-Петербург.

Aleksandr V. Skripka – PhD in Engineering sciences, Associate Professor, head Department of Mine Rescue and Explosion Safety Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, St. Petersburg.

Вера Александровна Коршунова – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры горноспасательного дела и взрывобезопасности ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России». Санкт-Петербург.

Vera A. Korshunova – PhD in Geologo and Mineralogical sciences, Associate Professor Department of Mine Rescue and Explosion Safety Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, St. Petersburg.

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

Изображение: commons.wikimedia.org



С.А. ДУШЕНОК, д.т.н., Г.В. СЕМАШКИН, к.т.н.,
В.Д. ВАСИЛЬЕВ, Ю.А. ФРОЛЕНКОВ,
**ФГУП «Специальное конструкторско-
технологическое бюро «Технолог»»**

Аннотация. Рассмотрено применение разрушителей, основанных на действии ударного ядра. Показана возможность использования данных устройств для бездетонационной утилизации взрывоопасных предметов в ходе антитеррористических и антикриминальных мероприятий, а также в целях массовой зачистки местности после локальных войн.

Ключевые слова: УНИЧТОЖЕНИЕ;
ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ; ВЗРЫВООПАСНЫЕ
ПРЕДМЕТЫ; УДАРНОЕ ЯДРО; РАЗРУШИТЕЛЬ.

Для цитирования: Душенок С.А. Технология бездетонационного разрушения взрывоопасных предметов и устройств / Семашкин Г.В., Васильев В.Д., Фроленков Ю.А. // Перспективные технологии для систем безопасности. 2024. № 1 (3). С. 136–142.

S.A. DUSHENOK, Grand PhD in Engineering,
G.V. SEMASHKIN, PhD in Engineering,
V.D. VASILYEV, U.A. FROLENKOV,
**FSUE «Special Construction and Technological
Bureau «Technologist»»**

Abstract. The use of disruptors based on the action of a shock core is considered. The possibility of using these devices for the detonation-free disposal of explosive objects during anti-terrorist and anti-criminal activities, as well as for the purpose of mass cleaning of the area after local wars, is shown.

Keywords: DESTRUCTION; NEUTRALIZATION;
EXPLOSIVE OBJECTS; IMPACT CORE; DESTROYER.

For citation: Dushenok S.A., Semashkin G.V., Vasilyev V.D., Frolenkov U.A. Technology of non-detonation destruction of explosive objects and devices. *Perspektivnyye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti* [Promising technologies for security systems], 2024, N 1 (3), pp. 136–142. (In Russ.).

ТЕХНОЛОГИЯ БЕЗДЕТОНАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРЕДМЕТОВ И УСТРОЙСТВ

TECHNOLOGY OF NON-DETONATION DESTRUCTION OF EXPLOSIVE OBJECTS AND DEVICES

Введение

Проблема обезвреживания взрывоопасных предметов (ВОП) остается актуальной во всем мире. Для осуществления террористических или криминальных взрывов зачастую используются штатные снаряды, ручные гранаты, противопехотные мины и т.д. Кроме боеприпасов (БП), находящихся в настоящее время на вооружении Российской армии, нередко применяется арсенал времен Великой Отечественной войны (рис. 1).

Также остро стоит проблема снижения степени опасности или ликвидации боеприпасов после пожаров или взрывов на складах и пунктах хранения.

Наиболее предпочтительным способом избежать последствий взрыва ВОП является перевозка их в надлежащее место для уничтожения. Однако наличие самодельной системы инициирования, элементов неизвлекаемости в составе взрывателя или его взведение делают транспортировку ВОП невозможной. В этом случае его уничтожение часто производят на месте нахождения при помощи накладного заряда.



Рис. 1. Мины времен Великой Отечественной войны

Применение такого способа имеет ряд существенных ограничений, в случае если ВОП находится в районе жилой застройки или в непосредственной близости от промышленных объектов. Для локализации действия осколков и ударной волны возможно применение защит-

ных экранов и специальных устройств. Последние хорошо себя зарекомендовали для минимизации поражающих факторов множества типов ВОП, но их эффективность резко падает, если приходится иметь дело с артиллерийскими снарядами калибра 100...152 мм.

Таким образом, одним из наиболее перспективных способов приведения ВОП в безопасное состояние является использование разрушителей. Они позволяют дистанционно, исключая непосредственный контакт взрывотехника с неразорвавшимся снарядом, утилизировать его, не инициируя при этом детонацию.

Виды разрушителей ВОП

Для дистанционной ликвидации взрывоопасного объекта как в России, так и за рубежом разработаны различные устройства, в основе действия которых ле-

жит воздействие метательного элемента на ВОП [1]. Для этого могут быть использованы струя воды, металлические поражающие элементы (стержни, шарики и т.д.). Метание элементов устройствами такого рода осуществляется, как правило, либо пороховыми газами, либо с использованием энергии взрывчатого превращения. Однако абсолютное большинство представленных в патентной литературе и используемых на практике разрушителей эффективны для обезвреживания самодельных взрывных устройств, не имеющих прочной оболочки (рис. 2), в то время как у штатных БП толщина корпуса может достигать 30 мм и более.

Известны образцы разрушителей, действие которых основано на применении эффекта кумуляции. Высокая проникающая способность кумулятивной струи обеспечивает деструкцию толстостенного корпуса. Такие разрушители могут



Одним из наиболее перспективных способов приведения ВОП в безопасное состояние является использование разрушителей.

Изображение: фотобанк ЛОРИ

Рис. 2. Традиционные методы уничтожения ВОП



Рис. 3. Один из способов дистанционного метода уничтожения ВОП

применяться для воздействия на штатные артиллерийские и инженерные БП. Широкое их применение сдерживается некоторыми недостатками имеющихся конструкций. Ключевым является то, что последствия воздействия кумулятивной струи на ВОП не всегда приводят к желаемому результату, а именно бездетонационному его разрушению. По литературным данным известно, что примерно в 30% случаев в ВОП образуется отверстие (иногда сквозное), но надлежащего разрушения не происходит, т.е. сохраняется потенциальная опасность взрыва. Но еще менее желательно инициирование в ВОП детонации, что также наблюдается примерно в 30% случаев применения разрушителей, основанных на использовании эффекта кумуляции [2]. Также к недостаткам можно отнести особенности практического применения кумулятивных разрушителей, связанные с необходимостью достаточно точно устанавливать их по отношению к ВОП с тем, чтобы соблю-

ти фокусное расстояние, что не всегда удобно и возможно в полевых условиях.

Таким образом, задача разработки разрушителя, способного дистанционно и с высокой долей вероятности бездетонационно разрушать ВОП, остается актуальной (рис. 3).

Утилизация ВОП с использованием ударного ядра

Сотрудниками ФГУП «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог» предложен разрушитель, в основе действия которого лежит использование ударного ядра. Ударное ядро представляет собой компактный поражающий элемент, образующийся при определенных геометрических характеристиках металлической облицовки и разрывного заряда [3]. Было разработано изделие диаметром 40 мм и общей массой 100 г. Масса взрывчатого вещества (ВВ) составила 35 г, а метаемого элемента – 15 г.

Предпосылками для такого технического решения являются:

скорость метаемого элемента составляет порядка 1700...2100 м/с, что обеспечивает пробитие стальной оболочки ВОП (корпуса боеприпаса) толщиной до 30 мм;

ударное ядро обладает меньшей иницирующей способностью по сравнению с кумулятивной струей;

формирование поражающего элемента (ПЭ) из полусферических и сегментных облицовок, происходящее по деформационному механизму, завершается примерно через 15 мкс после иницирования заряда ВВ и затем ПЭ сохраняет свои баллистические характеристики на расстоянии около 1000 калибров, что позволяет значительно снизить требования по точности установки расстояния между разрушителем и ВОП;

изделия на основе ударного ядра значительно проще в изготовлении, а следовательно, дешевле по сравнению с кумулятивными зарядами.

При выборе конструктивного оформления разрушителя пришлось решать несколько нетипичную задачу. Абсолютное большинство БП как кумулятивных, так и с ударным ядром призваны обеспечить максимальное пробитие преграды и эффективное запреградное действие. В нашем же случае необходимо было осуществить воздействие такой степени, которое, с одной стороны, было бы достаточным для пробития оболочки штатного артиллерийского или инженерного БП, но вместе с тем не вызвало бы иницирования детонации основного заряда или системы иницирования ВОП.

Общий вид разрушителя представлен на рис. 4. Способ его позиционирования по отношению к ВОП – на рис. 5.

Представленная конструкция была испытана на артиллерийских БП калибра: от 85 до 152 мм. На рис. 6 и 7 показан

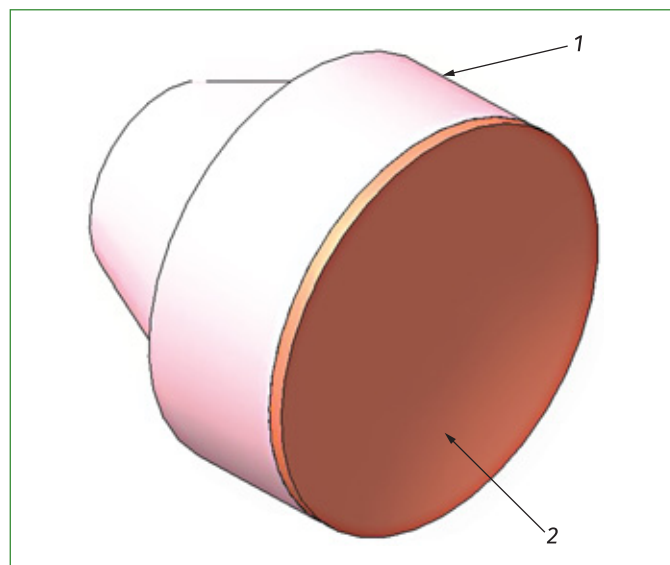


Рис. 4. Общий вид разрушителя (без корпуса и устройства позиционирования):
1 – заряд; 2 – металлическая облицовка



Рис. 5. Расположение разрушителя над 152-мм осколочно-фугасным снарядом

вид 85-мм и 152-мм осколочно-фугасных снарядов после воздействия разрушителя.

Как видно, после срабатывания разрушителя и воздействия метательного элемента на БП последний разбивается на крупные осколки (значительно более крупные, чем при штатном срабатыва-



Рис. 6. 85-мм осколочно-фугасный снаряд после разрушения



Рис. 7. 152-мм осколочно-фугасный снаряд после разрушения

нии). Осколки при этом расположены достаточно локально – основная масса в радиусе двух метров. Кроме того, на том месте, где находился снаряд, видны остатки непрореагировавшего ВВ основно-

го заряда, а также, и это следует отметить особо, взрыватель БП, сохранившийся в целости.

Был проведен ряд исследований, в том числе с применением высокоскоростной съемки, в ходе которых установлено, что после прохождения метательным элементом сквозь стенку корпуса БП в ВВ основного заряда возникает дефлаграция (дозвуковое горение), сопровождаемая ростом давления внутри корпуса. Давление, создаваемое продуктами разложения ВВ, в определенный момент достигает такого значения, что корпус БП раскалывается. Это приводит к мгновенному сбросу давления и дефлаграция не успевает перейти в детонацию.

Конструкция разрушителя была испытана на штатных артиллерийских снарядах калибра 86...152 мм различного типа и снаряжения как со взрывателем, так и без него, а также на БП времен ВОВ.

Опытные образцы изделия хорошо зарекомендовали себя в ходе испытаний при очистке местности после пожаров и взрывов в местах хранения снарядов (Пугачево, Красный Адуй, Ульяновск), а также во время массовой утилизации БП в 2011–2012 гг.

В настоящее время устройство проходит испытания в зоне проведения локальных конфликтов, где основными объектами разрушения являются неразорвавшиеся артиллерийские боеприпасы, а также противотанковые и противопехотные мины.

Вывод

Результаты испытаний подтверждают эффективность разработанной конструкции разрушителей ВОП на основе ударного ядра при применении на артиллерийских снарядах крупного калибра и инженерных БП.

Список литературы

1. *Петренко Е.С.* Разрушители взрывных устройств и других взрывоопасных предметов // Специальная техника. 2002. № 3.
2. *Селиванов В.В., Кобылкин И.Ф., Новиков С.А.* Взрывные технологии. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2008.
3. *Физика взрыва: в 2 т. / под ред. Л.П. Орленко.* 3-е изд., испр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. Т. 1.

References

1. *Petrenko E.S.* Destroyers of explosive devices and other explosive objects. *Spetsial'naiia tekhnika* [Special equipment], N 3, 2002. (In Russ.).
2. *Selivanov V.V., Kobylkin I.F., Novikov S.A.* *Vzryvnye tekhnologii* [Explosive technologies]. Moscow, MG TU im. Bauman Publ., 2008. (In Russ.).
3. *Fizika vzryva: v 2 t.* [Physics of Explosion in 2 vols], ed by. L.P. Orlenko, 3-e izd., ispr, Moscow FIZMATLIT Publ., 2004, Vol. 1. (In Russ.).

Поступила в редакцию: 28.06.2023

Одобрена рецензентами: 18.12.2023

Принята к печати: 27.03.2024

Об авторах

Сергей Адамович Душенок* – доктор технических наук, заместитель директора – главного конструктора по ВЭМ ФГУП «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог». Адрес для почтовых отправок: Россия, 192076, г. Санкт-Петербург, Советский пр., 33-а. E-mail: s.dushenok@mail.ru.

Sergey A. Dushenok* – Grand PhD in Engineering sciences, deputy director – chief designer for VEM, Federal State Unitary Enterprise «Special Construction and Technological Bureau «Technologist». Postal address: 33-a, Sovetsky Ave., St. Petersburg, 192076. E-mail: s.dushenok@mail.ru.

Георгий Владимирович Семашкин – кандидат технических наук, начальник НПК-2 ФГУП «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог».

Georgy V. Semashkin – PhD in Engineering sciences, head of NPK-2 Federal State Unitary Enterprise «Special Construction and Technological Bureau «Technologist».

Валерий Дмитриевич Васильев – начальник отдела 62 НПК-2 ФГУП «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог».

Valery D. Vasiliev – head of department 62 NPK-2 Federal State Unitary Enterprise «Special Construction and Technological Bureau «Technologist».

Юрий Алексеевич Фроленков – ведущий инженер-технолог испытательной лаборатории НПК-2 ФГУП «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог».

Yuri A. Frolenkov – leading process engineer of the NPK-2 testing laboratory Federal State Unitary Enterprise «Special Construction and Technological Bureau «Technologist».

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

ИЗДАНИЯ ФГУП «ЦНИИХМ»

С 2006 г. ФГУП «ЦНИИХМ» организован выпуск изданий по современным направлениям науки и техники, которые пользуются большой популярностью у читателей.

В 2007 г. на собственной полиграфической базе печатаются научно-технические сборники, журналы, дайджесты и другие издания как в интересах института, так и сторонних организаций.



Научно-технические сборники «Боеприпасы» и «Боеприпасы XXI век»

Старейшие печатные издания отечественной отрасли боеприпасов и специальной химии. Публикуются научные статьи по наиболее актуальным проблемам создания новейших средств поражения. Сборник «Боеприпасы XXI век» является официальным печатным органом Минобороны России, входит в Перечень рецензируемых изданий ВАК.

Научно-практический журнал «Перспективные технологии для систем безопасности»

Новый журнал ФГУП «ЦНИИХМ». Выходит с 2023 г. На его страницах публикуются исследования в области искусственного интеллекта, математического и компьютерного моделирования, экспериментального машиностроения, нанотехнологий и т.д. Зарегистрирован в РИНЦ.



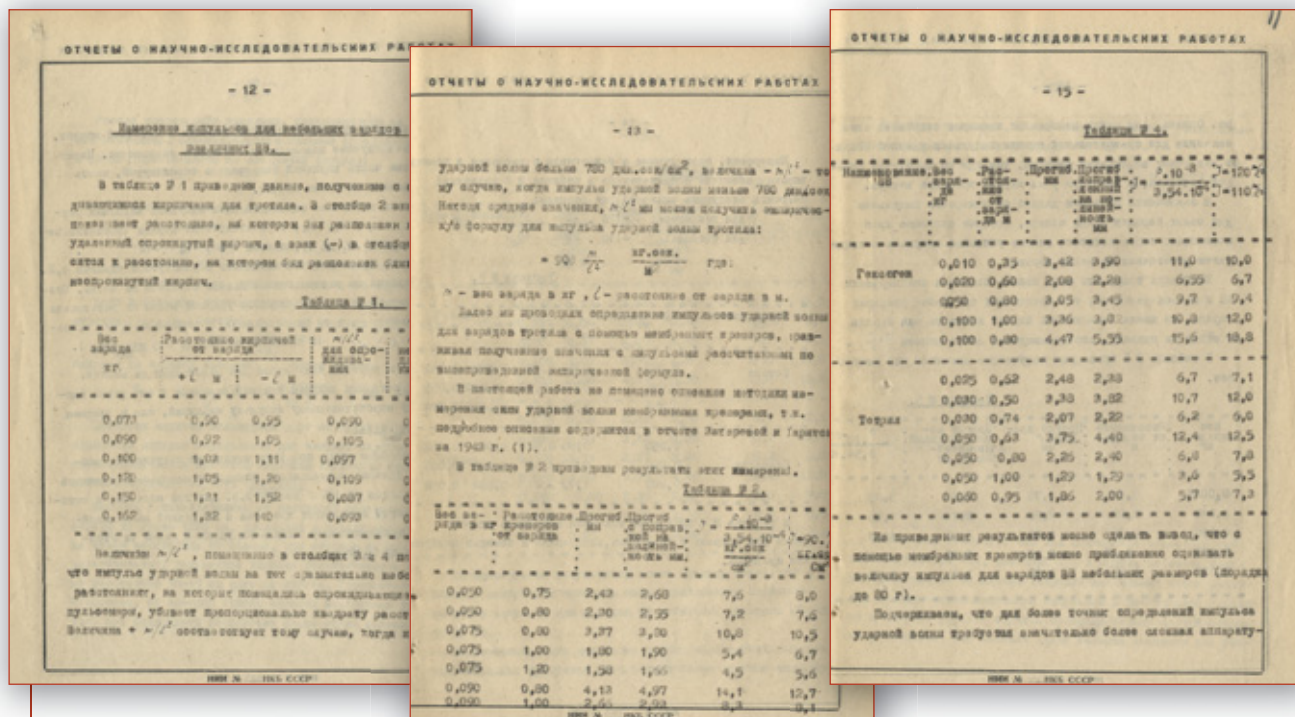
«Дайджест актуальной научно-технической информации»

Материалы издания формируются путем мониторинга более 200 электронных и печатных открытых источников научно-технической информации. Данные, опубликованные в Дайджесте, носят преимущественно оперативно-новостной характер.



НА ВСЕ ИЗДАНИЯ ФГУП «ЦНИИХМ» ОРГАНИЗОВАНА ПОДПИСКА. Тел.: 8 (499) 611-80-84
ПРИГЛАШАЕМ К СОТРУДНИЧЕСТВУ АВТОРОВ. СТАТЬИ ПУБЛИКУЮТСЯ БЕСПЛАТНО.
С ТРЕБОВАНИЯМИ К ПУБЛИКАЦИЯМ МОЖНО ОЗНАКОМИТЬСЯ НА САЙТЕ: www.cniihm.ru
Тел.: 8(499) 616-98-22 E-mail: redaction@cniihm.ru

ПО СЛЕДАМ СЕКРЕТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВЕЛИКОГО УЧЕНОГО

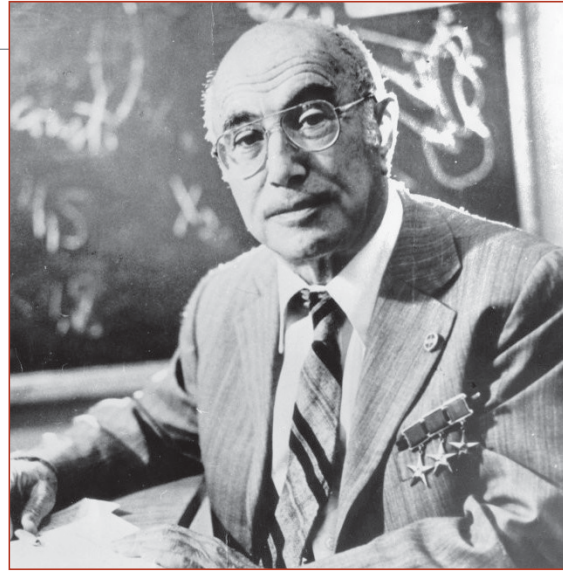


В феврале 2024 г. архивариусы ФГУП «ЦНИИХМ» обнаружили четыре «закрытых» отчета об исследованиях и разработках Юлия Борисовича Харитона, выдающегося ученого, стоявшего у истоков советского атомного проекта. Речь идет о военном периоде работы одного из самых засекреченных людей в СССР. Это событие совпало со 120-летним юбилеем Ю.Б. Харитона. В настоящее время с документов снят гриф и они представлены на суд научно-технической общественности. В частности, в журнале «Горение и взрыв» (2024. Т. 17, № 1. С. 136–140) была опубликована статья «Некоторые сведения о малоизвестном этапе деятельности Ю.Б. Харитона и Я.Б. Зельдовича в рамках совместных работ ИХФ АН СССР и НИИ-6 (ныне ФГУП «ЦНИИХМ») в 1942–1944 годах», авторами которой выступили сотрудники института: С.А. Бобков, Д.Г. Перменов, И.И. Архипов, В.Н. Товчигречко и А.С. Шибанов. Представляем краткий обзор обнародованных материалов.

До войны Институт химической физики (ИХФ) был единственной в стране академической организацией, в которой проводились фундаментальные исследования процессов горения и взрыва. Юлий Борисович Харитон возглавлял лабораторию взрывчатых веществ, Яков Борисович Зельдович – лабораторию горения. Впоследствии оба ученых были привлечены И.В. Курчатовым к советскому Атомному проекту и стали трижды Героями Социалистического Труда и лауреатами многих государственных



Ю.Б. Харитон



Я.Б. Зельдович

премий. И Ю.Б. Харитон, и Я.Б. Зельдович являются руководителями и исполнителями обнаруженных архивных отчетов.

НИИ-6 также был единственной в стране исследовательской организацией, занимающейся созданием и внедрением в промышленность порохов и взрывчатых веществ. В коллективе трудились многие знаменитые ученые: Г.К. Клименко, А.М. Ломова и А.В. Сапожников (теория кумуляции и первый в стране кумулятивный снаряд), Б.П. Фомин (порох и заряд для «Катюши») и многие другие, руководил институтом А.П. Закощиков. НИИ-6 входил в состав Наркомата боеприпасов.

В военное время из всех наркоматов Красной Армии поступали срочные задания на разработку боеприпасов, средств их проектирования и отработки, совершенствование рецептурных и конструктивных решений. Весь перечень совместно решенных тогда задач велик. Из доступных средств информации широкому читателю известны такие совместные работы НИИ-6 и ИХФ, как система «Катюша» (порох и заряд для ракетного двигателя), противотанковая зажигательная бутылка («коктейль Молотова») и т.д. И вот новые рассекреченные материалы. В статье приводится краткое изложение четырех архивных отчетов.

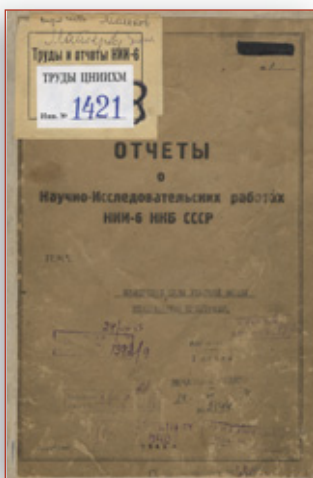


Ведущие научные сотрудники НИИ-6.

*В первом ряду слева направо: М.В. Воротовов, Н.С. Житких;
во втором ряду: И.В. Мильчаков, А.М. Ломова, П.И. Потапов (четвертый);
в третьем ряду: А.Н. Нерченко (первый справа)*

«Измерение силы ударной волны мембранными крешерами»,

Ю.Б. Харитон, Т.В. Захарова, Г.К. Клименко



Для нужд фронта разрабатывались новые взрывчатые вещества (ВВ) как с повышенными параметрами поражающего действия, так и ВВ более дешевые (такие имели, как правило, пониженные характеристики поражающего действия). В 1943 г. перед учеными НИИ-6 и ИХФ была поставлена задача ускорения и удешевления процесса сравнительной оценки ВВ.

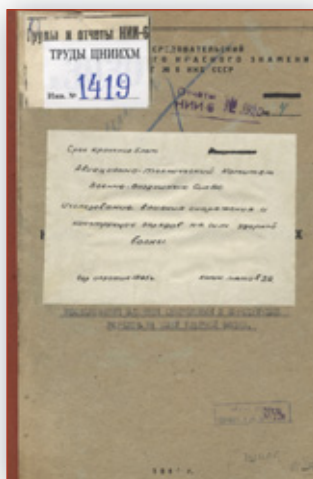
Вот как авторы отчета формулируют эту задачу: *«В связи с таким положением нам представлялось целесообразным провести детальное теоретическое и экспериментальное обследование метода мембранных крешеров с тем, чтобы этот простой метод мог с уверенностью применяться во всех случаях, когда необходима сравнительная оценка силы ударных волн».*

Мембранные крешеры в это время были уже известны, однако точность их показаний была неудовлетворительной.

Ю.Б. Харитон разработал теорию всех физических процессов, происходящих в крешере при воздействии воздушных ударных волн, и определил строгий порядок подбора материалов конструктивных элементов, правила расшифровки показаний и т.д. В НИИ-6 проведено большое количество испытаний и, в итоге, была решена задача удешевления и сокращения времени сравнительных испытаний ВВ и боеприпасов.

«Исследование влияния снаряжения и конструкции зарядов на силу ударной волны»,

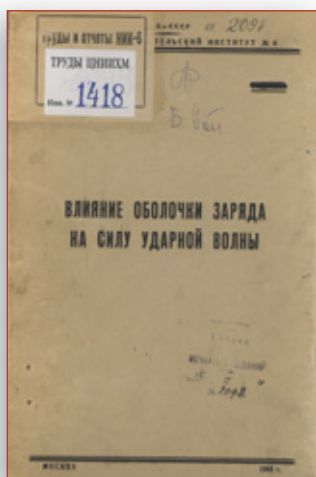
Ю.Б. Харитон, Т.В. Захарова, А.М. Ломова



Работа выполнена по заказу НИИ-6, в 1944 г. отчет утвержден директором НИИ-6 А.П. Закощиковым и принят к практическому использованию главным инженером НИИ-6 Г.К. Клименко. В исследованиях принял непосредственное участие Я.Б. Зельдович.

Учеными, прежде всего, были разработаны правила установки крешеров в полевых условиях. На основе газодинамических представлений о пространственном движении ударных волн и продуктов детонации ВВ в зоне их взаимодействия с крешером конкретизированы условия ориентации мембраны крешера в случае определения интенсивности ударной волны и в случае необходимости замера импульса ударной волны. Точность измерений доведена до 5%. Даны указания по подбору масс испытываемых ВВ для обеспечения точности измерений давления ударной волны или импульса давления.

При проведении массы испытаний тротила и боеприпасов с ним Я.Б. Зельдовичем было объяснено влияние на импульс процесса частичного выделения энергии в стадии распространения продуктов детонации в атмосфере. Ученый указал причину: повышенное содержание горючего в тротиле по отношению к количеству окислителя и, как следствие, окисление «лишнего» горючего кислородом воздуха. Следует отметить, что этот процесс лежит в основе современных, так называемых, боеприпасов объемного взрыва.

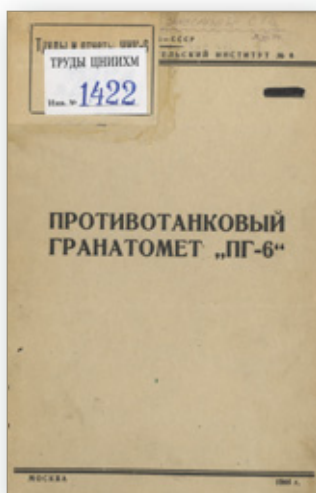
«О влиянии оболочки заряда на силу ударной волны взрыва»,*Ю.Б. Харитон, Т.В. Захарова, А.М. Ломова*

Отчет утвержден директором НИИ-6 А.П. Закощиковым и директором ИХФ АН Н.Н. Семеновым в марте 1944 г. В то время существовало мнение, что прочный корпус фугасных авиационных бомб (ФАБ) усиливает ударную волну по сравнению со взрывом безоболочечного заряда ВВ. Ю.Б. Харитон указал на отсутствие как в отечественных, так и в зарубежных источниках четких доказательств по данному вопросу и выдвинул, исходя из закона сохранения энергии, обоснование об уменьшении импульса ударной волны и ее давления за счет затрат энергии детонации ВВ на разрушение достаточно прочных бомбовых оболочек.

Совместно с НИИ-6 было принято решение доказать новое мнение экспериментально.

Проведено множество экспериментов с варьированием прочности оболочек боеприпасов, марок ВВ, их массы. Благо, что крешеры позволяли удешевить испытания.

В результате показано увеличение импульса ударной волны безоболочечных зарядов. Проведены испытания уже широко применявшейся ФАБ-100, показано увеличение фугасного действия до 40%. Такие результаты и нужны были фронту в тех случаях, когда не требовалось осколочное действие.

«Противотанковый гранатомет ПГ-6»,*И.М. Найман, Я.Б. Зельдович, Л.Б. Иоффе, Н.А. Терлецкий, Ю.Б. Харитон*

В начале 1944 г. заместителем командира наркомата боеприпасов генерал-майором К.С. Гамовым перед НИИ-6 была поставлена задача создания гранатомета для метания противотанковой гранаты РПГ-6 с дальностью – 75...100 м.

Конструкторы института из экономических условий приняли решение о заимствовании основных конструктивных узлов гранатомета (ствол, приклад, прицел и т.д.) из уже производящихся промышленностью (миномет, противотанковое ружье и т.д.).

Ю.Б. Харитон и Я.Б. Зельдович, как талантливые физики, решили задачу о реализации такого режима метания гранаты, чтобы ее взрыватель не срабатывал от перегрузок на начальном этапе («мягкое» метание), но и набор скорости гранаты до выхода из ствола удовлетворял бы требованию по дальности. В результате творческого союза специалистов НИИ-6 и ИХФ АН СССР уже 7 и 8 марта 1944 г. гранатомет испытывался на полигоне НИИ-6 стрельбой по броне.

На рисунке представлены фотографии гранатометов ПГ-6 и ныне действующего СПГ-9. Сходство очевидно.

Стоит отметить, что работы проводились в чрезвычайно трудное военное время. Ученые испытывали нехватку практически во всем, поэтому их поощрение часто сводилось к самым прозаическим вещам. В музее ФГУП «ЦНИИХМ» сохранилась



а



б

Гранатометы ПГ-6 (а) и СПГ-9 (б)

Выписка из Приказа № 58 по Институту химической физики Академии наук СССР от 15.12.1942 г. § 2 – «Отмечая хорошую производственную работу, премировать следующих товарищей:

1. Зельдович Я.Б. – зав. лаб. горения № 2 – шелк 3 м.
2. Эмануэль Н.М. – ученый секретарь – шелк 3 м.
3. Когарко С.М. – ст. научн. сотр. – шелк 3 м.
4. Апин А.Я. – ст. научн. сотр. – шелк 3 м.

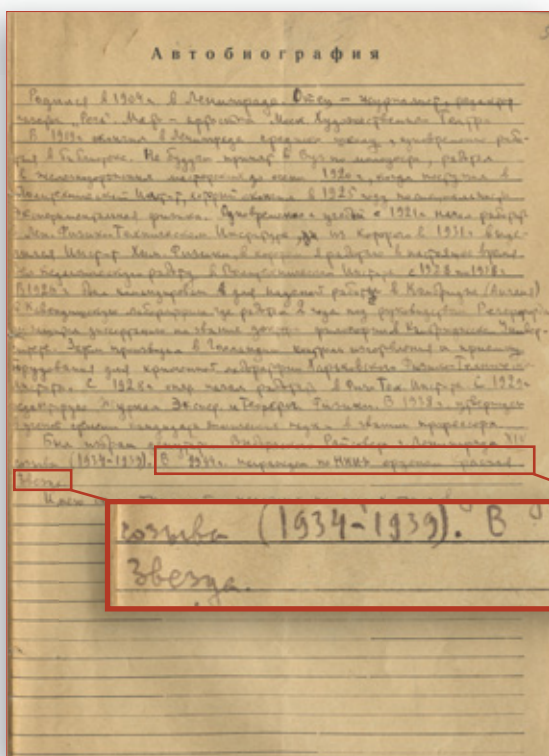
...

12. Ген М.Я. – и.о. ст. научн. сотр. – керосин 6 л.
13. Арсеньева Н.С. – ст. бухгалтер – дрова 2 м³.

14. Рудковский Д.М. – зав. лабораторией – пропуск на доп. питание (ужин)».

В заключение приведем также неизвестный ранее фрагмент автобиографии из личного дела № 3599 Ю.Б. Харитона, в котором его рукой написана фраза: «...награжден по НИИ-6 орденом Красной Звезды».

Представленный здесь материал касается только малой части той огромной и напряженной совместной работы, которая проводилась сотрудниками НИИ-6 и ИХФ АН в тяжелейшие годы Великой Отечественной войны. Уверены, что предание гласности обнаруженных архивных документов послужит достойным дополнением биографий великих деятелей отечественной науки.



Редакция выражает благодарность авторскому коллективу за предоставленные архивные материалы.