



ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ

ISSN:
2949-4575

ДЛЯ
СИСТЕМ

№ 1 (01)

ИЮЛЬ–СЕНТЯБРЬ

2023

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, Е.А. Гришина, верстка и графика
М.И. Руюткина, 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.

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 01.09.2023 г.

Формат 60×90/8

Бумага мелованная
Печать цифровая

Усл. печ. л. 19

Тираж 150 экз.
Заказ № 221

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

СОДЕРЖАНИЕ

От первого лица

Вступительное слово главного редактора С.А. Бобкова 3

К 30-летию создания ГНЦ РФ

Роль государственных научных центров РФ в обеспечении
национальной безопасности страны 4
Е.Н. Каблов

Наностройства и микросистемы

Микроэлектроника России: проблемы разработки
и производства технологичного оборудования 10
М.Г. Бирюков, В.Ю. Киреев, А.А. Ковалев, К.Э. Певчих

Искусственный интеллект

Энергоэффективные аппаратные средства и программные решения
для мобильных стереосистем технического зрения 32
И.В. Шашкин, С.А. Жукова

Математическое и компьютерное моделирование

Аддитивные технологии при производстве современных образцов
вооружения 52
И.В. Егоров, П.А. Щавелев

Энергоустановки летательных аппаратов

Расчет проектных запасов топлива для малого
космического аппарата 70
С.Ю. Улыбышев, С.М. Храмов

Цифровая революция

Цифровые двойники как специализированная система
исходных данных для средств поражения 84
*С.М. Мужичек, М.А. Корзун, Т.М. Борисова, А.А. Иванов,
А.А. Скрынников, А.К. Савенко*

Электронные компоненты

Обоснование проектного облика блока ориентации и навигации
малого космического аппарата 96
В.С. Шильниковский

Методы и средства безопасности

Принцип испытаний объекта, содержащего взрывоопасные элементы,
на защищенность от воздействия электромагнитного поля 104
А.В. Склонин

Технологии двойного назначения

Ударно-волновая резка – инновационный инструмент эффективных
и безопасных взрывных работ 110
С.И. Дорошенко, А.С. Иванов, В.А. Малых

Имитаторы взрывчатых веществ в системе
транспортной безопасности 122
Н.Ю. Илькухин, С.М. Яковлев, Д.В. Бармашова, А.С. Козлов

Образование

«Перспективные технологии для систем безопасности» –
базовая кафедра МФТИ 128
С.А. Бобков, А.А. Дегтярев, С.А. Ульянов, И.В. Шашкин

История

Опыт эвакуации и запуска предприятий оборонно-промышленного
комплекса в годы Великой Отечественной войны 140
В.А. Гуськов



PERSPECTIVES ON TECHNOLOGY FOR SECURITY SYSTEMS

ISSN:
2949-4575

№ 1 (01)
JULY-SEPTEMBER
2023

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, E.A. Grishina, 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. Muzhichek, 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

«Advanced Technologies for Security Systems»
is registered with the Ministry of Press
and information of the Russian Federation.
Registration certificate:
ПН № 0С77-83949 dated September 16, 2022

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 01.09.2023 r.

Format 60×90/8
Paper coated
Digital printing

Conditional printed sheets 39
Circulation of 150 copies
Order № 221

Printed in a printing house of FSUE CRICM:
16A, st. Nagatinskaya, MOSCOW 115487, Russia

CONTENT

From the first person

Introductory speech by the chief Sergey Bobkov 3

By the 30-th anniversary of the SSC RF

The role of the state scientific centers of the RF in ensuring the national
security of the country 4
E.N. Kablov

Nanodevices and microsystems

Microelectronics of Russia: problems of development and production
of technological equipment 10
M.G. Biryukov, V.Yu. Kireev, A.A. Kovalev, K.E. Pevchikh

Artificial intelligence

Energy efficient hardware and software solutions for mobile vision
stereo systems 32
I.V. Shashkin, S.A. Zhukova

Mathematical and computer modeling

Additive technologies in the production of modern weapons 52
I.V. Egorov, P.A. Shchavalev

Aircraft power plants

Calculation of project fuel reserves for small spacecraft 70
S.Yu. Ulybyshev, S.M. Khramov

The digital revolution

Digital doubles as a specialized source data system
for weapons of destruction 84
*S.M. Muzhichek, M.A. Korzun, T.M. Borisova, A.A. Ivanov,
A.A. Skrynnikov, A.K. Savenko*

Electronic components

Substantiation of the design image of the orientation
and navigation block of a small spacecraft 96
V.S. Shilnikov

Methods and means of security

The principle of testing an object containing explosive elements
for protection from the effects of an electromagnetic field 104
A.V. Sklonin

Dual-use technologies

Shock wave cutting – an innovative tool for efficient
and safe blasting operations 110
S.I. Doroshenko, A.A. Ivanov, V.A. Malykh

Limits of explosives in the transport security system 122
N.Yu. Ilkukhin C.M. Yakovlev, D.V. Barmashova, A.S. Kozlov

Education

«Promising technologies for security systems» –
the basic department of MFTI 128
S.A. Bobkov, A.A. Degtyarev, S.A. Ulyanov, I.V. Shashkin

History

Experience of evacuation and facility of dic enterprises during
the second world war 140
V.A. Guskov

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ, КОЛЛЕГИ И АВТОРЫ!



Вы держите в руках первый номер научно-практического журнала «Перспективные технологии для систем безопасности». ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики имени Д.И. Менделеева» на протяжении многих лет выпускает популярные сборники «Боеприпасы» и «Боеприпасы XXI век» открытого и закрытого формата соответственно. Однако сегодня, в условиях непростых политических вызовов и ответных требований высшего руководства страны к осуществлению прорыва в инновационных научно-технических сферах, появилась необходимость в создании новых информационных площадок для профессионального обсуждения вопросов обеспечения всеобщей безопасности.

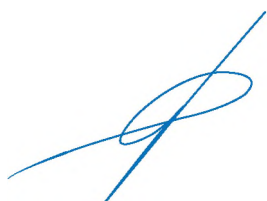
Выходу журнала предшествовала кропотливая работа, связанная с определением концепции издания, его государственной регистрацией, сбором, рецензированием, редактированием и размещением научных публикаций. Перечень рубрик определяют такие современные направления научной мысли, как цифровая революция; искусственный интеллект; роботы и дроны; математическое и компьютерное моделирование; электронные компоненты; наноустройства и микросистемы; экспериментальное машиностроение; безопасность среды обитания и т.д.

Журнал позиционируется на перспективу как периодическое издание, включенное в Российский индекс научного цитирования и перечень рекомендованный ВАК РФ, статьи которого размещаются в Научной электронной библиотеке (eLIBRARY.RU), и выходит четыре раза в год.

Авторами первого номера стали ученые, уже достигшие определенных успехов на научной ниве – доктора и кандидаты наук, сотрудники государственных предприятий и научных центров, преподаватели ведущих вузов страны, эксперты в различных аспектах технической сферы. Всех их объединяют стремление к ученым занятиям и желание донести результаты своих исследований научному сообществу.

Сегодня перед новым журналом стоят амбициозные задачи, направленные на развитие прогрессивной мысли с использованием последних достижений в области инновационных технологий. Надеюсь, что наше издание также станет популярной трибуной для интеллектуальных дискуссий и обмена мнениями по широкому кругу научных и прикладных вопросов.

Выражаю коллективу редакции, редакционной коллегии, авторам публикаций искреннюю признательность за проявленный интерес и активное участие в подготовке первого номера. Приглашаю к сотрудничеству коллег из всех регионов России. Рассчитываю, что с вашей помощью наш журнал займет достойные позиции среди периодических научных изданий, посвященных технологическому развитию современных систем безопасности.



Сергей БОБКОВ,
главный редактор, доктор технических наук,
доцент, действительный член РАРАН

РОЛЬ ГОСУДАРСТВЕННЫХ НАУЧНЫХ ЦЕНТРОВ РФ В ОБЕСПЕЧЕНИИ НАЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СТРАНЫ

Е.Н. КАБЛОВ,

президент Ассоциации государственных научных центров «НАУКА», академик РАН

Летом 2023 г. системе Государственных научных центров Российской Федерации исполнилось 30 лет. Их появление было вызвано тем, что в начале 1990-х гг., в период глубочайшего экономического кризиса, правительству пришлось принимать меры по сохранению наиболее крупных и известных исследовательских организаций, являющихся ядром научного потенциала России. Как показало время, этот шаг полностью себя оправдал.

Сегодня, когда Россия вновь столкнулась с беспрецедентной внешней угрозой и проводит специальную военную операцию в условиях жесточайшего санкционного давления со стороны коллективного Запада, весь научный потенциал должен быть направлен на обеспечение национальной безопасности и технологического суверенитета нашей страны. На заседании Совета по науке и образованию 8 февраля 2023 г., посвященном вопросам реализации стратегических инициатив в научно-технической сфере, Президент России Владимир Путин отметил: «Очевидно, что ни в коем случае нельзя распылять силы и средства, ресурсы. Мы должны фокусироваться на достижении национальных целей развития, учитывать фактор внешнего давления, а значит – предельно внимательно относиться к выбору наших научно-технологических приоритетов.

В первую очередь важно сосредоточиться на технологиях, продукции, которые позволят обеспечить работу здравоохранения, жилищно-коммунального комплекса, энергетики, ключевых отраслей промышленности, сферы безопасности, обеспечить территориальную целостность страны. По этим направлениям у нас должны быть собственные



На фото: Е.Н. Каблов

компетенции, базовые технологии. В столь чувствительных темах мы не можем себе позволить рисков критической зависимости от зарубежных институтов».

Для выполнения этих задач необходимо повышение эффективности научно-технологического комплекса России, отвечающего за инновационное развитие экономики. Инновационная деятельность – это непрерывный процесс получения новых знаний и их практического применения для создания наукоемкой продукции. Процесс этот включает проведение фундаментальных, поисковых и прикладных исследований, разработку технологий, их внедрение в промышленное производство.

Среди научных организаций страны, способных выполнять полный инновационный цикл работ, особо следует выделить государственные научные центры Российской Федерации (ГНЦ РФ) – крупнейшие организации, располагающие уникальным опытно-экспериментальным оборудованием, научными школами и кадрами самой высокой квалификации, чья деятельность получила международное признание.

В свое время введение статуса ГНЦ РФ предполагало государственную селективную поддержку группе наиболее значимых центров, деятельность которых была связана с научно-технологическим обеспечением развития важнейших отраслей промышленности, в том числе оборонно-промышленного комплекса. Данная инициатива была одобрена министром науки, высшей школы и технической политики Борисом Салтыковым. В результате 22 июня 1993 г. вышел Указ Президента России «О государственных научных центрах Российской Федерации», положивший начало истории становления данного статуса, а затем постановление Совета Министров – Правительства Российской Федерации от 25 декабря 1993 г. № 1347 «О первоочередных мерах по обеспечению деятельности государственных научных центров Российской Федерации».

Целью создания ГНЦ РФ было сохранение в Российской Федерации ведущих научных школ мирового уровня, развитие потенциала страны в области фундаментальных и прикладных исследований и подготовки высококвалифицированных кадров. Сегодня, по прошествии 30 лет со дня официального учреждения статуса ГНЦ РФ, можно с уверенностью говорить о том, что эта цель достигнута. Меры государственного регулирования не просто обеспечили поддержку самих организаций, но сконцентрировали бюджетные ресурсы на наиболее важных и перспективных направлениях развития науки. При этом активизировалась инновационная деятельность ГНЦ РФ и существенно возросли объемы внебюджетного финансирования технологических и опытно-конструкторских работ.

Целью создания ГНЦ РФ было сохранение в Российской Федерации ведущих научных школ мирового уровня, развитие потенциала страны в области фундаментальных и прикладных исследований и подготовки высококвалифицированных кадров.



В условиях жесткой конкуренции как на внутреннем, так и на внешнем рынке, каждое изделие должно обладать новым уровнем свойств, позволяющим ему значительно превосходить свою предыдущую версию и отвечать все возрастающим требованиям к функциональным и экологическим свойствам. Для создания конкурентоспособных изделий их разработчики все чаще обращаются не к классическим, а к новым наукоемким технологиям, способным максимально эффективно организовать рабочий процесс и гарантирующим получение изделий с необходимым набором свойств.

В пример можно привести создание в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ первого и единственного в нашей стране полного (замкнутого) цикла аддитивного производства, включающего разработку отечественных материалов, получение металлопорошковых композиций, технологий синтеза, обработки и контроля деталей сложных ответственных изделий для авиации и космоса, разработку технологий и нормативной документации для передачи в производство.

Специалисты института первые в России изготовили по аддитивной технологии с применением отечественной металлопорошковой композиции деталь перспективного авиационного двигателя ПД-14 – завихритель фронтального устройства камеры внутреннего сгорания, это смело можно называть технологическим прорывом в российском двигателестроении.

В настоящее время НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ является стратегическим партнером Объединенной двигателестроительной корпорации по внедрению аддитивных технологий и одним из главных российских разработчиков металли-



На фото: совещание в ВИАМ под руководством заместителя Председателя Правительства РФ Татьяны Голиковой

ческих материалов для 3D-печати. Для одного из приоритетных направлений развития российской авиационной промышленности – самолета Sukhoi Superjet NEW создается двухконтурный турбовентиляторный двигатель ПД-8. В рамках данного проекта в максимально сжатые сроки специалисты НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработали и паспортизовали пять новых литейных жаропрочных сплавов, а также деформируемые сплавы для статорных корпусных деталей турбины и опоры двигателя.

По уровню механических и эксплуатационных свойств материалы НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ превосходят зарубежные аналоги. Серийное производство этих сплавов даст возможность полностью заменить французские двигатели SaM-146 на самолетах SSJ-100. Это один из наглядных примеров получения значимого результата в рамках выполнения программы импортозамещения.

Приоритетными направлениями научно-технической деятельности ГНЦ РФ, обеспечивающими решение экономических и социальных задач, включая вопросы национальной безопасности страны, являются: ядерная физика, атомная наука и техника, химия и новые материалы, опто- и фотоэлектроника, информатика и приборостроение, биотехнологии, вирусология и медико-биологические проблемы, робототехника и машиностроение, транспорт, космос и авиация, судостроение, навигация и акустика, электротехника, металлургия, метеорология, селекция растений.

Особая ответственность с учетом геополитической обстановки сегодня возложена на предприятия оборонно-



Изображение: vniam_vao-mos.info

На фото: здание НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ



Изображение: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

На фото: завихрители камеры сгорания двигателя ПД-14 после аддитивного технологического процесса селективного лазерного сплавления



Изображение: voriginal_mtdata.ru

На фото: авиационный двигатель ПД-14



На фото: здание ФГУП «ЦНИИХМ»



На фото: оптический телескоп

промышленного комплекса – они решают первоочередные задачи по модернизации уже существующих и созданию новых образцов вооружения, военной и специальной техники, причем в крайне сжатые сроки. Что касается государственных научных центров – 26 из них включены в сводный реестр организаций оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации и выполняют государственный оборонный заказ.

К примеру, деятельность ФГУП «ЦНИИХМ», как ГНЦ РФ, направлена на решение отраслевых и межотраслевых проблем модернизации и технологического развития экономики России в инте-

ресах обороны и безопасности государства по таким приоритетным направлениям, как «Индустрия наносистем», «Перспективные виды вооружения военной и специальной техники», «Безопасность и противодействие терроризму».

Институт осуществляет научное прогнозирование развития технологий и техники в сфере обороны и безопасности, разрабатывает программные документы, определяю-

шие главные направления исследовательских опытно-конструкторских и технологических работ. Здесь проводится разработка новых методов и средств контроля (на основе миниатюризации датчиков энергии) взрыво-, искро- и функциональной безопасности при производстве образцов вооружения и военной техники; создаются космические средства контроля, обладающие широкими функциональными возможностями и рядом преимуществ перед используемыми в отечественной промышленности техническими решениями; разрабатываются средства и технологии оценки защищенности значимых объектов критической информационной инфраструктуры, методические рекомендации, политика кибербезопасности и стратегий реагирования на компьютерные инциденты.

Могу также отметить работу Государственного научно-исследовательского института авиационных систем (ГосНИИАС), который является головным научно-исследовательским институтом авиационной отрасли по развитию и совершенствованию методов и средств моделирования, предназначенных для интеграции и отработки бортового оборудования и вооружения авиационных боевых комплексов.

По направлению «Судостроение и транспорт» назову АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор», выполняющий важнейшие задачи в области проведения фундаментальных, прикладных, научно-исследовательских, опытно-конструкторских и других видов работ по созданию систем морского подводного оружия и морской подводной техники.

Невозможно в одной статье рассказать о деятельности всех государственных научных центров, в том числе задействованных в выполнении гособоронзаказа, но не вызывает сомнений тот факт, что их работа успешно продвигается в направлении создания всех необходимых ключевых компетенций, которые обеспечивают обороноспособность нашей страны и ее экономический суверенитет, исключают ее зависимость от технических и технологических решений других стран.



На фото: средства моделирования, разработанные специалистами ГосНИИАС



На фото: музей АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор»

УДК 621.3.049.77(075)

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА РОССИИ: ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

М.Г. БИРЮКОВ, к.т.н., В.Ю. КИРЕЕВ, д.т.н.,
АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения»
А.А. КОВАЛЕВ, к.т.н., К.Э. ПЕВЧИХ,
АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»

Аннотация. На основании анализа возможностей российской промышленности в условиях глобальных санкций показано, что оптимальным вариантом развития отечественного серийного оборудования микроэлектроники являются разработка и изготовление набора вакуумных и атмосферных кластерных комплексов с различными технологическими модулями. Из них должны собираться производственные линейки для изготовления кристаллов интегральных микросхем и микроэлектромеханических систем. Проведена оценка стоимости заводов и мини-фабрик по изготовлению соответствующей продукции в диапазоне 500...65 нм. Сформулированы характеристики технологических процессов и параметры оборудования микроэлектроники, необходимые для реализации серийного производства кристаллов.

Ключевые слова: УРОВЕНЬ ТЕХНОЛОГИИ; КЛАСТЕРНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС; МИКРОСХЕМЫ И МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ; ИЗМЕРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДОПУСКОВ; МИКРОПРОЦЕССОР; СТОИМОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ; МИНИ-ФАБРИКА; ЗАВОД; ПРОИЗВОДСТВО КРИСТАЛЛОВ.

Для цитирования: Бирюков М.Г., Киреев В.Ю., Ковалев А.А., Певчих К.Э. Микроэлектроника России: проблемы разработки и производства технологического оборудования // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 1. С. 10–31.

MICROELECTRONICS OF RUSSIA: PROBLEMS OF DEVELOPMENT AND PRODUCTION OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

M.G. BIRYUKOV, PhD in Engineering, V.Yu. KIREEV, Grand PhD in Engineering,
JSC «Research Institute for Precision Engineering»
A.A. KOVALEV, PhD in Engineering, K.E. PEVCHIKH,
JSC «Zelenograd Nanotechnology Center»

Abstract. Based on the analysis of the capabilities of the Russian industry in the context of global sanctions, in the article is shown that the best option for the development of domestic serial microelectronic equipment is the development and manufacture of a set of vacuum and atmospheric cluster complexes with various technological modules. Production lines for the manufacture of integrated circuit crystals and microelectromechanical systems should be assembled from them. An assessment of the cost of factories and mini-factories for the manufacture of relevant products in the range of 500...65 nm was carried out. The characteristics of technological processes and the parameters of microelectronics equipment necessary for the implementation of mass production of crystals are formulated.

Keywords: TECHNOLOGY LEVEL; CLUSTER TECHNOLOGICAL COMPLEX; MICROCIRCUITS AND MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS; MEASUREMENT OF TECHNOLOGICAL TOLERANCES; MICROPROCESSOR; COST OF EQUIPMENT; MINIFACTORY; FACTORY; CRYSTAL PRODUCTION.

For citation: Biryukov M.G., Kireev V.Yu., Kovalev A.A., Pevchikh K.E. Microelectronics of Russia: problems of development and production of technological equipment // Promising technologies for security systems. 2023. N 1. P. 10–31.

Введение

Необходимость обеспечения безопасности, суверенитета и технико-экономического развития России требует организации отечественного производства основных изделий микроэлектроники. К ним относятся различные классы интегральных микросхем (ИМС) и приборов на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС). Такое производство невозможно без решения важной государственной научно-промышленной задачи – разработки и изготовления отечественного серийного технологического оборудования микроэлектроники. Планы создания такого оборудования и сопутствующих

производств на его основе сформулированы в государственной программе Российской Федерации «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013–2025 годы» и государственной «Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года».

В 2021 г. мировое микроэлектронное производство освоило уровень технологии (УТ), равный (Technology Node – Node – N) 3 нм. УТ определяется минимальным размером L_{\min} получаемых элементов или узлов в самых передовых ИМС [1]. С момента появления передовых технологий в микроэлектронике и вплоть до

В условиях глобальных санкций оптимальный вариант развития отечественного технологического оборудования микроэлектроники – разработка вакуумных и атмосферных кластерных установок для поштучной и групповой обработки пластин.

санкционной «войны» Россия покупала их за рубежом, а также оборудование, комплектующие узлы и системы к нему. В РФ существуют производственные линии для изготовления ИМС с УТ 350 нм (введена в эксплуатацию в ФНЦ НИИСИ РАН в 2003 г.), с УТ 180 нм и с УТ 90 нм (АО «Микрон» созданы соответственно в 2007 и 2012 гг.). Но эти линии (мини-фабрики) оснащены зарубежным технологическим оборудованием и запущены под руководством иностранных специалистов [1–3]. Микропроцессоры «Эльбрус» и «Байкал» (рис. 1, 2), имеющие УТ 28 нм и поставляемые российскими компаниями «МЦСТ» и «Т-Платформы», производились до введения глобальных санкций на тайваньском предприятии TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company) [4].

В таких условиях оставшимся в России научно-исследовательским институтам (НИИ), занимающимся разработкой технологического оборудования микроэлектроники, пришлось взять на себя функции по изготовлению, наладке, испытанию и обслуживанию опытных образцов и партий отечественных установок. Последние необходимы для замены парка советского оборудования, реализующего микроэлектронные изделия с УТ 800 нм [2], а также для дооснащения центров коллективного пользования (ЦКП) и предприятий, которые по финан-

совым или организационным причинам не смогли закупить полные комплекты импортного оборудования.

За последние 30 лет до начала введения глобальных санкций в 2022 г. в НИИ было разработано и реализовано множество опытных образцов и партий различного технологического оборудования [5, 6]. Однако при их изготовлении в основном использовалась импортная комплектация различных компаний-производителей с учетом минимальной стоимости на момент производства установок. Более того, комплектация постоянно менялась. В результате чертежи, схемы управления и параметры похожего российского технологического оборудования были всегда разными, что не позволило запустить его в серийное производство, а, следовательно, уменьшило производимые объемы выпуска, процент выхода годных и надежность отечественных микроэлектронных изделий.

После того как Евросоюз запретил поставки в РФ технологий и материалов для производства микросхем, в частности, кремния – основного из полупроводников, альтернативным поставщиком стали называть Китай. Однако надежды на партнерство с КНР в сфере развития отечественного технологического оборудования и технологий производства кристаллов ИМС в настоящее время являются весьма слабыми.

Эта страна производит всего 2,8% от мирового объема технологического оборудования для изготовления кристаллов ИМС и совсем не делает своих фотолитографических систем [7]. Лучшая китайская фабрика HLMC (Shanghai Huali Microelectronics Corporation) производит кристаллы ИМС с максимальным УТ 32...28 нм и работает на американском, японском и западноевропейском технологическом оборудовании [3, 7].

Кроме того, в себестоимости китайских кристаллов микросхем, например, микропроцессоров, с УТ в диапазоне 65...28 нм свыше 70% составляет стоимость лицензий за использование запатентованных американских, японских, тайваньских и корейских разработок и лишь остальное – само изделие. Высокосовершенные кристаллы центральных микропроцессоров (CPU – central processing unit) по топологическим нормам 16 нм и заказные микросхемы искусственного интеллекта (AI ASIC) по топологическим нормам 7 нм Китаю поставляет тайваньская фабрика TSMC [7]. Поэтому с марта 2022 г. снизился и экспорт китайских технологий и материалов в Россию, так как Пекин не намерен нарушать правила поставок из-за опасений перед ответными санкциями США, которые могут ограничить продажи технологий китайским компаниям [8].

Таким образом возникает важнейший вопрос: «Как российской микроэлектронике оптимально по срокам и затратам без помощи иностранных компаний (то есть на своем оборудовании, имея в распоряжении только отечественные технологии, топологии и материалы) самостоятельно перескочить несколько неосвоенных технологических уровней при производстве ИМС?».

Целью настоящей статьи является анализ существующих проблем, поиск условий и путей решения этой задачи в условиях введения против России глобальных рестрикций США и их сателлитами во всем мире.

Алгоритм создания отечественного оборудования микроэлектроники

Как отмечается в выводах работ [2, 9, 10], выход годных кристаллов ИМС для зрелого отлаженного производства в



Изображение: rossaprimavera.ru

Рис. 1. Микропроцессор «Эльбрус»



Изображение: rtechcraftools.ru

Рис. 2. Микропроцессор «Байкал»

основном определяется плотностью вносимой обслуживающим персоналом атмосферы, оборудованием, процессами и реагентами электрически значимых случайных дефектов в виде нежелательных частиц с размером, большим или равным

критическому размеру ($d \geq d_{cr}$), которые вызывают потери (брак) кристаллов. Критический размер d_{cr} губительных дефектов связан с минимальным размером L_{min} получаемых элементов ИМС, как показано в табл. 1 [2, 10, 11, 12].

Как известно, производство кристаллов ИМС и МЭМС осуществляется в специальных чистых помещениях (cleanroom), называемых гермозонами [2, 9]. В них конструктивно-строительным решением и применением специальных технических средств обеспечиваются требуемый класс чистоты и заданные параметры микроклимата (температуры, влажности и скорости воздушного потока).

Класс чистоты (cleanroom class) – это характеристика степени запыленности чистого помещения, то есть концентрации взвешенных в воздухе чистого помещения аэрозольных частиц различного размера в диапазоне 0,1...5,0 мкм. Характеристики классов чистоты помещений определяются либо по американскому стандарту FS 209E, либо по международному стандарту ISO 14644-1 или соответствующему российскому стандарту ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017 [2, 13]. Классификация по стандарту ИСО (ISO) связана с классификацией по стандарту FS 209E следующим образом: класс 3 по ИСО соответствует классу 1 по FS 209E; класс 4 – классу 10; класс 5 – классу 100; класс 6 – классу 1000 и т.д.

Для транспортировки кассет с кремниевыми пластинами между технологическими и контрольно-измерительными установками может быть использована

Таблица 1

Зависимость размера губительных дефектов d_{cr} от минимального размера элементов L_{min} в ИМС

L_{min} , мкм	d_{cr}
3,0...1,2	$0,15L_{min}$
1,0...0,8	$0,2L_{min}$
0,7...0,6	$0,3L_{min}$
0,5...0,35	$0,4L_{min}$
0,25 и меньше	$0,5L_{min}$

обычная транспортная тара (коробки). При этом класс чистоты гермозоны для производства кристаллов ИМС и МЭМС с минимальными размерами элементов L_{min} в субмикронном диапазоне должен быть не менее 100 (5 ИСО), а для кристаллов с L_{min} в субнанометровом диапазоне не менее 10 (4 ИСО). Обеспечение таких высоких классов чистоты в помещениях большой площади очень дорого из-за стоимости и частой смены сверхтонких фильтров, а также комбинезонов, перчаток и масок обслуживающего персонала.

Неслучайно в современных кристалльных производствах стараются максимально исключить влияние человека на обрабатываемые пластины. Этого добиваются за счет автоматизации операций загрузки, выгрузки, перегрузки и ориентации пластин, а также снижения влияния атмосферы гермозоны за счет использования специальных контейнеров – микроклиматических кабин и кластерного обслуживания (кластерных технологических комплексов (КТК)).

В современных кристалльных производствах стараются максимально исключить влияние человека на обрабатываемые пластины. Этого добиваются за счет автоматизации операций, а также снижения влияния атмосферы.

Для транспортировки кремневых пластин диаметром до 200 мм включительно используются СМДФ-контейнеры, а для пластин диаметром 300 мм – ФОУП-контейнеры. В них поддерживаются классы чистоты 2 ИСО для изделий с элементами L_{\min} в субмикронном диапазоне и 1 ИСО для изделий с L_{\min} в субнанометровом диапазоне, а технологическое и контрольно-измерительное оборудование оснащается мини климатическими кабинами с такими же классами чистоты. В мини климатических кабинах производится открытие СМДФ- или ФОУП-контейнеров, ориентация пластин и их автоматическая поштучная или кассетная загрузка/выгрузка в шлюзовые камеры вакуумного оборудования или чистые зоны атмосферного оборудования с помощью робота-манипулятора.

Для уменьшения количества контейнеров, мини климатических кабин и операций загрузки/выгрузки пластин в шлюзовые камеры вакуумных установок или чистые зоны атмосферных установок и обратно применяется оборудование КТК (рис. 3) [14–19].

КТК обязательно имеет в своем составе камеру загрузки/выгрузки пластин (загрузочную камеру), транспортный модуль и пристыкованные к нему технологические модули, причем все камеры и модули соединены через интерфейсы с помощью транспортной системы пластин, аппаратуры и системы связи для выполнения последовательных технологических операций в кристалльном производстве [15].

Разновидности оборудования КТК [17]: вакуумное или атмосферное (проведение операций жидкостной химической обработки или фотолитографии);

с поштучной или групповой (в кассете) обработкой пластин (химическая обработка, окисление или отжиг пластин);

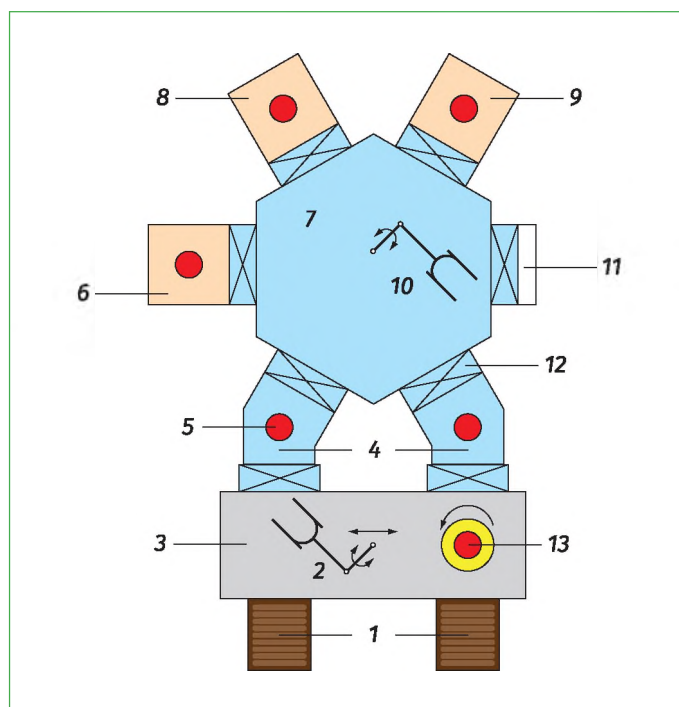


Рис. 3. Схема вакуумной кластерной установки (вакуумного КТК) поштучной обработки пластин с атмосферной мини климатической кабиной, двумя камерами загрузки/выгрузки пластин, одним транспортным модулем с радиальным роботом перегрузки пластин и тремя технологическими модулями: 1 – открыватели СМДФ- или ФОУП-контейнеров; 2 – робот загрузки/выгрузки пластин; 3 – атмосферная мини климатическая кабина с классом чистоты ISO 1–2 или EFEM – equipment front-end module; 4 – камера загрузки/выгрузки пластин; 5 – пластина; 6 – технологический модуль 1 (ТМ-1); 7 – транспортный модуль; 8 – ТМ-2; 9 – ТМ-3; 10 – робот перегрузки пластин; 11 – свободная позиция для присоединения технологического модуля (ТМ-4); 12 – вакуумный затвор; 13 – ориентир пластин

с одной или несколькими загрузочными камерами;

с одним или двумя транспортными модулями, к каждому из которых может быть пристыковано от двух до шести технологических модулей.

В настоящее время существуют три конфигурации – радиальная, линейная и гибридная – как самого кластерного оборудования, так и производственных линий на его основе – многокластерных

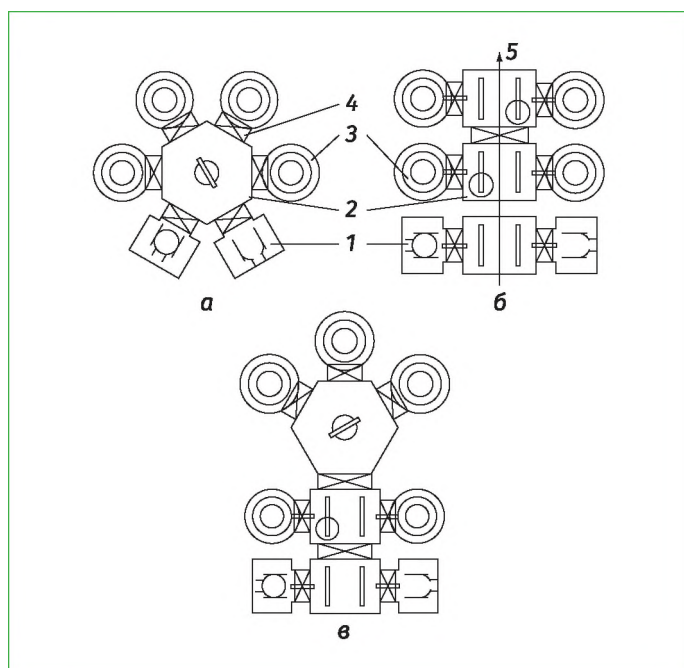


Рис. 4. Конфигурации кластерного оборудования КТК: а – радиальная; б – линейная; в – гибридная; 1 – камеры загрузки/выгрузки пластин; 2 – транспортные модули; 3 – технологические модули; 4 – вакуумный затвор; 5 – направление движения пластин

технологических комплексов (МТК). Конфигурации определяются конструкциями роботов перегрузки пластин или кассет с пластинами в процессе их обработки как внутри кластерных установок, так и между ними (рис. 4 и 5) [15, 18, 19].

Использование кластерного оборудования совместно со СМИФ- или ФОУП-контейнерами и мини климатическими кабинами позволяет реализовать целый ряд преимуществ, основными из которых являются [14, 19]:

- возможность объединения нескольких технологических операций в одной установке, и, тем самым, повышение выхода годных кристаллов ИМС и МЭМС;

- возможность наращивания кластеров для проведения законченных технологических микроциклов, например, для формирования маски или системы металлизации;

- снижение в несколько раз затрат на чистые производственные помещения за счет уменьшения требований к классу их чистоты, а также классу чистоты одежды обслуживающего персонала;

- уменьшение затрат при модернизации оборудования за счет использования имеющихся транспортных модулей, загрузочных камер, систем загрузки/выгрузки, перегрузки и ориентирования пластин;

- гибкость при переходе к новым технологическим процессам за счет изменения состава кластера;

- обеспечение требований по необходимому уровню привносимой дефектности проводимых операций за счет разделения технологических сред и транспортировки изделий в вакууме или атмосфере с высоким классом чистоты;

- интегрирование в одном кластере модулей, разработанных разными производителями;

- обеспечение гибкости и простоты модернизации кластерных систем за счет использования стандартных механических и информационных интерфейсов, модульного принципа построения газовых и вакуумных систем.

Как показано в работе [14], использование кластерного оборудования совместно с СМИФ- или ФОУП-контейнерами и мини климатическими кабинами по сравнению с гермозоной с классом чистоты 10 (4 ИСО), оснащенной обычным оборудованием и транспортной тарой кассет с пластинами, позволяет в три раза увеличить выход кристаллов ДОЗУ (динамическое оперативное запоминающее устройство) с субмикронными топологическими нормами.

Повышение производительности в производственных линиях на основе МТК обеспечивается путем оптимизации конфигурации кластерных установок за счет

использования нескольких идентичных технологических модулей на трудоемких операциях, выравнивания времени процессов и требований по вакууму, а также сокращения времени межкластерных переходов.

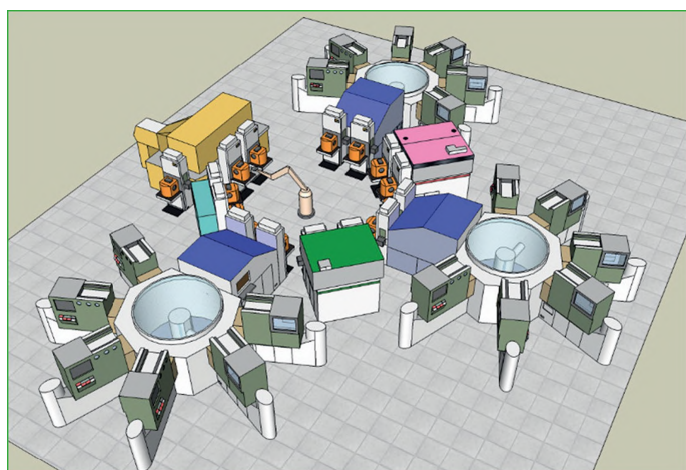
Таким образом, в условиях глобальных санкций оптимальным вариантом развития отечественного серийного технологического оборудования микроэлектроники является разработка вакуумных и атмосферных кластерных установок для поштучной и групповой обработки пластин диаметром 100...150 мм и пластин диаметром 200...300 мм. При этом настройка установок на требуемые диаметры пластин осуществляется путем изменения размеров захватов роботозагрузчиков и перегрузчиков пластин и кассет с пластинами. Всего потребуется по четыре вида надежных вакуумных и атмосферных кластерных технологических комплексов.

При этом необходимо предварительно обеспечить серийное производство в России основных функциональных систем, агрегатов, узлов и деталей кластерного технологического оборудования, включающих:

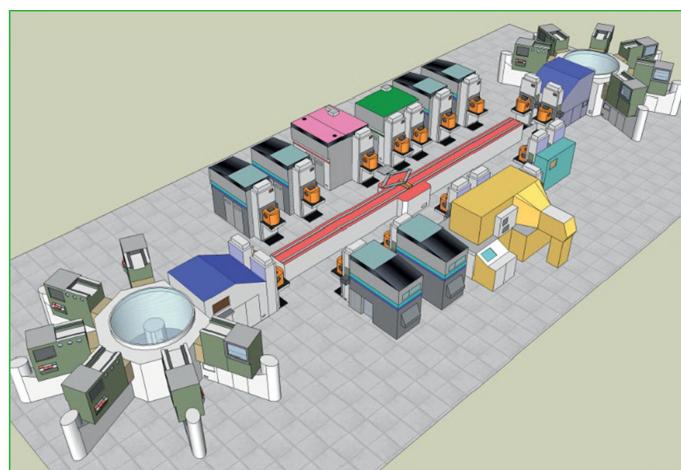
мини климатические кабины с классом чистоты 2 ИСО и 1 ИСО, в которых устанавливаются автоматические открыватели СМIF- или ФOУП-контейнеров, робот-загрузчик пластин из контейнеров в загрузочную камеру кластерной установки и обратно, а также ориентатор пластин перед их загрузкой;

вакуумные и атмосферные камеры загрузки/выгрузки обрабатываемых пластин из контейнеров в кластерную установку и обратно. Они имеют свою вакуумную систему и систему напуска газа (воздуха). Количество камер загрузки/выгрузки в кластерном оборудовании может быть от одной до четырех, в зависимости от производительности и количества технологических модулей;

вакуумные и атмосферные транспортные модули с роботами-манипуляторами, транспортирующие обрабатываемые пластины из загрузочных камер в технологические (процессные) модули, между процессными модулями и из процессных модулей в камеры выгрузки обработанных пластин в СМIF- или ФOУП-контейнеры. Вакуумные транспортные модули имеют свою вакуумную систему и систему напуска газа (воздуха);



а



б

Рис. 5. Радиальная (а) и линейная (б) производственные линии кристаллов ИМС и МЭМС на основе МТК

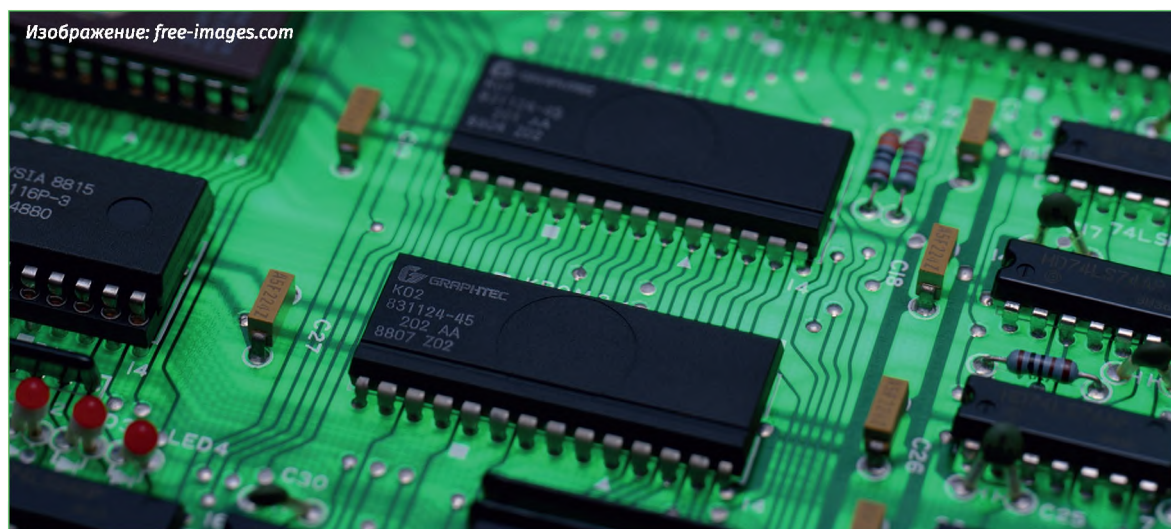


Рис. 6. Интегральная микросхема

технологические или процессные модули, в которых производятся технологические операции нанесения и обработки функциональных слоев (ФС) при изготовлении ИМС (рис. 6). Количество технологических модулей в кластерном оборудовании может быть от двух до шести;

реакторы (системы нанесения, травления и обработки ФС), расположенные в технологических модулях, служащие для проведения процессов нанесения, травления и обработки ФС на пластине. Они состоят из рабочих камер и расположенных внутри них или присоединенных к ним снаружи рабочих столиков (подложкодержателей), экранов, электродов, элементов прижима пластин к подложкодержателям, нагревательных элементов и автономных плазменных источников;

газовые системы, расположенные в технологических модулях и служащие для подачи требуемых потоков (или порций потоков) газов, паров или жидкостей в рабочие камеры и автономные плазменные источники, их распределения в пространстве и во времени. Такие системы представляют собой несколько

линий, в состав которых входят фильтры, трубки, испарители, вентили, клапаны, измерители и регуляторы расхода газов и жидкостей, коллекторы и стабилизаторы давления газов и паров;

вакуумные системы, расположенные в технологических модулях и служащие для обеспечения требуемых остаточных и рабочих давлений, а также скоростей откачки или отвода поступающих реагентов и продуктов реакций из реакторов и автономных плазменных источников. Они включают: откачные (отводные) коллекторы или отверстия, трубы, клапаны, заслонки, измерители и регуляторы давлений и скоростей откачки, ловушки, фильтры, механические и турбомолекулярные вакуумные насосы, скрубберы или нейтрализаторы выхлопных газов;

системы возбуждения и поддержания плазмы разряда в реакторах и автономных источниках при проведении плазменных процессов обработки пластин и автоматической очистки элементов реакторов, состоящие из ВЧ или СВЧ-генераторов и источников электрических и магнитных полей, согласующих устройств, кабелей или волноводов, измерителей

и регуляторов подводимых мощностей и напряжений;

системы механического, вакуумного и электростатического прижима обрабатываемых пластин к подложкодержателям;

системы термостатирования электродов, стенок камер, подложкодержателей, испарителей жидких реагентов, участков газовых линий и откачных магистралей, служащие для измерения, регулирования и стабилизации их температуры и состоящие из нагревателей, термостатов («чиллеров»), труб, емкостей хладагентов, устройств их перекачки, подачи и распределения, измерителей и регуляторов температуры;

системы контроля окончания процессов обработки ФС (времени обработки), состоящие из датчиков сигналов на основе оптического эмиссионно-спектрального, лазерного интерферометрического или масс-спектрометрического методов, оптических и электронных устройств, а также специализированных программно-аппаратных вычислительных комплексов для обработки полученных сигналов по требуемому алгоритму;

системы управления, контроля режимов и исправности всех перечисленных выше устройств, состоящие из группы компьютеров с программным обеспечением, клавиатур ввода команд, дисплеев и устройств записи, хранения и передачи информации по локальным и глобальным компьютерным сетям.

Кроме того, следует разработать технологии и изготовить отечественные серийные установки для формирования высококачественных электрохимических, окисных и керамических функциональных покрытий на внутренних элементах технологического оборудования микроэлектроники. А также восстановить и модернизировать инфраструктуру для получения отечественных особо чис-

тых газовых и жидких реагентов, материалов и комплектующих, используемых в технологических процессах микроэлектроники.

Еще одним важным аспектом является оснащения всех систем, узлов, агрегатов и деталей технологического оборудования микроэлектроники установками их очистки и вакуумной упаковки в чистых зонах, а предприятий изготовителей оборудования чистыми помещениями для сборки и испытаний технологических установок. Чистые зоны и помещения должны иметь класс чистоты не ниже 1000 (6 ИСО).

Также необходимо разработать отечественные системы автоматического проектирования (САПР) топологии кристаллов ИМС и фотошаблонов, а кроме того отечественное программное обеспечение (ПО) для тестирования и программирования российских микроэлектронных изделий.

Только после освоения серийного российского и российско-белорусского производства указанных систем, узлов, агрегатов, деталей, покрытий, реагентов, материалов и комплектующих, а также создания российских САПР и ПО, можно приступить к производству серийного отечественного кластерного технологического оборудования для производства кристаллов ИМС. В противном случае в нем будут присутствовать зарубежные комплектующие, поставкой и номенклатурой которых российские машиностроительные предприятия не смогут управлять.

Заводы и мини-фабрики

для производства ИМС: цена вопроса

Для эффективного функционирования ряда производств, систем контроля и управления технологическими процессами, финансовыми потоками и комплек-

Таблица 2

Соотношение финансовых, временных и иных затрат заводов и мини-фабрик для различных УТ (состояние на 2022 г.)

Характеристика	Уровень технологии, нм						
	500	350	250	180	130	90	65
1	2	3	4	5	6	7	8
Год введения УТ в массовое производство	1992	1994	1997	1999	2001	2004	2007
Средняя стоимость, млн долларов: завода для производства изделия с месячным запуском 25000 пластин (далее завод); мини-фабрики для производства изделия с месячным запуском 250 пластин (далее мини-фабрика)	800 80	1050 100	1600 125	2010 150	2680 182	4020 241	6030 322
Средняя стоимость основного производственного (процессного и контрольно-измерительного) оборудования, млн долларов: завод; мини-фабрика	600 60	800 72	1200 95	1510 114	2010 137	3015 181	4522 241
Средняя стоимость зданий, помещений и вспомогательного оборудования инфраструктуры, млн долларов: завод; мини-фабрика	120 12	161 15	241 19	302 23	402 27	603 36	905 48
Средняя стоимость инсталляции и квалификации основного производственного оборудования, млн долларов: завод; мини-фабрика	48 6,0	64 6,2	84 6,7	105 6,9	161 9,7	241 14,8	322 16,9
Средняя стоимость оборудования для хранения, транспортировки и перегрузки пластин и фотошаблонов, млн долларов: завод; мини-фабрика	16 1,6	21 1,9	36 2,7	48 4,0	54 4,6	80 4,8	161 8,0
Средняя стоимость информационной системы управления и контроля производственным процессом, млн долларов: завод; мини-фабрика	16 1,1	21 1,5	40 2,7	48 3,9	54 4,6	80 4,8	121 7,2
Среднее время от начала строительства до запуска первой партии, месяцы: завод; мини-фабрика	25 12	23 11	21 10	18 9,0	15 8,0	13,5 7,5	12 7,0
Среднее время, затрачиваемое на обработку обычной партии по одному литографическому циклу, дни: завод; мини-фабрика	1,90 0,50	1,85 0,47	1,80 0,44	1,75 0,41	1,70 0,38	1,60 0,35	1,50 0,32
Средняя длительность цикла изготовления микропроцессоров (МП), дни: завод; мини-фабрика	34,2 9,0	38,9 9,9	39,6 9,7	40,3 9,5	42,5 9,5	49,6 10,9	49,5 10,6
Средняя выработка (производительность труда) операторского персонала, количество сформированных литографических слоев на пластинах в день на человека: завод; мини-фабрика	33 30	37 33	41 36	45 39	50 42	55 46	61 50

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8
Среднее отношение используемых не производственных пластин к производственным пластинам, %: завод; мини-фабрика	20	18	17	15	12	10	7,0
	40	38	35	32	29	26	23
Класс чистых производственных помещений, согласно ISO14644: завод; мини-фабрика	3...5	3...5	3...5	3...5	3...5	5...6	5...6
	5...6	5...6	5...6	5...6	5...6	6...7	6...7

сами обработки информации требуется высоконадежная и эффективная микроэлектронная аппаратура. Ее стабильное функционирование на протяжении десятков лет, возможность осуществления в течение всего срока регламентных и ремонтных работ, модернизации аппаратуры без существенного изменения программного обеспечения являются основным условием обеспечения безопасности страны.

Потребность в микросхемах для таких сфер, как железнодорожный, авиационный и морской транспорт, нефтегазовая отрасль, химическое производство и производство спецтехники, электростанции, в особенности атомные, финансовый сектор составляет десятки, а по некоторым данным сотни тысяч штук в год [1].

Учитывая быстрое развитие мировой микроэлектроники, приводящее к смене базовых микросхем вычислительных узлов каждые три года, обеспечить отечественную промышленность такими объемами импортных ИМС, особенно в условиях глобальных санкций, на протяжении всего срока эксплуатации аппаратуры практически невозможно.

Поэтому наиболее эффективным подходом к развитию микроэлектроники в России является создание не больших заводов для массового производства кристаллов ИМС и МЭМС узкой номенклатуры, а мини-фабрик (минифабов,

производственных линеек) для мелкосерийного производства кристаллов микросхем широкой номенклатуры. Стоимость таких мини-фабрик значительно ниже, чем заводов (табл. 2), и они окупаются не за счет массового выпуска ИМС, а за счет высокой цены на оперативно разрабатываемые и выпускаемые специализированные микроэлектронные изделия для важнейших объектов, обеспечивающих решение задач государственной безопасности [2].

Основные данные для табл. 2 были получены в 2007 г. За это время покупательная способность доллара США снизилась в 1,34 раза [20]. Поэтому все стоимостные характеристики пересчитаны с учетом этого коэффициента.

Завод производит большие объемы кристаллов микросхем малой номенклатуры (high volume/low mix factory), обычно не более двух-трех типов, и имеет соответственно столько же базовых технологических процессов (маршрутов). Количество пластин в партии составляет не менее 25 штук, и они располагаются в одном носителе (кассете). Узким местом по производительности являются установки проекционной фотолитографии (степперы), так как литография после жидкостной химической обработки является наиболее частой операцией в любом технологическом маршруте. При производительности степпера в 90 пластин/ч,



На фото: рабочее место на мини-фабрике

18 литографиях в технологическом маршруте, 672 рабочих часах в месяц, коэффициентах готовности и использования степпера соответственно 0,92 и 0,8, для обработки 25000 пластин в месяц требуется как минимум 10 степперов.

Следует напомнить [21], что коэффициент использования (utilize) оборудования определяется по формуле:

$$k_u = t_T / t_{cal} \quad (1)$$

где t_{cal} – календарное время работы участка, на котором находится оборудование; t_T – технологически заданное время обработки пластин на оборудовании в сутки. Значение k_u характеризует длительность регламентной подготовки оборудования к проведению технологических операций обработки пластин.

Коэффициент готовности (ready) оборудования определяется соотношением:

$$k_r = t_w / t_T \quad (2)$$

где t_w – время безотказной работы (uptime) оборудования в течение технологически заданного времени. Значение k_r характеризует ремонтоспособность оборудования, то есть в течение технологически заданного времени работы установки допустим ее ремонт не более $t_T (1 - k_r)$.

Мини-фабрика производит малые объемы кристаллов микросхем большой номенклатуры (low volume/high mix factory), обычно до 50 типов, имеет не менее 10 базовых технологических процессов (маршрутов). Количество пластин в партии составляет 1–10 штук, и они располагаются в одном носителе (кассете), который помещается в специальных СМИФ- или ФОУП-контейнерах с высоким классом чистоты.

На подавляющем большинстве технологических операций используется индивидуальная (поштучная) обработка пластин. В случае использования степпера и установки жидкостной химии с поштучной обработкой пластин узким местом в маршрутах по производительности становится жидкостная химическая обработка.

Большая номенклатура изделий и маршрутов для мини-фабрики по сравнению с заводом увеличивает процент использования непроизводственных пластин, к которым относятся тестовые, калибровочные и балластные (dummy) пластины, пластины-спутники (monitor blank wafers) и, следовательно, уменьшает среднюю выработку операторского персонала.

Площадь чистых помещений завода или мини-фабрики в среднем составляет 17% и для сокращения времени возведения и запуска подобного предприятия в настоящее время используется модульный принцип строительства и инсталляции оборудования. Требования к классу чистых помещений постепенно снижаются по мере расширения исполь-

зования СМIF- и ФOУП-контейнеров, мини-камер и мини-модулей с высоким классом чистоты для хранения, транспортировки, переукладки, загрузки и обработки пластин.

Для повышения коэффициентов готовности и использования производственного оборудования с каждым уровнем технологии, а также ускорения и удешевления выхода завода или мини-фабрики на требуемые значения годных изделий используется сложная информационная система управления и контроля производственным процессом (factory information and control system – FICS).

Измерение технологических допусков и определение относительных ошибок

Выход годных кристаллов, объем выпуска и себестоимость ИМС с заданным уровнем технологии (УТ) связаны с поддержанием в требуемых диапазонах (технологических допусках) определенного набора параметров, характеристик и показателей технологического оборудо-

вания, операций и структур, используемых в процессе (маршруте) производства микросхем. Этот набор включает [2]:

1. Конструкционно-технологические параметры оборудования, к которым относятся операционная и технологическая производительность установок, среднее время их наработки на отказ, коэффициенты использования и готовности, средние квадратические ошибки или точности измерения операционных параметров датчиками, плотность привносимой установками дефектности без проведения в ней технологической операции.

2. Технологические характеристики операций по скорости, равномерности, селективности и анизотропии обработки, а также по коэффициенту загрузки, учитывающему влияние площади обрабатываемой поверхности и топологического рельефа.

3. Параметры входных структур (поступающих на операции) – топология и рельеф слоев.

4. Экономические показатели оборудования и операций, демонстрирующие расходы энергоносителей, реагентов и

Изображение: www.zelao.ru



людских ресурсов на поддержание установок в рабочем состоянии и обработку на них единицы продукции (пластины или партии пластин).

Этот набор, определяющий параметры выходной (обработанной на операции) структуры и различный в каждом конкретном случае, можно рассматривать как интегральный показатель качества (ИПК) конкретной операции и установки в маршруте изготовления кристаллов ИМС и МЭМС. Допуски на значения ИПК каждой операции и установки определяются, исходя из проектно-топологических норм и электрофизических параметров изготавливаемого кристалла ИМС или МЭМС, технологического маршрута его производства, регламента работы и обслуживания оборудования, стоимостей пластин, материалов, реагентов, оборудования, помещений и рабочей силы.

Разработчик изделия (маршрутный технолог) обычно задает требуемые параметры выходной структуры в своих терминах. Например, он характеризует выходную структуру с операции плазменного травления так:

значение допуска на уход размера элемента функционального слоя (ФС) относительно маски;

значения допусков на уход размера элемента ФС по пластине и от пластины к пластине;

значение допуска на уход толщины (подтрав) подслоя.

Разработчик операции плазменного травления (операционный или процессный технолог) переводит требования мар-

шрутного технолога к выходной структуре в требования к технологическим характеристикам операции плазменного травления следующим образом:

ограничение по уходу размера элемента ФС относительно маски в требование к анизотропии травления;

ограничение по разбросу размера элемента ФС по пластине в требование к равномерности травления по пластине;

ограничение по разбросу размера элемента ФС от пластины к пластине в требование к равномерности травления от пластины к пластине;

ограничение по допустимому подтраву подслоя в требование к селективности травления ФС относительно подслоя.

Если согласно производственному плану к тому же требуется, чтобы на установке плазменного травления на операции обрабатывалось не менее 20 пластин в час, то процессный технолог переводит его требование в ограничение по скорости травления.

После определения требуемых значений ИПК под планируемое или действующее производство кристаллов ИМС и МЭМС, необходимо путем отработки технологических режимов операций и изменения конструктивно-технологических параметров оборудования (установок) обеспечить их практическое достижение. В производственных условиях отработка технологического режима операции (процесса) на конкретной установке может проводиться методом однофакторного эксперимента и методом многофакторного эксперимента [2].

В производственных условиях отработка технологического режима операции (процесса) на конкретной установке может проводиться методом однофакторного эксперимента и методом многофакторного эксперимента.

Таблица 3

Толщина пленок монооксида германия на подложках, полученная в 17-ти циклах операции нанесения

Номер цикла нанесения i	Толщина пленки GeO на подложке x , мкм
1	1,31
2	1,33
3	1,30
4	1,32
5	1,32
6	1,34
7	1,34
8	1,35
9	1,34
10	1,33
11	1,35
12	1,33
13	1,34
14	1,34
15	1,34
16	1,32
17	1,32

Перед тем как проводить оценку возможностей процесса (операции) необходимо убедиться в том, что процесс находится в состоянии статистического контроля, то есть на него воздействуют только случайные факторы и результаты измерения его параметров подчиняются нормальному закону распределения.

Ниже приведен пример определения технологического допуска на параметр операции (процесса) в случаях, когда результаты измерения параметра подчиняются и не подчиняются нормальному закону распределения. В табл. 3 приведены данные по толщине пленок монооксида германия (GeO) на подложках, полученные в 17-ти циклах нанесения термическим испарением в вакууме. Указанные данные проверены на нормальность распределения с помощью метода оценки центральных моментов третьего и четвертого порядка [22].

Среднее арифметическое значение d результатов измерения x_i определяется по формуле [22]:

$$d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 1,33 \text{ мкм.} \quad (3)$$

Среднее квадратическое отклонение σ величин x_i от их среднего значения d определяется по формуле [22]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - d)^2} = 0,0135 \text{ мкм.} \quad (4)$$

Значения технологических допусков по критериям σ и 3σ задаются выражениями [22]:

$$r(x)_\sigma = (\sigma/d) \cdot 100 = \pm 1,01\%; \quad (5)$$

$$r(x)_{3\sigma} = (3\sigma/d) \cdot 100 = \pm 3,04\%, \quad (6)$$

и служат оценками неравномерности толщины пленок монооксида германия, наносимых на подложки, в случае справедливости нормального закона распределения.

Теперь предположим, что неизвестно об удовлетворении данных табл. 3 требованиям нормального распределения, и проведем оценку неравномерности толщины пленок монооксида германия, наносимых на подложки, другим способом.

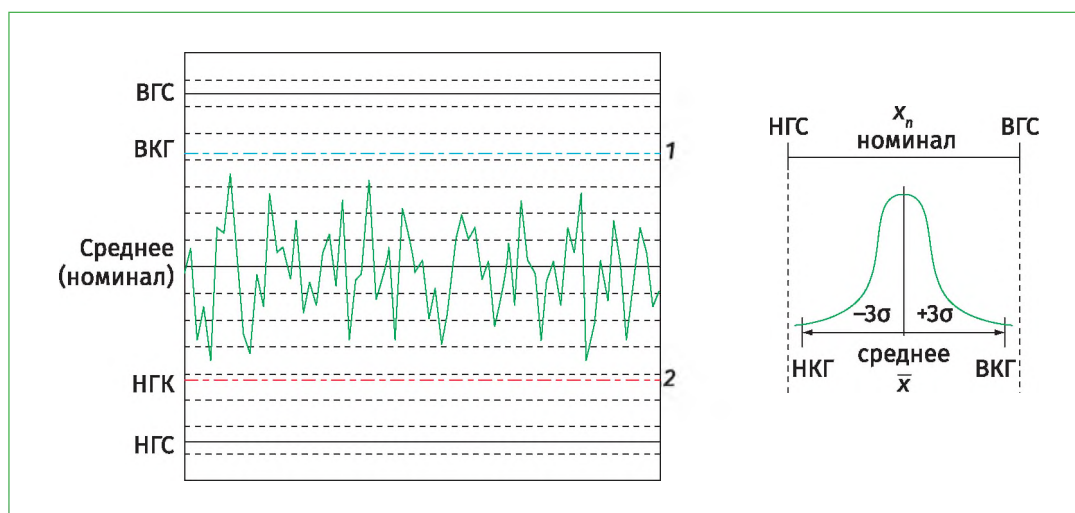


Рис. 7. Общие принципы отработки режима технологического процесса (операции): ВГС – верхняя граница спецификации параметра процесса; НГС – нижняя граница спецификации параметра процесса; ВКГ – верхняя контрольная граница параметра процесса; НКГ – нижняя контрольная граница параметра процесса; \bar{x} и σ – соответственно среднее значение, равное номинальному значению x_n , и среднее квадратическое отклонение параметра процесса

Неравномерность толщины пленок монооксида германия $r(x)$ в %, наносимых на подложки, может быть определена по формуле [23]:

$$r(x) = [(x_{\max} - x_{\min})/2d] \cdot 100, \quad (7)$$

где $x_{\max} = 1,35$, $x_{\min} = 1,30$ и $d = 1,33$ – соответственно максимальная, минимальная и средняя толщины пленок монооксида германия на подложках, мкм.

Расчет по формуле (7) дает следующую оценку неравномерности толщины пленок:

$$r(x) = \pm 1,88\%. \quad (8)$$

Видно, что оценка технологического допуска на неравномерность толщины пленки (8), которая справедлива и для распределения отличного от нормально-

го, превышает оценку технологического допуска по критерию «одна σ » (5), но меньше оценки технологического допуска по критерию «три σ » (6), характерным только для нормального распределения.

На практике, если после проверки результаты измерения параметров операций (процессов) не удовлетворяют требованиям нормальности распределения, то необходимо сначала привести процесс (операцию) в подконтрольное состояние, то есть убрать особые (неслучайные) факторы его изменчивости. Для технологического процесса это реализуется повторением одинаковых режимов всех операций при одинаковом состоянии оборудования.

Общие принципы отработки режима технологической операции иллюстрируются на рис. 7.

Коэффициент точности процесса (операции) C_p определяется отношением ширины нормативных границ спецификации, задаваемых маршрутным технологом, к ширине границ естествен-

ной изменчивости (контролируемости) процесса, определяемых операционным технологом на основании статистики по измерению параметра данного процесса.

Ширина контрольных границ (границ изменчивости) обычно рассчитывается как 6σ , где σ – среднеквадратическое отклонение наблюдаемых (измеренных) значений контролируемого параметра процесса. Для операционного технолога выход параметра за контрольные границы является сигналом к регулированию режима процесса (операции). Иными словами, коэффициент точности процесса показывает, с каким запасом имеющийся производственный процесс может обеспечивать предъявляемые к нему требования по заданному параметру.

Для характеристик процессов (операций) с двусторонними нормативными границами спецификации (см. рис. 7) коэффициент точности C_p определяется по следующей формуле [1]:

$$C_p = (ВГС - НГС)/6\sigma. \quad (9)$$

Для характеристик операций (процессов) с односторонними нормативными границами спецификации коэффициент точности не определяется.

Коэффициент настроенности процесса (операции) C_{pk} зависит как от отношения ширины нормативных границ спецификации к ширине границ естественной изменчивости (контролируемости) процесса, так и от расстояния от среднего значения процесса \bar{x} до целевого (номинального) значения x_n (см. рис. 7). Иными словами, коэффициент настроенности процесса показывает, с каким запасом имеющийся производственный процесс фактически обеспечивает предъявляемые к нему требования.

Коэффициент настроенности процесса C_{pk} в общем случае определяется по минимальному значению из двух формул [2]:

$$\left[(ВГС - x_n)/3\sigma \right] \cdot \left[1 - \frac{|x_n - \bar{x}|}{(ВГС - x_n)} \right]; \quad (10)$$

$$\left[(x_n - НГС)/3\sigma \right] \cdot \left[1 - \frac{|x_n - \bar{x}|}{(x_n - НГС)} \right]. \quad (11)$$

Для параметров процесса с двусторонними нормативными границами спецификации и симметричным распределением, когда $x_n = (ВГС + НГС)/2$ (см. рис. 4), формулы (10) или (11) для коэффициента настроенности C_{pk} сведутся к следующему выражению [2]:

$$C_{pk} = C_p - (x_n - \bar{x})/3\sigma. \quad (12)$$

Для характеристик с односторонними нормативными границами спецификации формулы (10) или (11) сведутся к следующим выражениям [2]:

$$C_{pk} = (\bar{x} - НГС)/3\sigma; \quad (13)$$

$$C_{pk} = (ВГС - \bar{x})/3\sigma, \quad (14)$$

в зависимости от того, которая из контрольных границ, ВГС или НГС, определена.

Целью оценки возможностей производственного процесса (операции) с помощью коэффициентов точности и настроенности является определение того, насколько производственный процесс

(операция), находясь под статистическим контролем, в состоянии обеспечить требуемое качество производимой продукции и оценить возможность выпуска несоответствующих изделий.

Начинать выпуск продукции рекомендуется только тогда, когда значения коэффициентов C_p и C_{pk} достигли значений не менее 1,33 и 1,0 соответственно. В дальнейшем значения коэффициентов точности и настроенности процесса необходимо непрерывно повышать. При серийном производстве целесообразно иметь значения коэффициентов C_p и C_{pk} не менее 2,0 и 1,5 соответственно.

Если значения коэффициентов точности и настроенности процесса (операции) неудовлетворительны, следует разработать план мероприятий для достижения одной из следующих целей: изменение требований к нормативным границам спецификации; изменение режима процесса; введение стопроцентных отбраковочных испытаний (если $C_{pk} > -1$) в рамках неизменного режима процесса; прекращение выпуска продукции, не удовлетворяющей предъявляемым требованиям.

Если значения коэффициентов точности и настроенности процесса удовлетворительны, следует поддерживать процесс на имеющемся уровне при помощи контрольных карт и вести работу по увеличению значения коэффициентов точности и настроенности.

Кроме того, при контроле технологических допусков на параметры процессов (операций), на характеристики функциональных слоев и микросхем следует учитывать тот факт, что точность (разрешающая способность) прибора для контроля технологического допуска должна быть [2]:

согласно международным стандартам в 10 раз выше измеряемой величины технологического допуска;

согласно российским государственным стандартам (ГОСТам) составлять от 40 до 60% от измеряемой величины технологического допуска.

Таким образом, если параметр G требуется получать с технологическим допуском δG , то есть $G \pm \delta G/2$, то точность контролирующего прибора должна составлять $0,1 \cdot \delta G$ по международным стандартам или $(0,4 \dots 0,6) \cdot \delta G$ по российским ГОСТам. Более низкие значения выхода годных микросхем с одинаковыми технологическими нормами на (советских) российских предприятиях по сравнению с зарубежными фабриками могут быть связаны именно с этим фактом.

Выводы

На основании анализа возможности российской промышленности в условиях глобальных санкций показано, что оптимальным вариантом развития отечественного серийного технологического оборудования микроэлектроники являются разработка и изготовление набора вакуумных и атмосферных кластерных технологических комплексов с различными технологическими модулями, из которых должны собираться производственные линейки (мини-фабрики) для изготовления кристаллов различных ИМС и МЭМС.

Проведена оценка по международным стандартам стоимости заводов и мини-фабрик (производственных линеек), а также их основных составляющих систем, под изготовление кристаллов ИМС и МЭМС с уровнями технологии в диапазоне 500...65 нм.

Сформулированы требования и условия оценки возможностей технологического и контрольно-измерительного оборудования микроэлектроники для реализации серийного производства кристаллов ИМС и МЭМС.

Список использованных обозначений и сокращений

ИМС – интегральная микросхема = микросхема = ИС – интегральная схема = microcircuit = integral circuit – IC.

МЭМС – микроэлектромеханическая система = microelectromechanical system – MEMS.

Кристалл ИМС – ИМС, расположенная в виде участка пластины, без корпуса и выводов = IC chip = chip.

УТ – уровень технологии – уровень разрешения технологического процесса = Technology Node – Node – N, определяется технологической нормой (technological norm), совпадающей с минимальным размером элемента L_{min} (critical dimension – CD = feature size) ИМС.

Топологическая норма – topological norm = проектная норма – design norm = проектно-топологическая норма – design and topological norm – норма, по которой происходит проектирование топологии ИМС (design of IC topology) в соответствии с правилами проектирования (IC design rules), и которая значительно больше технологической нормы. К сожалению, в литературе эти нормы часто путают.

Функциональный слой – ФС = Functional layer – FL.

Центральный микропроцессор = Central processor unit – CPU.

Динамическое оперативное запоминающее устройство – ДОЗУ = Dynamic random access memory – DRAM.

Заказные микросхемы искусственного интеллекта = Artificial intelligence application specific integral circuits – AI ASIC.

Кластерное оборудование = кластерный технологический комплекс – КТК = Cluster equipment.

Многокластерный технологический комплекс – МТК = Multicluster technological complex.

Система автоматического проектирования – САПР.

Программное обеспечение – ПО.

FOUP – Front Opening Unified Pod = Унифицированный модуль с фронтальной загрузкой кассеты с пластинами – ФОУП-контейнер.

SMIF – Standard Mechanical InterFace – SMIF Pod = Унифицированный модуль с верхней загрузкой кассеты с пластинами – СМИФ-контейнер.

Атмосферная мини климатическая кабина = Equipment Front End Module – EFEM.

Автоматический открыватель СМИФ-контейнера или ФОУП-контейнера = SMIF Load Port или FOUP Load Port.

Monitor blank wafers = пластины-спутники без топологического рисунка; dummy wafers = балластные пластины; product wafers = рабочие пластины.

FICS – factory information and control system = система управления и контроля производственным процессом – СУ и КПП.

ИПК – интегральный показатель качества.

Список литературы

1. Беспалов В.А., Дюжев Н.А., Киреев В.Ю. Возможности и ограничения КМОП-технологии для производства различных микроэлектронных систем и приборов // Российские нанотехнологии. 2022. Т. 17. № 1. С. 29–45.
2. Киреев В.Ю. Введение в технологии микроэлектроники и нанотехнологии. М.: ФГУП «ЦНИИХМ», 2008. 427 с.
3. Официальный сайт АО «Микрон» [Электронный ресурс]. URL: www.mikron.ru.
4. Васильев А. Зачем нужны российские процессоры «Байкал» и «Эльбрус», если аналоги от Intel мощнее и дешевле в несколько раз? [Электронный ресурс]. URL: <https://bankstoday.net/last-articles/zachem-nuzhny-rossijskie-protssessory-bajkal-i-elbrus-esli-analogi-ot-intel-moshhnee-i-deshevle-v-neskolko-raz>.
5. Официальный сайт АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения» (НИИТМ) [Электронный ресурс]. URL: www.niitm.ru.
6. Официальный сайт ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводникового машиностроения» (НИИПМ) [Электронный ресурс]. URL: www.vniipm.ru.
7. Khan S.M., Mann A., Peterson D. The Semiconductor Supply Chain: Assessing National Competitiveness. CSET Issue Brief. 2021. 98 p.
8. Меньше и дороже: будущее мирового и российского рынков чипов [Электронный ресурс]. URL: https://dzen.ru/a/Y0Qcc7NU_gPscnoK.
9. Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology. 2nd ed. / Ed. by Y. Nishi and R. Doering. N.Y., USA: Marcell Dekker Inc., 2008. P. 17–22.
10. The International Technology Roadmap for Semiconductors. 1999 end 2001 Edition: Semiconductor Industry Association. San Jose, CA.

11. The National Technology Roadmap for Semiconductors. 1997 Edition: Semiconductor Industry Association. San Jose, CA.
12. The International Technology Roadmap for Semiconductors. 2003–2015 Edition: Semiconductor Industry Association. San Jose, CA.
13. ГОСТ Р ИСО 14644-1–2017. Национальный стандарт Российской Федерации чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Ч.1: Классификация чистоты воздуха по концентрации частиц [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200157235>.
14. *Баринов В.В., Калинин А.В., Киреев В.Ю.* Кластерное производство специализированных СБИС // Известия вузов. Электроника. 2000. № 4–5. С. 98–102.
15. *Куликов И.Н.* Методика повышения эффективности использования кластерного оборудования в полупроводниковом производстве на основе имитационных моделей потоков полуфабрикатов: дис. ... на соискание ученой степени канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 228 с.
16. *Быков В., Гудков А., Киреев В.* Центр аттестации технологического оборудования – необходимое звено в цепи микроэлектронного производства // Современная электроника. 2015. № 4. С. 2–7.
17. Новые конструкторско-технологические решения технокимических операций изготовления элементов МЭМС и микросборок / Ю.В. Герасименко [и др.] // Наноиндустрия. 2018. № 9. С. 532–537.
18. *Тупикин В.Ф., Герасименко Ю.В., Калугин В.В.* Концепция изготовления МЭМС на основе специализированного отечественного оборудования на кластерной платформе: тез. докл. Междунар. форум «Микроэлектроника–2017». Алушта, 2017. С. 544–549.
19. *Панфилов Ю.В.* Электронные, ионные и плазменные технологии: уч. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 16 с.
20. Калькулятор инфляции с данными об индексе потребительских цен США [Электронный ресурс]. URL: <https://www.calculator.net/inflationcalculator.html?cstartingamount=100&cinyear=2007&coutyear=2022&calctype=1&x=121&y=15>.
21. *Киреев В.Ю.* Нанотехнологии в микроэлектронике. Нанолитография – процессы и оборудование. Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2016. 320 с.
22. *Румшицкий Л.З.* Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Изд-во «Наука», 1971. 192 с.
23. *Киреев В., Столяров А.* Технологии микроэлектроники. Химическое осаждение из газовой фазы. М.: Техносфера, 2006. 192 с.

References

1. *Bespalov V.A., Dyuzhev N.A., Kireev V.Yu.* Possibilities and limitations of CMOS technology for the production of various microelectronic systems and devices // Russian Nanotechnologies. 2022. Vol. 17. N 1. P. 29–45.
2. *Kireev V.Yu.* Introduction to microelectronics and nanotechnology technologies. М.: «TSNIIKhM», 2008. 427 p.
3. The official website of JSC «Mikron» [Elektronnyj resurs]. URL: www.mikron.ru.
4. *Vasiliev A.* Why do we need Russian processors «Baikal» and «Elbrus» if analogues from Intel are several times more powerful and cheaper? [Elektronnyj resurs]. URL: <https://bankstoday.net/last-articles/zachem-nuzhny-rossijskie-protssessory-bajkal-i-elbrus-esli-analogi-ot-intel-moshhnee-i-deshevle-v-neskolko-raz>.
5. The official website of JSC «Research Institute of Precision Engineering» (NIITM) [Elektronnyj resurs]. URL: www.niitm.ru.
6. The official website of JSC «Scientific Research Institute of Semiconductor Engineering» (NIIPM) [Elektronnyj resurs]. URL: www.vniipm.ru.
7. *Khan S.M., Mann A., Peterson D.* The Semiconductor Supply Chain: Assessing National Competitiveness. CSET Issue Brief. 2021. 98 p.
8. Smaller and more expensive: the future of the global and Russian chip markets [Elektronnyj resurs]. URL: https://dzen.ru/a/Y0Qcc7NU_gPscnoK.
9. Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology. 2nd ed. / Ed. by Y. Nishi and R. Doering. N.Y., USA: Marcell Dekker Inc., 2008. P. 17–22.
10. The International Technology Roadmap for Semiconductors. 1999 и 2001 Edition: Semiconductor Industry Association. San Jose, CA.
11. The National Technology Roadmap for Semiconductors. 1997 Edition: Semiconductor Industry Association. San Jose, CA.
12. The International Technology Roadmap for Semiconductors. 2003–2015 Edition: Semiconductor Industry Association. San Jose, CA.

13. GOST R ISO 14644-1-2017. National standard of the Russian Federation for clean rooms and related controlled environments. P. 1: Classification of air purity by particle concentration [Elektronnyj resurs]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200157235>.
14. *Barinov V.V., Kalinin A.V., Kireev V.Yu.* Cluster production of specialized VLSI. - Proceedings of universities. ELECTRONICS, 2000. N 4–5. P. 98–102.
15. *Kulikov I.N.* A technique for increasing the efficiency of using cluster equipment in semiconductor production based on simulation models of semi-finished product flows: – Thesis for the degree of candidate of technical sciences in the specialty. M.: MSTU im. N.E. Bauman, 2019. 228 p.
16. *Bykov V., Gudkov A., Kireev V.* The Process Equipment Certification Center is a necessary link in the chain of microelectronic production // Modern electronics. 2015. N 4. P. 2–7.
- 17., *Sergienko A.I., Ermakov A.N.* New design and technological solutions for technochemical operations for the manufacture of MEMS elements and microassemblies / Yu.V. Gerasimenko [et al.] // Nanoindustry. 2018. N 9. P. 532–537.
18. *Tupikin V. F., Gerasimenko Yu. V., Kalugin V. V.* The concept of manufacturing MEMS based on specialized domestic equipment on a cluster platform: abs. of the report at the International Forum «Microelectronics–2017». Alushta, 2017. P. 544–549.
19. *Panfilov Yu.V.* Electronic, ion and plasma technologies: textbook. M.: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2003. 16 p.
20. Inflation calculator with US CPI data [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.calculator.net/inflationcalculator.html?cstartingamount1=100&cinyear1=2007&coutyear1=2022&calctype=1&x=121&y=15>.
21. *Kireev V.Yu.* Nanotechnologies in microelectronics. Nanolithography – processes and equipment. Dolgoprudny: Intellect Publishing House, 2016. 320 p.
22. *Rumshisky L.Z.* Mathematical processing of the results of the experiment. M.: Publishing house «Nauka», 1971. 192 p.
23. *Kireev V., Stolyarov A.* Technologies of microelectronics. Chemical vapor deposition. M.: Technosfera, 2006. 192 p.

Поступила в редакцию: 20.04.2022

Одобрена рецензентами: 25.06.2022

Принята к печати: 15.02.2023

Об авторах

Михаил Георгиевич Бирюков – кандидат технических наук, генеральный директор АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения» (АО «НИИТМ»).

Mikhail G. Biryukov – PhD in Engineering sciences, general director Joint Stock Company «Research Institute of Precision Engineering» (JSC «NIITM»).

Валерий Юрьевич Киреев* – доктор технических наук, ведущий инженер АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения» (АО «НИИТМ»). Адрес для почтовых отправлений: 124460, г. Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10. E-mail: vkireev@niitm.ru и valerikireev@mail.ru.

Valeriy Yu. Kireev* – Grand PhD in Engineering sciences, leading engineer Joint Stock Company «Research Institute of Precision Engineering» (JSC «NIITM»). Postal address: 10 Panfilovsky prospect, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia. E-mail: vkireev@niitm.ru & valerikireev@mail.ru.

Анатолий Андреевич Ковалев – кандидат технических наук, генеральный директор АО «Зеленоградский нанотехнологический центр» (АО «ЗНТЦ»).

Anatoliy A. Kovalev – PhD in Engineering sciences, general director Joint Stock Company «Zelenograd Nanotechnology Center» (JSC «ZNTC»).

Константин Эдуардович Певчих* – советник генерального директора АО «ЗНТЦ». Адрес для почтовых отправлений: 124527, г. Москва, Зеленоград, Солнечная аллея, д. 6. E-mail: k.pevchikh@yandex.ru.

Konstantin E. Pevchikh* – advisor to the general director Joint Stock Company «Zelenograd Nanotechnology Center» (JSC «ZNTC»). Postal address: 6 Solnechnaya Alleya, Zelenograd, Moscow, 124527, Russia. E-mail: k.pevchikh@yandex.ru.

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

УДК 004.932

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА И ПРОГРАММНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ СТЕРЕОСИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ



И.В. ШАШКИН, С.А. ЖУКОВА, к.т.н.,
ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики»

Аннотация. В статье представлен краткий обзор малогабаритных бинокулярных аппаратных средств с низким энергопотреблением, предназначенных для повышения уровня безопасности как систем автономного принятия решения, так и комбинированного видения оптимизированных к сложным условиям работы алгоритмов и программного обеспечения. Проведена оценка качества результатов совмещения стереоизображений, контроля и автоматизации деятельности мобильных систем технического зрения, методов проведения тестирования и сравнительного анализа алгоритмов обработки бинокулярного видеопотока.

Ключевые слова: СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЕ; КАРТА ГЛУБИНЫ; АЛГОРИТМЫ СТЕРЕОСОПОСТАВЛЕНИЯ; МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ.

Для цитирования: Шашкин И.В., Жукова С.А. Энергоэффективные аппаратные средства и программные решения для мобильных стереосистем технического зрения // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 1. С. 32–51.

ENERGY EFFICIENT HARDWARE AND SOFTWARE SOLUTIONS FOR MOBILE VISION STEREO SYSTEMS

I.V. SHASHKIN, S.A. ZHUKOVA, PhD in Engineering,
SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics»

Abstract: *The article reviews stereo framework with small dimensions and low power consumption for the security enhancement by accelerating protection the environment and instant decision-making in case of critical situation. It demonstrates the quality disparity estimation including overall comparison of methods of testing video stream processing with software embedded and a large set of stereo algorithms.*

Keywords: STEREO IMAGE; DEPTH MAP; STEREO MATCHING; MACHINE LEARNING.

For citation: Shashkin I.V., Zhukova S.A. Energy efficient hardware and software solutions for mobile vision stereo systems // Promising technologies for security systems. 2023. N 1. P. 32–51.

Введение

Устройства технического зрения все чаще дополняют автоматизированные и автоматические системы, такие как: беспилотные автомобили, квадрокоптеры, производственные манипуляторы, приборы бытовой роботизированной техники, что многократно повышает уровень защиты и безопасности людей и животных, сохраняет дорогостоящие технические средства и сооружения.

С каждым годом расширяется спектр автоматизированных систем помощи водителям или операторам для обеспечения безопасности и комфорта управления транспортными средствами, персоналу, находящемуся в зоне действия манипуляторов, все чаще роботизированные комплексы заменяют людей в местах, где их нахождение связано с опасностью для жизни, а интеллектуальные системы технического зрения (СТЗ) в несколько раз быстрее предотвращают аварийные ситуации, сокращают экономические потери.

Современные СТЗ требуют оперативной обработки все возрастающего объема

данных видеонаблюдений. Причем получать информацию необходимо с большей точностью по пространственному разрешению и с нескольких полей зрения. С другой стороны, для СТЗ способность обрабатывать зрительные данные в рамках отпущенных временных интервалов является принципиальным требованием. По пути, от получения образа до формирования конечного результата, решается множество задач: сбор зрительных данных, диагностика их качества, выделение низкоуровневых признаков объектов и т.д. Последующей ступенью для решения целевой задачи является распознавание образов (сигналов, ситуаций, явлений или процессов) для идентификации объекта или определения каких-либо свойств по его изображению.

При обработке видеоконтента, когда разработчику все чаще приходится иметь дело с 3D-сценой, оценка ее глубины является одной из наиболее важных задач современных средств компьютерного зрения. Ее решение лежит в основе нескольких реальных приложений, таких

как системы для беспилотного вождения, позиционирования мобильной робототехники, контроля производственного процесса, медицинских приложений и многого другого. Несмотря на то что существует несколько подходов и ресурсов для оценки глубины сцены, при выполнении такого действия наиболее популярны стали сопоставление и анализ стереоизображений. При стереосопоставлении точечные соответствия между стереопарами (две разные точки обзора с эпиполярным ограничением из одной и той же сцены) позволяют получать изображения глубины, называемые картами диспаратности. Для оценки карты несоответствий необходимо измерить сходство точек внутри стереопары, идентифицировать сегменты, сопоставить признаки.

Кроме того, задачи технического зрения часто включают основанные на фильтрах алгоритмы позиционирования. В соответствии с трехмерными координатами характерных точек в текущей системе координат камеры и ее мировыми координатами на карте оценивается положение камеры в мировой системе координат. Для этого требуются встраиваемые

в СТЗ аппаратные платформы небольших размеров с пониженным энергопотреблением, обладающие специализированной архитектурой, часто зависящей от выбора категории используемых алгоритмов обработки данных.

Современные аппаратные платформы обработки видеоизображений

Технические системы зрения развиваются весьма быстро. Наиболее важными компонентами аппаратных средств машинного зрения являются микросхемы обработки видеосигналов. В качестве таких используются не только микропроцессоры или CPU (Central Processing Unit – *англ. здесь и далее*), но и графические процессоры GPU (Graphic Processor Unit), а также FPGA (Field Programmable Gate Array), ASIC (Application-Specific Integrated Circuit), специализированные видеопроцессоры и другие средства вычислений и обработки. Особый толчок к развитию аппаратного многообразия устройств обработки видеопотоков дало более активное использование искусственных нейронных сетей, что вызвало потребность в нейропроцессорах (нейроморфных чипах) в качестве акселераторов нейросетей.

Исторически цифровая обработка изображений первоначально производилась с использованием микропроцессоров или CPU, которые позволяют достаточно быстро видоизменять алгоритм, но обладают самой низкой энергоэффективностью (рис. 1), а также в 50 и более раз увеличивают задержку при обращении к памяти при превышении ее размера свыше 16 Мб.

Также разработчики отмечают, что CPU становятся неэффективными при работе с глубокими нейросетями, когда число слоев сети и размер входных данных велики.

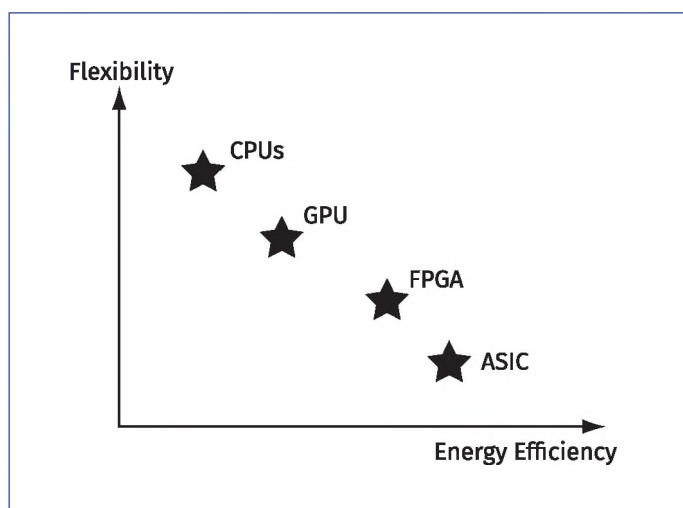
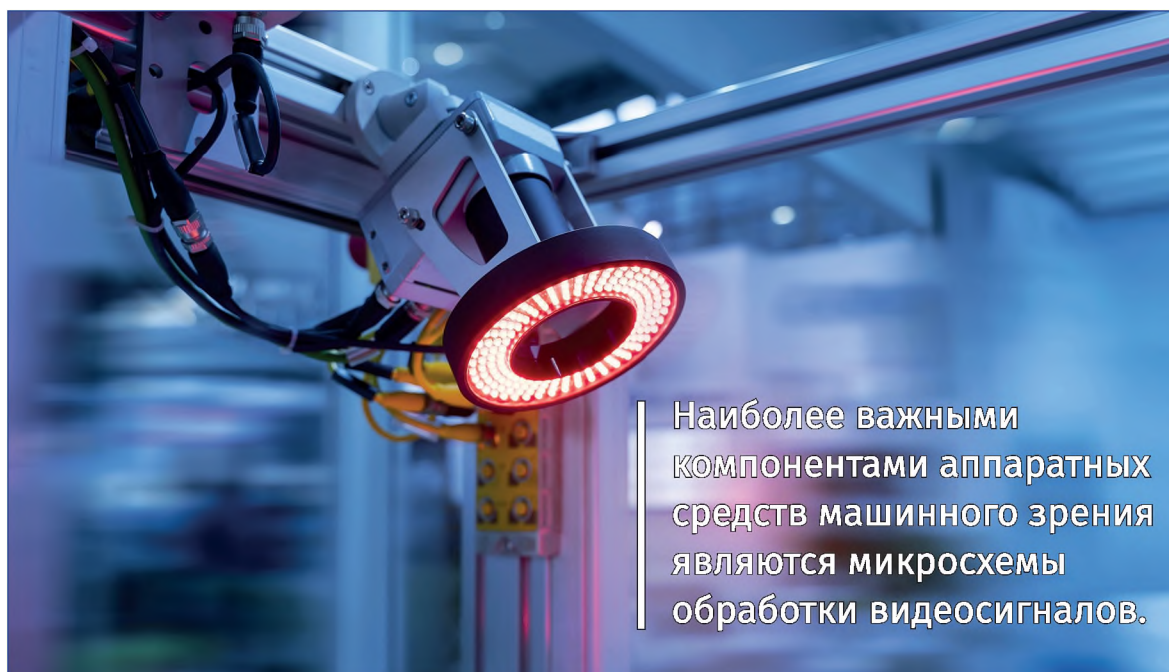


Рис. 1. Упрощенное сопоставление энергоэффективности и гибкости различных аппаратных средств



Графические процессоры, или GPU, лишены ряда недостатков CPU и позволяют ускорить вычисления в десятки раз за счет высокоскоростного обмена с оперативной памятью и более гибкой системы управления кэш-памятью. Хотя они мало пригодны к использованию в автономных мобильных устройствах из-за высокого энергопотребления, но крайне эффективны для аппаратного ускорения обучения (трейнинга) нейросетей.

Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), или FPGA, являются сетью из нескольких миллионов программируемых блоков, которые можно программно соединять между собой. Узкое место, связанное с задержкой обмена с оперативной памятью, компенсируется тем, что можно хранить сеть непосредственно в ячейках и нет необходимости перегонять 25 раз в секунду (при анализе видеопотока) в одном и том же направлении сотни мегабайт одних и тех же данных. Это позволяет при более низкой тактовой частоте и отсутствии

кэшей получить заметное повышение производительности и кардинально снизить энергопотребление на единицу вычислений. Недостатком FPGA является более сложный, по сравнению с предыдущими вариантами, процесс программирования и отсутствие пока гибкого механизма перехода между архитектурами аппаратных средств различных производителей (Amazon, Intel, Facebook, Xilinx, Microsoft, NTT, Qualcomm, Gowin и др.). В работе [1] проведен глубокий анализ использования различных аппаратных средств в серийно выпускаемых системах автономного вождения и сделан вывод о насущной необходимости использования FPGA в беспилотных автомобилях, хотя еще недавно считалось, что для столь сложных условий и многообразия критериев обработки нельзя обойтись без мощных многоядерных процессоров с GPU ускорителями. Наиболее часто встречающаяся структура мобильного ускорителя с использованием FPGA представлена на рис. 2.

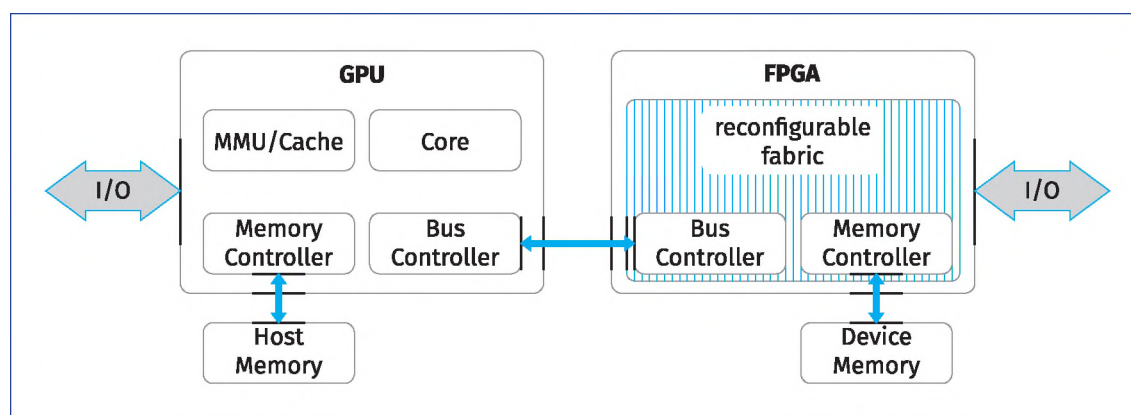


Рис. 2. Стандартная структура ускорителя на FPGA

Следующий вариант реализации вычислителя, известный как «интегральная схема под определенную задачу» или ASIC, экономически выгоден для случаев, когда уже хорошо отлаженный процесс видеобработки востребован в объеме от нескольких миллионов чипов с низким энергопотреблением и высокой производительностью. Такая ситуация постепенно складывается на рынке автопилотов машин, в камерах видеонаблюдения или сенсорах роботов-пылесосов. При массовом производстве чип стоит дешево, работает быстро и потребляет минимум энергии. Но одновременно очень ограничены возможности обновления сети и логики, а стоимость разработки, по сравнению со всеми предыдущими решениями, является самой высокой.

Нейропроцессоры, в зависимости от воли их создателей, получающие различные сокращенные названия – NPU (Neural Processing Unit), NNP (Neural Network Processor), IPU (Intelligence Processing Unit) или TPU (Tensor Processing Unit), – это относительно новые разработки небольших компаний-чипмейкеров, зачастую поглощаемых такими гигантами индустрии электроники, как Intel, AMD и др. Данные микросхемы позиционируют, главным образом, в качестве ускорите-

лей глобальных нейросетей, но иногда предлагают использовать самостоятельно для выполнения нейросетевых задач, включая небольшие вычислители в составе мобильных устройств с энергопотреблением до 10 Вт, а в некоторых случаях и менее 1 Вт (например, презентация перспективных процессоров Ascend Lite и Ascend-Tiny производства Huawei – рис. 3).

На выставке CES 2023 в Лас-Вегасе компания AMD анонсировала сразу несколько линеек мобильных процессоров. Особое внимание привлекает серия чипов AMD Ryzen 7040, которая, похоже, вобрала все наиболее прогрессивные наработки этого производителя на настоящий момент.

Специализированные видеопроцессоры с аббревиатурами VPU (Vision Processing Unit) или ISP (Image Signal Processor) начали встраиваться в компактные камеры с потоковой обработкой видео и уже демонстрируют определенные результаты при очень невысоких ценах. К ним относится продукция нескольких компаний на процессорах Myriad X VPU, разработанных компанией Movidius™, которую компания Intel приобрела в 2016 г.

Процессоры для обработки видеозображений ISP чаще всего дополняют основной процессор, используемый для обработки видеоконтента, а также уско-

ряют время анализа и повышают надежность сигнала. Вот некоторые представленные на российском рынке процессоры ISP. Spectra 380 производства компании Qualcomm является первым в мире процессором ISP с элементами искусственного интеллекта. Разумеется, не осталась в стороне и компания Renesas – в семействе систем на кристалле R-Car V3M для автомобильной электроники процессор ISP является дополнением к двум ядрам

ARM Cortex A53 и двум ядрам ARM Cortex R7. Компания ON Semiconductor AP0100CS имеет в своей продуктовой линейке процессор ISP AP0100CS для обработки сигналов видеокамеры с разрешением 1280×960. Аналогичное решение имеется и у компании STMicroelectronics.

Результаты проведенного сравнительного анализа показывают, что наиболее энергоэффективные схемотехнические решения с гибкими возможностями для встраивания в мобильные устройства в настоящее время реализуются на базе ПЛИС и/или с использованием специализированных видеопроцессоров, что необходимо учитывать при разработке программного обеспечения (ПО) для этих задач. К ним относятся следующие, наиболее популярные, высокопроизводительные мобильные решения: ASUS Tinker Edge R; Raspberry Pi 4; Google Coral Dev Board; NVIDIA Jetson Nano; Arduino Nano 33 BLE.

Сравнительный анализ показал, что наиболее энергоэффективные схемотехнические решения с гибкими возможностями для встраивания в мобильные устройства реализуются на базе ПЛИС.

Ascend: Optimal TOPS/W Across All Scenarios

- Ascend 910 (cloud): **greatest computing density** in a single chip, mainly for large-scale distributed training
- Ascend 310 (device): **Extremely efficient AI SoC for low-power computing** and inference scenarios

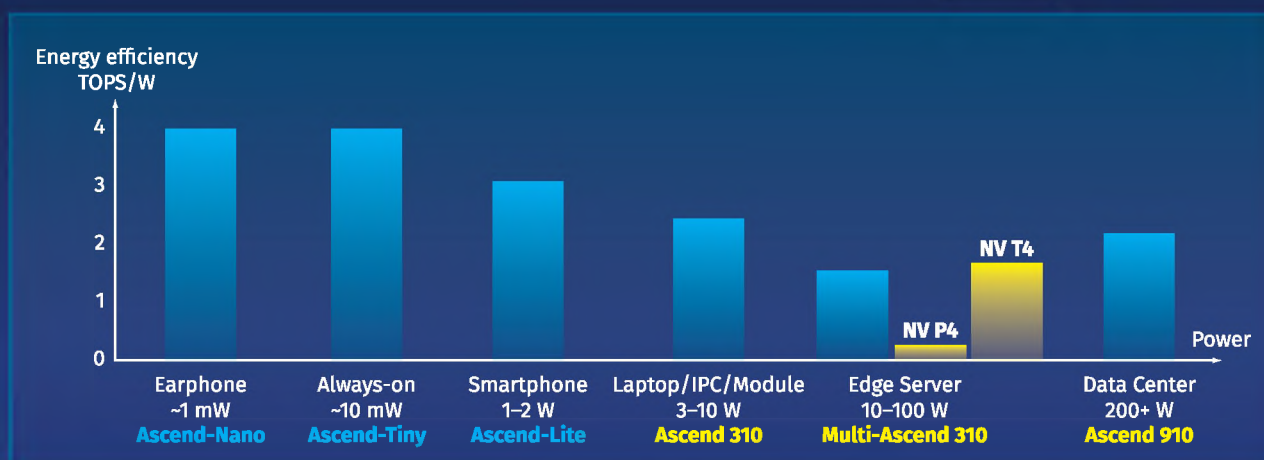
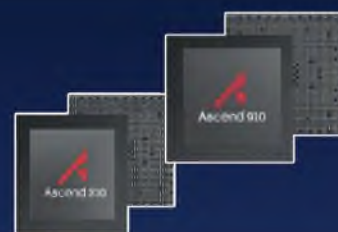


Рис. 3. Презентация линейки процессоров производства Huawei, КНР

Численные методы и алгоритмы

Существующие подходы к обработке стереоизображений можно разделить на локальные, глобальные и полуглобальные методы [2]. В любом случае ключевым элементом является нахождение одинаковых пикселей на изображении, снятом левой (обычно рассматриваемым как базовое) и правой камерами. Их смещение, выраженное в пикселях, называется диспаратностью. Это значение можно легко преобразовать в расстояние от датчиков, используя известные параметры СТЗ. Чаще всего каждый из методов для получения результата «заточен» на четыре основных действия:

- вычисление стоимости стереосопоставления;
- агрегация стоимостей;
- вычисление карты диспаратности;
- уточнение результатов.

Локальные методы агрегируют затраты на сопоставление в областях поддержки, окружающих каждый пиксель обычно с использованием средневзвешенного значения [3]. Значение несоответствия, которое дает наименьшее различие между опорными областями, устанавливается как значение несоответствия центрального пикселя опорной области в подходе «победитель получает все» или WTA (winner-take-all). Локальные алгоритмы с использованием пассивного метода процесса стереосопоставления обычно содержат следующие этапы:

- предварительная обработка: шумоподавление, улучшение, фильтрация, бинаризация, обнаружение границ;

извлечение объекта – отображение пространства объектов на пространство параметров;

- сегментация изображения;
- распознавание описания изображения.

Глобальные подходы формулируют вычисление агрегации и диспаратности как проблему глобальной оптимизации [4]. Карта несоответствий вычисляется как минимум функцией, определяемой взвешенной суммой стоимости сопоставления всех пикселей и регулирующего штрафного члена, который принуждает соседние пиксели иметь аналогичные несоответствия.

Локальные алгоритмы отдают предпочтение скорости, а не точности, в то время как глобальные алгоритмы реализуют высокую точность, чаще всего, в ущерб скорости. Локальные методы, использующие классические алгоритмы эпиполярной геометрии, до настоящего времени пользуются популярностью у разработчиков программного обеспечения (ПО) технического зрения, особенно в области встраиваемых алгоритмов компактных периферийных устройств. За последнее десятилетие работы различных авторов продемонстрировали, что алгоритмы локального стереосопоставления, реализованные с использованием FPGA, очень полезны в определенных практических приложениях.

К сожалению, для высокой гибкости (относительно оценки глубины) требуется широкий диапазон уровней диспаратности для каждого пикселя в сцене, а это подразумевает большое потребление

За последнее десятилетие работы различных авторов продемонстрировали, что алгоритмы локального стереосопоставления, реализованные с использованием FPGA, очень полезны в определенных практических приложениях.

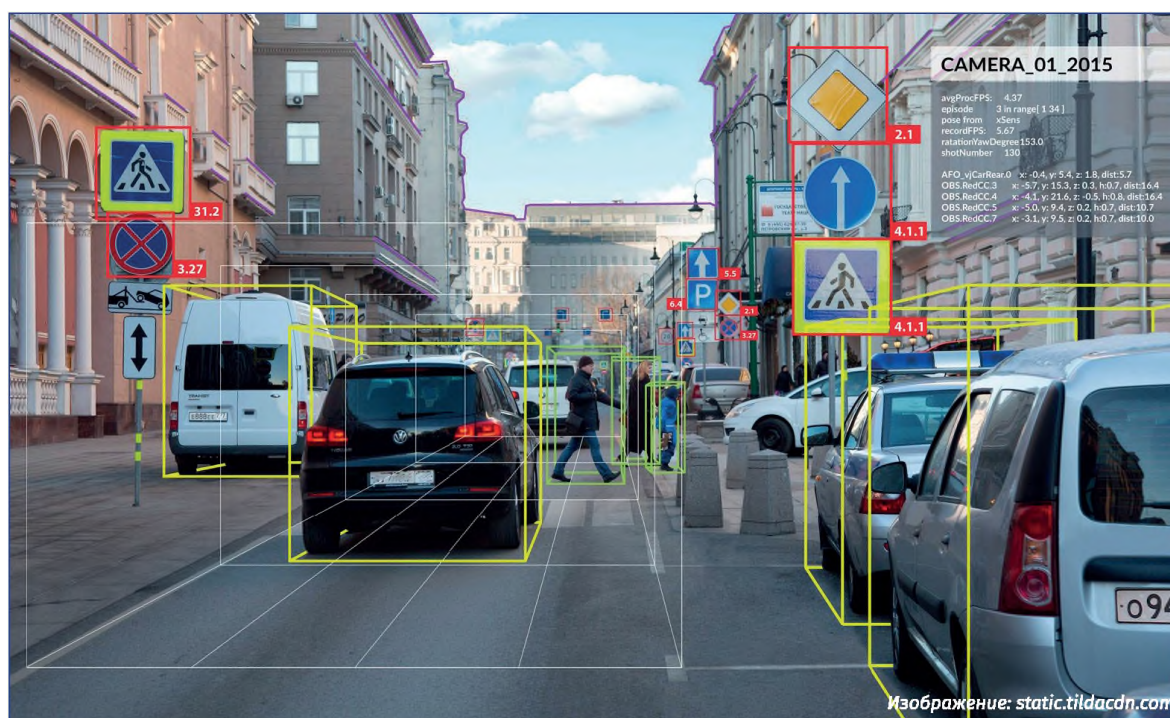


Рис. 4. Работа СТЗ-платформы на примере городской улицы

аппаратных ресурсов. В данном классе решений наиболее популярным является комплексный метод пространственной локализации объектов, известный под названием DARP (Depth-Assisted Rectification of Patches). С целью повышения эффективности применения метода DARP для мобильных роботизированных платформ в его состав предложено ввести ряд алгоритмов SLAM (Simultaneous Location And Mapping). В качестве алгоритмов стереотождествления по «характерным точкам» обычно выбирают одни из самых надежных и применяемых в отрасли: SIFT [5] и SURF [6]. В качестве детектора и дескриптора устойчивых признаков рекомендуется использовать ORB-метод (Oriented FAST and Rotated BRIEF) [7], а анализ текущей ситуации выполнять с учетом предыстории ее развития.

В результате на мобильном вычислителе появляется возможность в реальном масштабе времени проводить оценку га-

баритов объектов, исправление или частичное восстановление искаженных или поврежденных участков кадров изображения, определять принадлежность дистантных данных к тому или иному объекту, находящемуся в зоне действия СТЗ-платформы (рис. 4).

Стоит отметить метод создания формы из силуэта, который, благодаря быстрым вычислениям и надежности получаемых результатов, нередко применяют для построения трехмерных моделей отдельных объектов [8].

Кроме того, некоторыми авторами используется еще один подход, связанный с оценкой карт несоответствий с различными размерами окна с использованием простой локальной метрической корреляции. На этой основе система нечеткого вывода объединяет ранее вычисленные несоответствия, чтобы создать окончательную карту несоответствий [9]. Это позволяет эффективно использовать про-

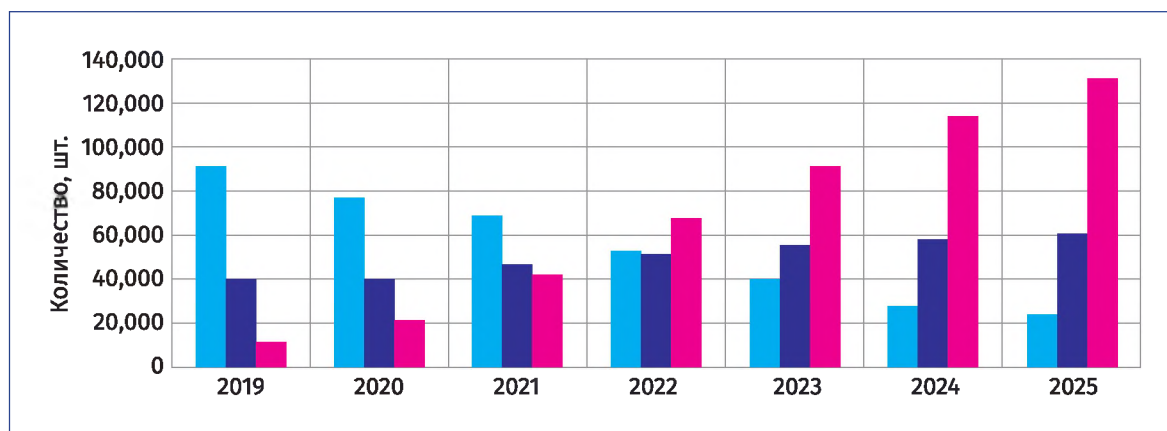


Рис. 5. Объем поставок оборудования для видеонаблюдения со встроенной видеоаналитикой:
■ – камеры и видеорегистраторы без аналитики;
■ – камеры и видеорегистраторы со встроенной видеоаналитикой на основе правил;
■ – камеры и видеорегистраторы со встроенной видеоаналитикой на базе глубокого обучения

странство поиска несоответствий, получая точную плотную реконструкцию без необходимости глобальной оптимизации.

Перечисленные локальные методы не требовательны к серьезным вычислительным ресурсам и могут встраиваться в различные архитектуры, включая ПЛИС и видеопроцессоры. При этом, по сравнению с глобальными алгоритмами, они обладают существенно более низкой точностью, устойчивостью и часто обширными областями изображений, где не определены значения глубины сцены.

Компромиссное решение для низкопроизводительных мобильных аппаратных платформ было предложено в 2005 г. Хиршмюллером [10] и получило название полуглобального метода обработки стереоизображений SGM (Semi-Global Matching).

Полуглобальные подходы предлагают наилучший компромисс между точностью и скоростью. Они эффективно вычисляют глобальную карту из начальных локальных затрат, упрощая затраты на гладкость, чтобы ее можно было оптимизировать по разным направлениям отдельно. Принципы SGM были внедрены в основные программные инструменты по-

лучения карт глубины, включая библиотеки OpenCV, MATLAB, и до настоящего времени существующие модификации алгоритма SGM используются в различных приложениях и встраиваются как в экспериментальные образцы на базе FPGA [11], так и в ПО портативных серийных устройств, таких как Intel RealSense, OAK-D, ZED Mini и др.

Глобальные алгоритмы и нейронные сети

Однако за последние 10 лет объем публикаций, посвященных локальным и полуглобальным методам, заметно убавился, особенно в связи с широким распространением методов искусственного интеллекта (ИИ). Первоначально методы ИИ были весьма громоздкими и сопровождалась высокими требованиями как к вычислительным ресурсам, так и к объему используемой памяти.

Глобальные методы оценки глубины по стереопарам обычно решают задачу оптимизации, минимизируя глобальную целевую функцию, содержащую данные и условия гладкости [12], в то время как

локальные методы учитывают только информацию о соседях [13], обрабатывая снимки намного быстрее, чем глобальные методы [14]. Хотя традиционные методы совершенствовались и достигли значительного прогресса, они все еще страдают в сложных ситуациях, таких как области без текстуры, повторяющиеся узоры и тонкие структуры.

По мере роста эффективности микропроцессоров стало возможным внедрять алгоритмы глубокого обучения и в системы обработки реального времени. Первое время использование алгоритмов нейронных сетей сопровождалось определенными трудностями. С одной стороны, широко используемые алгоритмы глубокого обучения имеют много общих характеристик, их проще формализовать, что упрощает задачу проектирования, тогда как традиционные алгоритмы весьма разнообразны и заметно разнятся. С другой стороны, реализация методов глубокого обучения требует большей производительности процессора, чем обычные алгоритмы обработки видеосигналов. Тем не менее, согласно работе [15], уже в 2019 г. примерно треть разработчиков использовала алгоритмы глубокого обучения. На рис. 5 показана тенденция изменения объемов поставок оборудования для видеонаблюдения со встроенной видеоаналитикой, в том числе с использованием методов глубокого обучения. По мнению

64% камер со встроенной функцией анализа на базе глубокого обучения будет использоваться на практике к 2025 г.

лидера рынка исследований – компании Omdia, ожидается, что к 2025 г. число камер со встроенной функцией анализа на базе глубокого обучения достигнет 64% от общего числа продаваемых в мире.

Методы, основанные на обучении, используют глубокие нейронные сети для получения надежных представлений данных, достигая многообещающих результатов даже в самых сложных ситуациях. Так, нейросеть DispNetC [16] создает первую сквозную обучаемую структуру для оценки несоответствия, где слой корреляции используется для измерения сходства левых и правых характеристик изображения. Нейросеть GC-Net [17] использует другой подход, напрямую объединяя левый и правый объекты, и, таким образом, использует 3D-свертки для агрегирования результирующего 4D-объема затрат. Нейросеть PSM-Net [18] дополнительно улучшает GC-Net, вводя больше трехмерных сверток для агрегирования затрат и, соответственно, обеспечивая более высокую точность. Несмотря на то что с помощью 3D-сверток можно достичь

Экономичный и миниатюрный высокопроизводительный блок визуальной обработки предоставляет возможность вычислений в режиме реального времени в составе ряда потребительских и промышленных периферийных устройств.

самых современных характеристик, высокие вычислительные затраты и потребление памяти делают их развертывание на практике довольно затратным. Семейство глубоких сетей 2D-архитектуры (DispNet-C, MADNet, SENSE, SegStereo и др.) ближе к нейронным моделям, предназначенным для решения таких задач плотной регрессии, как семантическая сегментация [19], оптический поток [20] или монокулярная оценка глубины [21]. В этих архитектурах обычно используется конструкция кодер-декодер, вдохновленная моделью UNet [22], чтобы сократить требования к памяти и времени выполнения. Благодаря эффективности операций двумерной свертки на современных графических процессорах, некоторые из этих моделей достигают скоростей от нескольких кадров до десятков в секунду за счет незначительной потери точности.

Недостаток 3D-архитектуры таких нейросетей, как HSM, StereoNet, DeepPruner, PSMNet, по сравнению с 2D-моделями заключается в ощутимых производственных затратах, требуемых даже для вычисления единичных кадров глубины. В среднем 3D-сети имеют примерно на порядок более высокие требования к памяти и времени выполнения задачи из-за присутствия в расчетах третьего измерения.

Однако попытки экономии ресурсов привели к оптимизации в том чис-

ле 3D-моделей, что вылилось в создание модели реального времени StereoNet [23], в которой для ускорения вычислений за счет небольшой потери точности используется 8-кратное понижение частоты дискретизации при создании стоимостного объема с очень низким разрешением.

Авторы [24] решили полностью заменить широко используемые трехмерные свертки для достижения высокой скорости логического вывода при сохранении неизменной точности. С этой целью они применили метод внутримасштабной агрегации затрат на основе разреженных точек и аппроксимации алгоритма кросс-масштабной агрегации для обработки больших областей без текстур, что позволило им ускорить существовавшие ранее модели в 40 и более раз.



Сегодня известны разнообразные примеры использования алгоритмов нейронных сетей на базе портативных вычислителей в мобильных устройствах. Так, нейронный вычислитель Intel® Movidius™ (NCS), обучающий модели совместно с другим процессором режима реального времени – Intel® Movidius™ VPU (Vision Processing Unit), поддерживает библиотеки с открытым исходным кодом TensorFlow, Caffe, MXNet, Kaldi, а также ONNX для глубоких нейронных сетей. Intel® Movidius™ позволяет запускать модели глубокого обучения, такие как SqueezeNet и GoogLeNet, даже на компьютере с низкой пропускной способностью.

В итоге экономичный и миниатюрный высокопроизводительный блок визуальной обработки Intel® Movidius™ (VPU)

фактически предоставляет возможность вычислений в режиме реального времени в составе ряда потребительских и промышленных периферийных устройств, работающих от батарей, таких как Google Clips, DJI Spark drone, Motorola 360 camera, HuaRay industrial smart cameras и многих других.

Одним из распространенных способов повышения скорости обработки стало использование бинарных нейронных сетей BNN (Binary neural networks), а встраивание их в архитектуру ПЛИС дополнительно ускорило этот процесс [25], поскольку ПЛИС прекрасно подходят для реализации моделей BNN, благодаря тому, что бинарные операции могут отображаться и выполняться на логической структуре на основе LUT в мас-



Изображение: roboticsandautomationnews.com

сово-параллельном режиме. Пониженные требования к объему используемой памяти также помогают, ведь FPGA, как правило, имеют ограниченную емкость SRAM (Static Random-Access Memory) на кристалле. Для снижения вынужденной потери точности в работе [26] предложен алгоритм FracBNN, который использует дробные активации для повышения точности стандартных BNN.

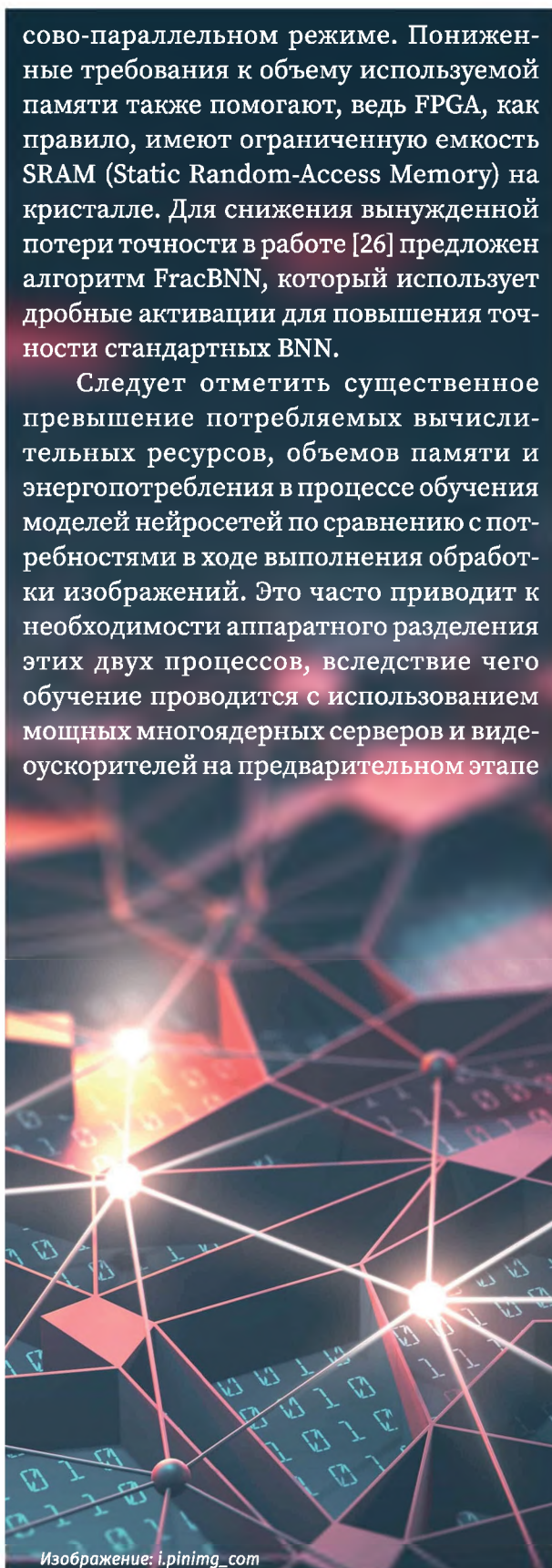
Следует отметить существенное превышение потребляемых вычислительных ресурсов, объемов памяти и энергопотребления в процессе обучения моделей нейросетей по сравнению с потребностями в ходе выполнения обработки изображений. Это часто приводит к необходимости аппаратного разделения этих двух процессов, вследствие чего обучение проводится с использованием мощных многоядерных серверов и видеоускорителей на предварительном этапе

применения глобальных алгоритмов, а выполнение обученных алгоритмов осуществляется во встроенном ПО периферийных устройств.

Одним из наиболее известных готовых решений для запуска обученных нейронных сетей на ПЛИС является Intel OpenVINO toolkit [27] – набор библиотек и средств оптимизации для разработки программного обеспечения с использованием компьютерного зрения и глубокого обучения. В работе [28] представлена библиотека FINN, позволяющая запускать бинарные нейронные сети на ПЛИС производства Xilinx. С целью повышения точности распознавания авторы статьи [29] представили комплекс библиотек для обучения бинарных нейронных сетей и разработки эффективных ускорителей для их выполнения на ПЛИС.

Открытый проект Hastlayer преобразует произвольные сборки .NET в низкоуровневый код для FPGA процессоров, обеспечивая максимальный параллелизм и низкое энергопотребление [30]. Его курирует компания Lombiq Technologies, занимающаяся веб-разработкой с использованием открытых технологий Microsoft. Среди известных разработок компании система Orchard CMS. Hastlayer доступен в Azure Marketplace и Microsoft AppSource. Проект предназначен для платформы .NET, которая открыта и не привязана к Microsoft. Одно из преимуществ .NET заключается в том, что для написания программного обеспечения можно использовать большое количество языков программирования, потому что все программы, написанные на любом языке, будут преобразованы (скомпилированы) в один и тот же язык CIL.

Проект Hastlayer обрабатывает CIL-сборки и преобразовывает в конфигурацию для FPGA-процессора и, таким образом позволяет создавать свои программы



Изображение: i.pinitmg.com

не только на C#, но и на других языках программирования, таких как C++, Python, PHP, даже на JavaScript.

Средства оценки точности работы алгоритма и обучения моделей нейросетей

Различные варианты выполнения аппаратно-программных средств обработки стереоизображений различаются не только скоростью получения выходных данных (в кадрах/секунду) и разрешающей способностью видеопотока, но и точностью формируемой карты глубины, которую необходимо оценивать и сравнивать. Корректное сравнение качества получаемых карт диспаратности возможно лишь при тестировании различных технических решений на одних и тех же входных данных, а результаты оценки должны формироваться в числовом представлении. Для этих целей на протяжении нескольких лет создавались различные наборы данных стереофотографий [31], каждая пара которых сопровождается эталонной информацией о глубине сцены, сформированной с высокой точностью с использованием различных методологий, таких как, например, технология LIDAR (laser imaging detection and ranging). Наиболее известными наборами данных, именуемыми в различных источниках как Datasets, Benchmarks, Validation Sets и т.п., являются архивы, сформированные как на реальных кадрах объектов (KITTI2012, Middlebury, KITTI2015, ETH3D, Freiburg SceneFlow и др.), так и на наборах, подготовленных на основе синтезированных данных (FlyingThings3D, Monkaa, MPI-Sintel, CARLA и др.).

Поскольку оценка глубины не является проблемой классификации, наборы данных для оценки глубины используют числовые метрики ошибок, такие как: RMSE (Root Mean Square Errors), AbsRelEr-

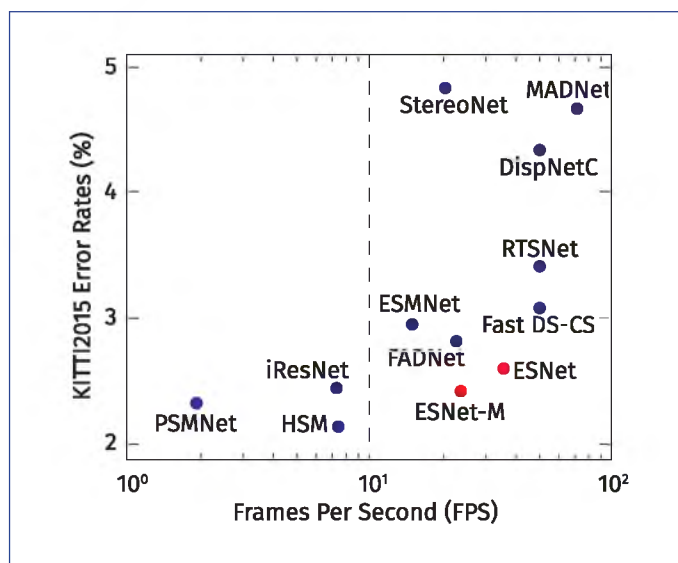


Рис. 6. Соотношение точности и быстродействия ряда алгоритмов, проведенных по набору данных KITTI2015

ror, EPE (End-Point-Error), D1-bg%, D1-fg%, D1-all% и др., каждая из которых адаптирована под определенную методику сравнения алгоритмов и аппаратуры [31].

На рис. 6 представлен пример оценки точности и быстродействия для некоторых алгоритмов, полученный по набору KITTI2015.

Наиболее успешные алгоритмы сочетают высокое быстродействие с повышенной точностью и располагаются в правом нижнем углу координатной плоскости.

В результате подробного анализа результатов измерений получают сравнительные таблицы для каждого из наборов стереоснимков [31] (табл. 1 и 2).

Среди победителей в большинстве эталонных тестов оказываются сквозные модели нейросетей [32], которые к тому же дают многообещающие результаты на наиболее сложных наборах данных.

Выяснилось, что на результаты сравнения алгоритмов влияют многочисленные факторы, среди которых изменение качества изображений и уровня шумов камеры, условий освещения или насы-

Таблица 1

Результаты сравнения для наборов Middlebury и ETH3D

Метод	Архитектура	KITTI2015			
		D1-bg%(↓)	D1-fg%(↓)	D1-all%(↓)	Время, с
CSPN	3D	1,51	2,88	1,74	1,00
GA-Net	3D	1,48	3,46	1,81	1,80
HD3-Stereo	2D	1,70	3,63	2,02	0,14
EMCUA	3D	1,66	4,27	2,09	0,90
GWC-Net	3D	1,74	3,93	2,11	0,32
SSPCV-Net	3D	1,75	3,89	2,11	0,90
HSM	3D	1,80	3,85	2,14	0,14
DeepPruner	3D	1,87	3,56	2,15	0,18
DispNet-CSS	2D	1,92	3,32	2,16	0,25
AutoDispNet-CSS	2D	1,94	3,37	2,18	0,90
SENSE	2D	2,07	3,01	2,22	0,32
SegStereo	2D	1,88	1,07	2,25	0,60
StereoDRNet	3D	1,72	4,95	2,26	0,23
PSMNet	3D	1,86	4,62	2,32	0,41
ECA	3D	2,14	3,45	2,36	0,22
iResNet	2D	2,25	3,40	2,44	0,27
PDSNet	3D	2,29	4,05	2,58	0,50
EdgeStereo	2D	2,27	4,18	2,59	0,27
CRL	2D	2,48	3,59	2,67	0,47
GC-Net	3D	2,21	6,16	2,87	0,90
CNN+CRF	2D + CRF	–	–	3,61	1,30
MC-CNN-acrt	–	2,89	8,88	3,89	67,00
DispNet-C	2D	4,32	4,41	4,34	0,06
MADNet	2D	3,75	9,20	4,66	0,02
StereoNet	3D	4,30	7,45	4,83	0,02
OASM-Net	3D	6,89	19,42	8,98	0,73
OpenCV-SGBM	–	8,92	20,59	10,86	1,10

ценности яркости. Часто оценка зависит от того, на каких визуальных наборах модель обучалась. Так, наиболее достоверное сравнение различных подходов проведено в работе [33], для чего авторы работы переобучали сравниваемые модели на одних и тех же наборах данных перед началом проведения оценок. Кроме того, многие разработчики для удобства стро-

ят обучение на синтетических наборах, которые не способны моделировать перечисленные выше особенности съемки реальной окружающей среды. Некоторое преимущество оказалось у алгоритмов, обладающих способностью самоадаптации, что поднимает качество их результатов за счет устранения разрывов при смещении областей.

Таблица 2

Результаты сравнения для наборов Middlebury 2014 и ETH3D

Метод	Архитектура	Middlebury 2014			ETH3D	
		Разрешение	bad 2,0%(↓)	avg.px (↓)	bad 1,0%(↓)	avg.px (↓)
MC-CNN-acrt	–	H	8,08	3,82	–	–
HSM	3D	F	10,20	2,07	4,00	0,28
CNN+CRF	2D+CRF	H	12,50	–	–	–
SGM	–	H	18,40	5,32	10,08	0,50
EdgeStereo	2D	F	18,70	2,68	–	–
DispNet-C SS	2D	H	22,80	4,04	2,69	0,22
iResNet	2D	H	22,90	3,31	3,68	0,24
StereoDRNet	3D	–	–	–	4,46	0,27
DeepPruner	3D	Q	30,10	4,80	3,52	0,26
PSMNet	3D	Q	42,10	6,68	5,02	0,33

Очевидно, созданные для тестирования наборы данных, помимо проведения оценок, полезно использовать и для обучения разработанных алгоритмов, чем и пользуются разработчики нейросетевых подходов как с 2D-, так и с 3D-архитектурами. При этом обучение алгоритмов, встраиваемых в портативные мобильные устройства, целесообразно проводить предварительно на базе мощных вычислительных кластеров со встроенными ускорителями или с использованием высокопроизводительных облачных решений, а после обучения переносить на мобильные устройства для выполнения задач обработки видеопотока.

Перспективы совершенствования технического зрения

Развитие технологий в области СТЗ продолжается, производители микроэлектроники периодически объявляют о новых направлениях в области создания вычислительных средств обработки изображений. Несколько лет назад в IBM Research предложили использовать

Очевидно, созданные для тестирования наборы данных, помимо проведения оценок, полезно использовать и для обучения разработанных алгоритмов, чем и пользуются разработчики.

аналоговые CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) для RPU (Resistive Processing Units), которые позволяют хранить обрабатываемые данные также в аналоговом виде и существенно повысить общую эффективность процедуры [34].

Также, помимо использования аналоговой памяти, обычно существенно повышает скорость вычислений снижение точности нейросети, являющееся ключом к миниатюризации RPU, а значит, к увеличению числа вычислительных ячеек на кристалле. И здесь IBM также в лидерах, они вполне успешно, до 2-битной точности, огрубил сеть и собираются довести точность до однобитной

(и двухбитной при тренировках), что потенциально позволит в 100 раз поднять производительность по сравнению с современными GPU [35].

В оптимизации численных методов на очереди стоит альтернативная арифметика, наподобие цепных логарифмов (continued logarithms). Их особенность в том, что элементарные операции совершаются параллельно, придавая заметное ускорение, а также позволяя получать произвольную точность. В статьях на эту тему указывается, что применение арифметики на цепных логарифмах в 100 МГц FPGA показывало ускорение в 6 раз, что эквивалентно выполнению задачи на 600-мегагерцевом процессоре [36].

Выводы

В настоящей работе проведен обзор существующих в мире аппаратных средств и программных решений автономных мобильных систем технического зрения, основанных на методе стереосопоставления визуальных потоков, при обработке которых имеются ограничения как по производительности вычислителей и объему бортовой памяти, так и по энергозатратам при заданных пределах массогабаритных характеристик. Их повсеместное внедрение и совершенствование способствует повышению уровня безопасности путем усиления надежного контроля состояния окружающего пространства и мгновенного принятия решения в случае возникновения критической ситуации.

Учитывая современные тенденции развития микроэлектроники и непрерывного появления новых методов обработки видеоконтента с оптимизацией вычислений для встраивания в новое поколение энергоэффективных модулей, можно сделать следующие выводы:

1. Появилось достаточное разнообразие микроэлектронных миниатюрных микросхем, таких как FPGA, обладающих сетью из нескольких миллионов последовательно-параллельных программируемых блоков, многоядерных микропроцессоров, специализированных нейроморфных чипов или видеообработывающих ASIC, способных вмещать в себя программные продукты, включая глубокие нейросетевые, заранее обученные алгоритмы.

2. Отдельные современные компактные вычислительные модули сегодня способны в реальном времени непрерывно обрабатывать значительные потоковые данные и обладают возможностями, которые еще несколько лет назад вмещали в себя лишь громоздкие суперкомпьютеры.

3. Непрерывное совершенствование алгоритмов стереосопоставления и моделирования объектов 3D-сцены позволяет существенно увеличивать скорость получения выходных данных без заметного снижения их качества.

4. Повсеместное развитие программных сред с использованием языков высокого уровня позволяет сократить время разработки программного обеспечения для широкого спектра аппаратных средств реализации.

5. Традиционные локальные алгоритмы стереосопоставления изображений постепенно уступают место обучаемым нейросетевым подходам даже в мобильных устройствах с относительно небольшими массогабаритными характеристиками.

6. Большое влияние на качество получаемого после обработки результата в нейросетевых решениях оказывает уровень обучения моделей, что можно осуществлять на базе мощных вычислительных кластеров со встроенными ускорителями или с использованием высокопроизводительных облачных решений.

Список литературы

1. Survey of FPGA-Based Vision Systems for Autonomous Cars / D. Castells-Rufas [et al.] // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 132525–132563.
2. Scharstein D., Szeliski R. A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms // In International Journal of Computer Vision 47. 2002. P. 7–42. Doi: 10.1023/A:1014573219977.
3. Hamzah R.A., Ibrahim H. Literature survey on stereo vision disparity map algorithms // J. Sensors. 2016. Vol. 2016. P. 1–23.
4. Du X., El-Khamy M., Lee J. AMNet: Deep atrous multiscale stereo disparity estimation networks. 2019. ArXiv:1904.09099.
5. Lowe D.G. Object recognition from local scale-invariant features // Proc. Intern. Conf. Computer Vision. 1999. Vol. 2. P. 1150–1157.
6. Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L. Surf: Speeded up robust features // 9th European Conf. Computer Vision. 2006. Pt. 1. P. 404–417.
7. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF 2011 / R. Ethan [et al.]. URL: http://www.willowgarage.com/sites/default/files/orb_fnal.pdf (дата обращения: 06.04.2023).
8. Вяткин С.И., Долговесов Б.С. Метод реконструкции функционально заданных поверхностей по стереоизображениям реальных объектов // Автометрия. Т. 56, № 6. С. 19–26.
9. Real-time multi-window stereo matching algorithm with fuzzy logic / Héctor-Daniel Vázquez-Delgado [et al.]. URL: <https://doi.org/10.1049/cvi2.12031> (дата обращения: 06.04.2023).
10. Hirschmüller H. Accurate and efficient stereo processing by semiglobal matching and mutual information // Computer Vision and Pattern, Recognition. 2005. N 2. P. 807–814.
11. Grabowski M., Kryjak T. Real-time FPGA implementation of the Semi-Global Matching stereo vision algorithm for a 4K/UHD video stream. ArXiv:2301.04847v1.
12. Kolmogorov V., Zabih R. Computing visual correspondence with occlusions using graph cuts // Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. 2001. Vol. 2. P. 508–515.
13. Fast cost-volume filtering for visual correspondence and beyond / A. Hosni [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2012. Vol. 35(2). P. 504–511.
14. A revisit to cost aggregation in stereo matching: How far can we reduce its computational redundancy? / D. Min [et al.] // In 2011 International Conference on Computer Vision. P. 1567–1574.
15. Anytime stereo image depth estimation on mobile devices / Y. Wang [et al.] // In 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). P. 5893–5900.
16. A large dataset to train convolutional networks for disparity, optical flow, and scene flow estimation / N. Mayer [et al.] // In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016. P. 4040–4048.
17. End-to-end learning of geometry and context for deep stereo regression. In Proceedings of the / A. Kendall [et al.] // IEEE International Conference on Computer Vision. 2017. P. 66–75.
18. Chang J.-R., Chen Y.-S. Pyramid stereo matching network // In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018. P. 5410–5418.
19. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation / L.-C. Chen [et al.] // In ECCV. 2018.
20. AFlowNet: Learning optical flow with convolutional networks / A. Dosovitskiy [et al.] // In ICCV. 2015. P. 2758–2766.
21. Deep ordinal regression network for monocular depth estimation / H. Fu [et al.] // In CVPR. 2018.
22. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // In International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. 2015. P. 234–241.
23. Guided hierarchical refinement for real-time edge-aware depth prediction / S. Khamis [et al.] // In Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). 2018. P. 573–590.
24. Xu H., Zhang J. AANet: Adaptive Aggregation Network for Efficient Stereo Matching // In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2020. P. 1956–1965.
25. FINN: A Framework for Fast, Scalable, Binarized Neural Network Inference / Y. Umuroglu [et al.] // Int'l Symp. on Field-Programmable Gate Arrays (FPGA). 2017.
26. FracBNN: Accurate and FPGA-Efcient Binary Neural Networks with Fractional Activations / Y. Zhang [et al.] // In Proceedings of the 2021 ACM/SIGDA. 2021.
27. OpenVINO toolkit. URL: <https://software.intel.com/en-us/openvinotoolkit> (дата обращения: 26.03.2023).
28. Finn: A framework for fast, scalable binarized neural network inference / Y. Umuroglu [et al.] // Proceedings of the 2017 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays. ACM. 2017. P. 65–74.

29. *Ghasemzadeh M., Samragh M., Koushanfar F.* Rebnet: Residual binarized neural network // 2018 IEEE 26th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM). IEEE, 2018. P. 57–64.
30. High-level .NET software implementations of unum type I and posit with simultaneous FPGA implementation using Hastlayer / Z. Lehoczky [et al.] // CoNGA '18: Proceedings of the Conference for Next Generation Arithmetic. 2018. P. 1–7. URL: <https://doi.org/10.1145/3190339.3190343>.
31. *Poggi M., Batsos K., Mordohai P.* On the Synergies between Machine Learning and Binocular Stereo for Depth Estimation from Images: a Survey // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. DOI: 10.1109/TPAMI.2021.3070917.
32. A multi-view stereo benchmark with high-resolution images and multi-camera videos / T. Schops [et al.] // In CVPR. 2017. P. 3260–3269.
33. LAF-Net: Locally adaptive fusion networks for stereo confidence estimation / S. Kim [et al.] // In CVPR. 2019.
34. Analog architectures for neural network acceleration based on non-volatile memory / T. Patrick Xiao [et al.] // Applied Physics Reviews 7. 2020. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5143815>.
35. Bridging the Accuracy Gap for 2-bit Quantized Neural Networks (QNN) / J. Choi [et al.]. 2018. ArXiv:1807.06964v1.
36. Analysis of the Continued Logarithm Algorithm / P. Rotondo [et al.]. 2018. ArXiv:1801.10139v1.

References

1. Survey of FPGA-Based Vision Systems for Autonomous Cars / D. Castells-Rufas [et al.] // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 132525–132563.
2. *Scharstein D., Szeliski R.* A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms // In International Journal of Computer Vision 47. 2002. P. 7–42. Doi: 10.1023/A:1014573219977.
3. *Hamzah R.A., Ibrahim H.* Literature survey on stereo vision disparity map algorithms // J. Sensors. 2016. Vol. 2016. P. 1–23.
4. *Du X., El-Khamy M., Lee J.* AMNet: Deep atrous multiscale stereo disparity estimation networks. 2019. ArXiv:1904.09099.
5. *Lowe D.G.* Object recognition from local scale-invariant features // Proc. Intern. Conf. Computer Vision. 1999. Vol. 2. P. 1150–1157.
6. *Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L.* Surf: Speeded up robust features // ECCV 2006: 9th European Conf. Computer Vision. 2006. Pt. 1. P. 404–417.
7. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF 2011 / R. Ethan [et al.]. URL: http://www.willowgarage.com/sites/default/files/orb_fnal.pdf (data obrashcheniya: 06.04.2023).
8. *Vyatkin S.I., Dolgovesov B.S.* Method of reconstruction of functionally defined surfaces by stereo images of real objects / Autometry. Vol. 56, N 6. P. 19–26.
9. Real-time multi-window stereo matching algorithm with fuzzy logic / Héctor-Daniel Vázquez-Delgado [et al.]. URL: <https://doi.org/10.1049/cvi2.12031> (data obrashcheniya: 06.04.2023).
10. *Hirschmuller H.* Accurate and efficient stereo processing by semiglobal matching and mutual information // Computer Vision and Pattern, Recognition. 2005. N 2. P. 807–814.
11. *Grabowski M., Kryjak T.* Real-time FPGA implementation of the Semi-Global Matching stereo vision algorithm for a 4K/UHD video stream. ArXiv:2301.04847v1.
12. *Kolmogorov V., Zabih R.* Computing visual correspondence with occlusions using graph cuts // Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. 2001. Vol. 2. P. 508–515.
13. Fast cost-volume filtering for visual correspondence and beyond / A. Hosni [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2012. Vol. 35(2). P. 504–511.
14. A revisit to cost aggregation in stereo matching: How far can we reduce its computational redundancy? / D. Min [et al.] // In 2011 International Conference on Computer Vision. P. 1567–1574.
15. Anytime stereo image depth estimation on mobile devices / Y. Wang [et al.] // In 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). P. 5893–5900.
16. A large dataset to train convolutional networks for disparity, optical flow, and scene flow estimation / N. Mayer [et al.] // In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016. P. 4040–4048.
17. End-to-end learning of geometry and context for deep stereo regression. In Proceedings of the / A. Kendall [et al.] // IEEE International Conference on Computer Vision. 2017. P. 66–75.
18. *Chang J.-R., Chen Y.-S.* Pyramid stereo matching network // In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018. P. 5410–5418.

19. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation / L.-C. Chen [et al.] // In ECCV. 2018.
20. AFlowNet: Learning optical flow with convolutional networks / A. Dosovitskiy [et al.] // In ICCV. 2015. P. 2758–2766.
21. Deep ordinal regression network for monocular depth estimation / H. Fu [et al.] // In CVPR. 2018.
22. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // In International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. 2015. P. 234–241.
23. Guided hierarchical refinement for real-time edge-aware depth prediction / S. Khamis [et al.] // In Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). 2018. P. 573–590.
24. Xu H., Zhang J. AANet: Adaptive Aggregation Network for Efficient Stereo Matching // In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2020. P. 1956–1965.
25. FINN: A Framework for Fast, Scalable, Binarized Neural Network Inference / Y. Umuroglu [et al.] // Int'l Symp. on Field-Programmable Gate Arrays (FPGA). 2017.
26. FracBNN: Accurate and FPGA-Efcient Binary Neural Networks with Fractional Activations / Y. Zhang [et al.] // In Proceedings of the 2021 ACM/SIGDA. 2021.
27. OpenVINO toolkit. URL: <https://software.intel.com/en-us/openvino-toolkit> (дата обращения: 26.03.2023).
28. Finn: A framework for fast, scalable binarized neural network inference / Y. Umuroglu [et al.] // Proceedings of the 2017 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays. ACM. 2017. P. 65–74.
29. Ghasemzadeh M., Samragh M., Koushanfar F. Rebnet: Residual binarized neural network // 2018 IEEE 26th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM). IEEE, 2018. P. 57–64.
30. High-level .NET software implementations of unum type I and posit with simultaneous FPGA implementation using Hastlayer / Z. Lehoczyk [et al.] // CoNGA '18: Proceedings of the Conference for Next Generation Arithmetic. 2018. P. 1–7. URL: <https://doi.org/10.1145/3190339.3190343>
31. Poggi M., Batsos K., Mordohai P. On the Synergies between Machine Learning and Binocular Stereo for Depth Estimation from Images: a Survey // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. DOI: 10.1109/TPAMI.2021.3070917.
32. A multi-view stereo benchmark with high-resolution images and multi-camera videos / T. Schops [et al.] // In CVPR. 2017. P. 3260–3269.
33. LAF-Net: Locally adaptive fusion networks for stereo confidence estimation / S. Kim [et al.] // In CVPR. 2019.
34. Analog architectures for neural network acceleration based on non-volatile memory / T. Patrick Xiao [et al.] // Applied Physics Reviews 7. 2020. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5143815>.
35. Bridging the Accuracy Gap for 2-bit Quantized Neural Networks (QNN) / J. Choi [et al.]. 2018. ArXiv:1807.06964v1.
36. Analysis of the Continued Logarithm Algorithm / P. Rotondo [et al.]. 2018. ArXiv:1801.10139v1.

Поступила в редакцию: 20.04.2022

Одобрена рецензентами: 25.06.2022

Принята к печати: 15.02.2023

Об авторах

Светлана Александровна Жукова – кандидат технических наук, сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики».

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

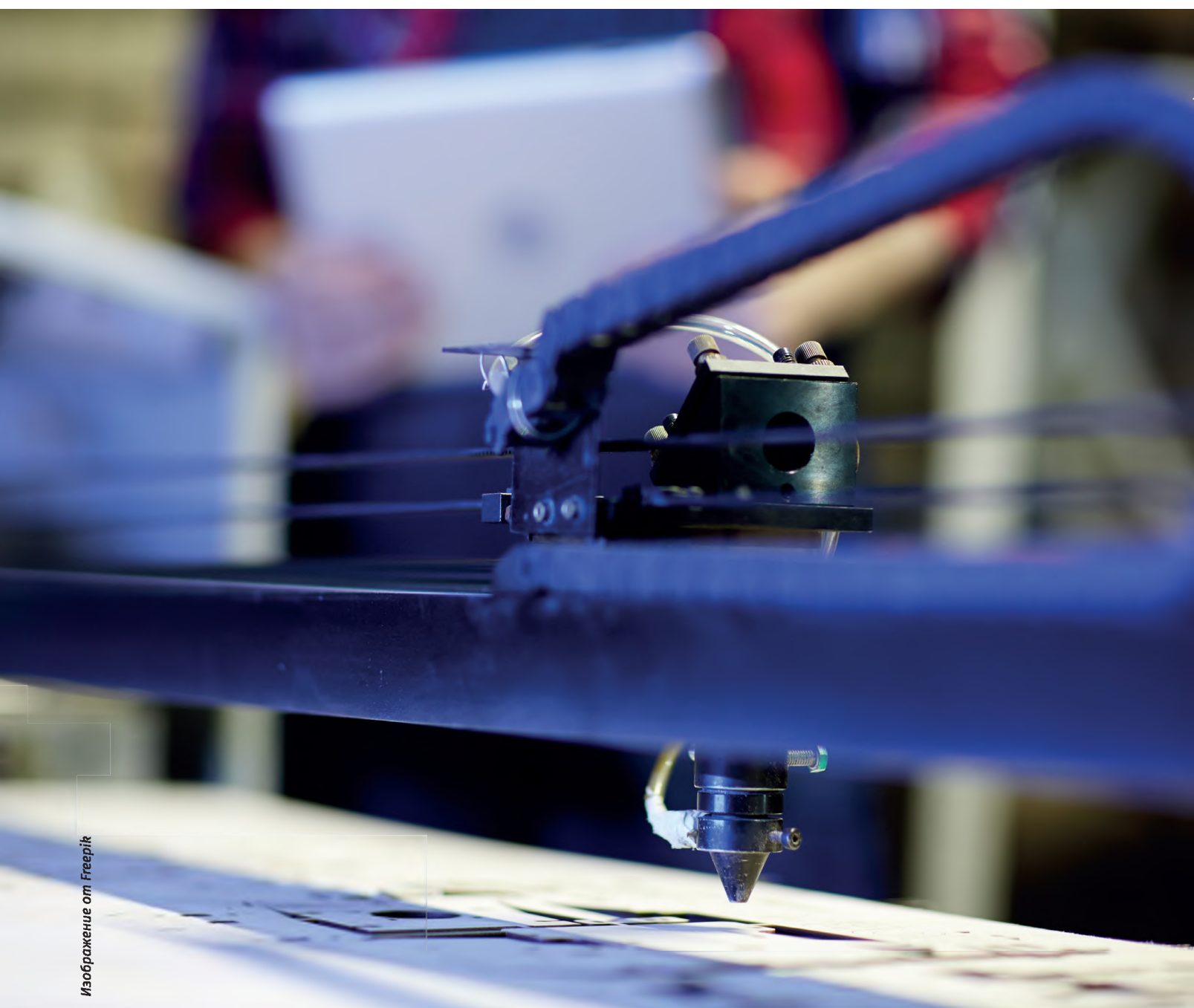
Игорь Владимирович Шашкин* – сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики». Адрес для почтовых отправлений: 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А. E-mail: ptsb@cniihm.ru (в теме указать «Для Шашкина И.В.»).

Igor V. Shashkin* – employee of the 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 subject of letter, specify «For Shashkin I.V.»).

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

УДК 621.9

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СОВРЕМЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ВООРУЖЕНИЯ



Изображение от Freerik

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

Аннотация. Рассмотрены различные виды аддитивных технологий и показаны перспективы их применения при изготовлении сложнопрофильных деталей для современных образцов вооружения и военной техники как в России, так и за рубежом; отмечены преимущества 3D-печати; описаны процессы аддитивного производства, позволяющие повышать качественные и количественные показатели полученных изделий.

Ключевые слова: АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ; ПРОЦЕССЫ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА; ВООРУЖЕНИЕ И ВОЕННАЯ ТЕХНИКА; СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫЕ ДЕТАЛИ; ЛАЗЕР; БОЕПРИПАСЫ; БЫСТРОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ; ПОРОШКОВЫЕ, ЖИДКИЕ И ЛИСТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ; ПОЛИМЕРНЫЕ И КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ; 3D-ПЕЧАТЬ.

Для цитирования: Егоров И.В., Щавелев П.А. Аддитивные технологии при производстве современных образцов вооружения // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 1. С. 52–69.

ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE PRODUCTION OF MODERN WEAPONS

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

Abstract. In article there are various types of additive technologies and the prospects for their application in the manufacture of complex-profile parts for modern weapons and military equipment both in Russia and abroad are shown; the advantages of 3D printing are noted; the processes of additive manufacturing are described, which allow to improve the qualitative and quantitative indicators of the obtained products.

Keywords: ADDITIVE TECHNOLOGIES; ADDITIVE MANUFACTURING PROCESSES; WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT; COMPLEX PROFILE PARTS; LASER; AMMUNITION; RAPID PROTOTYPING; POWDER, LIQUID AND SHEET MATERIALS; POLYMERIC AND COMPOSITE MATERIALS; 3D PRINTING.

For citation: Egorov I.V., Shchavelev P.A. Additive technologies in the production of modern weapons // Promising technologies for security systems. 2023. N 1. P. 52–69.

Введение

Приоритетным направлением развития современного производства является переход к передовым цифровым технологиям, где лидирующее положение в последние годы занимают аддитивные технологии. Неотъемлемой частью отечественного оборонно-промышленного

комплекса (ОПК) является производство сложнопрофильных деталей для современных видов вооружения и военной техники. В этой связи аддитивные технологии рассматриваются как перспективный и экономически эффективный метод изготовления деталей и изделий из них.

Аддитивные технологии (от англ. Additive Manufacturing) – используют метод 3D-печати или послойного добавления (additive) материала на основе данных трехмерных моделей. В этом заключается их отличие от традиционных способов получения изделий – с применением механической обработки, в ходе которой материал, напротив, удаляется из заготовки [1].

Цель исследования – систематизация знаний об аддитивных технологиях из различных открытых источников информации и выбор наиболее оптимального их вида с учетом особенностей в процессе производства сложнопрофильных деталей для образцов вооружения и военной техники.

Распространение и преимущества 3D-печати

В сравнении с традиционными способами обработки металлических изделий аддитивное производство имеет непродолжительную историю развития, поэтому долгое время оно не имело широкого распространения. Технология «трехмерной печати» (3D-печать) появилась в середине 1980-х гг. Первопроходцем в этой области является компания 3D Systems, которая разработала первую лазерную стереолитографическую машину – SLA

(от англ. Stereolithography Apparatus), а затем порошковую машину – SLS (от англ. Selective Laser Sintering). До середины 1990-х гг. они использовались главным образом в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности, связанной с оборонной промышленностью. Первые лазерные SLA-машины и SLS-машины были чрезмерно дорогими, а выбор модельных материалов – весьма скромный.

Широкое распространение цифровых технологий в области систем автоматизированного проектирования (CAD от англ. Computer-aided design), компьютерного моделирования и инженерных расчетов (CAE от англ. Computer-aided engineering) и автоматизированной технологической подготовки производства (CAM от англ. Computer-aided manufacturing) стимулировало взрывной характер развития технологий 3D-печати. В настоящее время крайне сложно указать область материального производства, где в той или иной степени не применялись бы 3D-принтеры – станки с числовым программным управлением, реализующие только аддитивные операции, то есть добавляющие порции материала к заготовке [2].

Аддитивные технологии наиболее перспективны при использовании в следующих отраслях: оборонной, космической, медицине, товарах широкого потребления, а также в отраслях, в которых дизайн изделий часто меняется. Таким образом, степень вовлеченности аддитивных технологий в различные отрасли производства с каждым годом увеличивается. Перспектива развития рынка аддитивных технологий к 2025 г. показана на рис. 1 [3].

В настоящее время в России эффективно функционируют три центра аддитивных технологий (ЦАТ) [4]. В декабре 2020 г. в Москве был открыт ЦАТ «Роса-

В настоящее время крайне сложно указать область материального производства, где в той или иной степени не применялись бы 3D-принтеры – станки с числовым программным управлением, реализующие только аддитивные операции, то есть добавляющие порции материала к заготовке.

том», который стал первым промышленным 3D-производством в России, основанным на отечественных технологиях и оборудовании. Его уникальность заключается в совмещении участков сборки 3D-принтеров, печати, постобработки и лаборатории для исследования изделий и тестирования образцов. Второй ЦАТ работает на площадке НПО «Центротех» в Новоуральске с июня 2022 г. Открытие третьего ЦАТ на площадке ОКБМ им. И.И. Африкантова состоялось в Нижнем Новгороде в феврале 2023 г. В перспективе развитая сеть ЦАТ поможет обеспечить доступность продуктов и услуг 3D-печати для широкого круга заказчиков.

В июле 2021 г. Распоряжением Правительства РФ [5] была утверждена Стратегия, в которой определены основные направления государственной политики в сфере развития аддитивных технологий в нашей стране. Целью заявлено обеспечение активного роста российского рын-

ка аддитивных технологий (увеличение объемов оборудования, комплектующих и материалов, услуг и программного обеспечения) к 2030 г. К этому времени примерно 2/3 всех промышленных продуктов в мире будет изготавливаться с применением комплектующих, в составе которых есть изделия либо полностью, либо частично сделанные аддитивными методами.

Основными преимуществами аддитивных технологий являются:

быстрота изготовления продукта за счет отказа от традиционных методов разработки деталей и перехода к цифровому проектированию;

создание сложнопрофильных деталей, которые невозможно или крайне сложно изготовить с помощью механической обработки;

оперативное внесение изменений в конструкцию детали на любой стадии производства;

широкий ассортимент используемых материалов: полимеры, воски, фотополимеры, металлы, керамика.

Самыми популярными металлами, применяемыми в аддитивных технологиях, являются различные марки стали (нержавеющая, мартенситная, конструкционная, низко- и высоколегированная), никелевые, титановые, алюминиевые сплавы, на основе меди и сплав кобальт-хром.

Виды и категории аддитивных технологий

К наиболее распространенным видам аддитивных технологий (в порядке популярности) относят следующие [2, 6].

Цветная струйная печать (CJP от англ. ColorJet Printing) – самая популярная технология 3D-печати, основанная на послойном склеивании порошков и исполь-

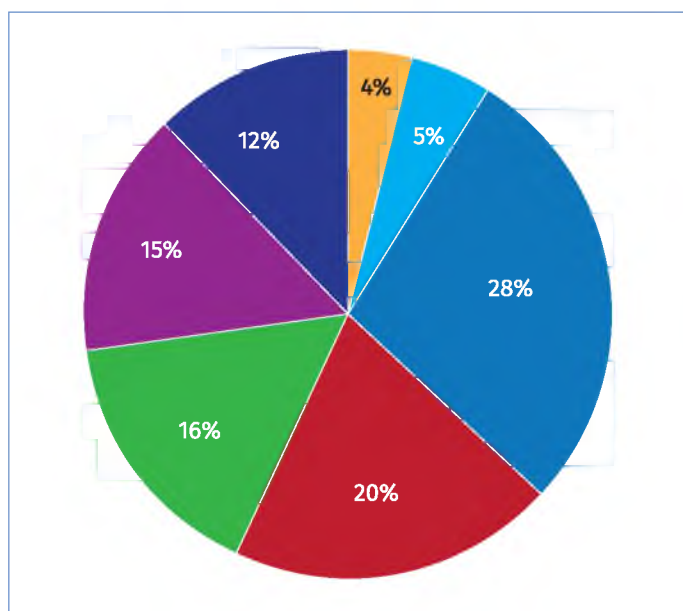


Рис. 1. Перспектива развития рынка аддитивных технологий к 2025 г. [3]: ■ – бытовая электроника; ■ – автомобилестроение; ■ – медицина; ■ – аэрокосмическая и авиационная промышленность; ■ – машиностроение; ■ – архитектура; ■ – прочее

зовании большого количества цветов. Другое название технологии InkJet.

Моделирование методом послойного наплавления (рис. 2) (FDM от англ. Fused Deposition Modeling) – одна из распространенных технологий создания 3D-объектов, основанная на послойном выращивании детали с помощью нагретой пластиковой нити из термопластичного или композитного материала.

Многоструйное моделирование (MJM от англ. MultiJet Modeling) или мультиструйная печать (MJP от англ. MultiJet Printing) – одна из фундаментальных технологий, основанная на послойном построении детали из термопластика, воска или фотополимера. В технической литературе ее иногда называют как PolyJet.

Лазерная стереолитография (SLA от англ. Laser Stereolithography) – одна из технологий быстрой печати (прототипирование), основанная на послойном отверждении жидкого фотополимера под действием ультрафиолетового излучателя.

Селективное лазерное плавление (SLM от англ. Selective Laser Melting) – наиболее быстроразвивающаяся техно-

логия, в которой для создания металлических деталей используется слой порошка, сплавляемый направленным лазерным лучом.

Селективное лазерное спекание (SLS от англ. Selective Laser Sintering) или прямое лазерное спекание металла (DMLS от англ. Direct Metal Laser Sintering) – метод аддитивного производства, который заключается в точечном спекании мелкодисперсного порошкового (обычно, металлического) материала с помощью лазерного луча.

3D-печать (3DP от англ. 3D-Printing) – технология, аналогичная технологии CJP, только здесь возможно использование широкого диапазона материалов (гипс, пластик, песчаные смеси и металлы), которые связываются жидкими связующими материалами с возможностью добавления красителей.

Электронно-лучевая плавка (EBM от англ. Electron Beam Melting) – технология, похожая на SLM/SLS/DMLS, только здесь объект формируется путем плавления металлического порошка электронным лучом в вакууме.

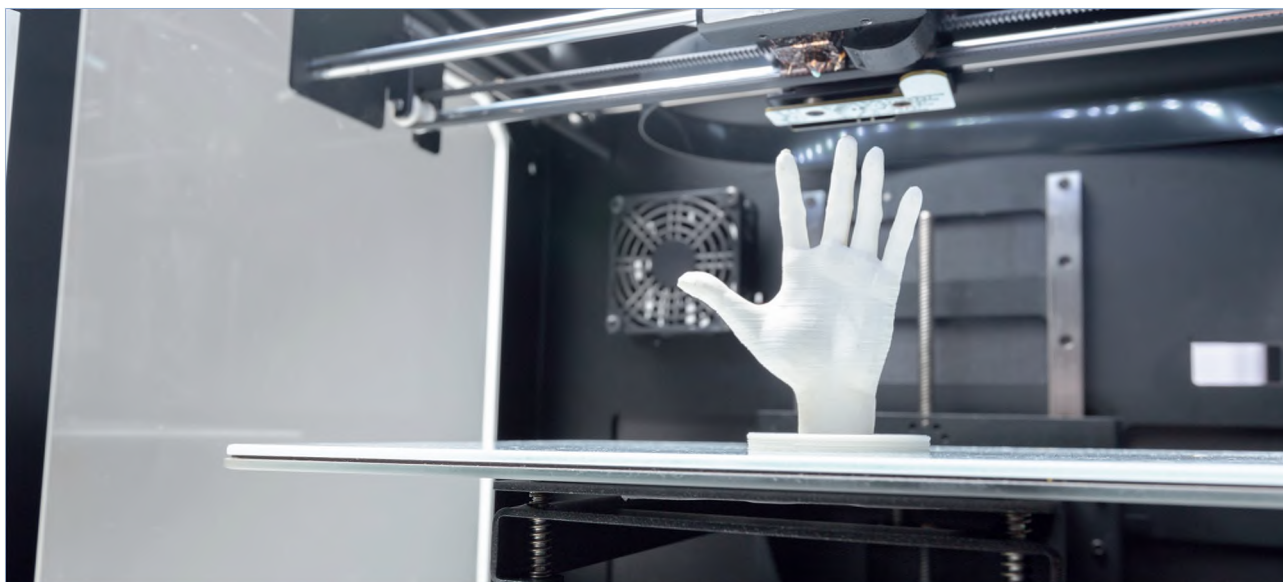


Рис. 2. Моделирование методом послойного наплавления. Изображение Freerik

Компьютерная осевая литография (CAL от англ. Computed Axial Lithography) – метод 3D-печати, основанный на компьютерной томографии для создания объектов из фотоотверждаемой смолы.

Изготовление объектов с использованием ламинирования (LOM от англ. Laminated Object Manufacturing) – технология, в которой объект формируется послойным склеиванием (нагревом, давлением) тонких пленок рабочего материала с вырезанием (с помощью лазерного луча или режущего инструмента) соответствующих контуров на каждом слое.

Ультразвуковое аддитивное производство (UAM от англ. Ultrasonic Additive Manufacturing) – технология, при которой тонкие металлические пластины сваривают с помощью ультразвука и затем «лишний» металл удаляют фрезерованием.

Все многообразие аддитивных технологий можно классифицировать, используя ключевое слово «материал» и его структурно-фазовое состояние [7]:

методы быстрого прототипирования с участием жидкой фазы (SLA, CAL);

твердофазные методы быстрого прототипирования (FDM, MJM, LOM);

методы быстрого прототипирования на порошковой основе (SLM, SLS, ZDP, EBM).

Рассмотрим более подробно вышеперечисленные виды аддитивных технологий.

СJP-технология (рис. 3) основана на склеивании порошка (основного материала). Обычно в качестве основного материала используется мелкодисперсный композитный порошок на основе гипса [8]. Платформа построения 2 опускается на величину толщины слоя модели, обычно равную 0,1 мм. Бункер с основным материалом 1 поднимается и выравнивающее устройство 5 распределяет основной материал ровным слоем толщи-

ной 0,1 мм по рабочей зоне платформы построения. Печатающая головка 6 перемещается по заданному программой маршруту, распределяя связующее вещество, склеивая и окрашивая только внешний край каждого слоя основного материала. Платформа построения опускается на величину толщины слоя модели, и процесс повторяется до полного завершения модели. Основным материалом в СJP-технологии служит не только как основа для построения модели, а также является поддерживающей структурой под нависающими элементами модели.

К основным преимуществам СJP-технологии относятся: высокая скорость печати, изготовление многоцветных моделей, возможность повторного использования неиспользованного материала, высокая точность, отсутствие поддержек в модели. Основным недостатком технологии является низкая прочность готовых моделей. В связи с этим обычно СJP-технологии используют в качестве демонстрационных макетов. При необходимости для увеличения прочности модели пропитывают цианоакрилатом, эпоксид-

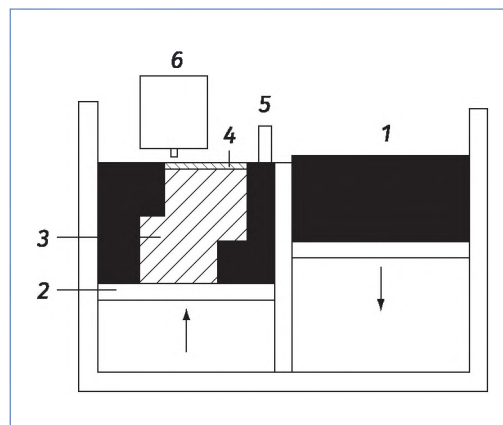


Рис. 3. Схематическое представление СJP-технологии: 1 – бункер с основным материалом; 2 – платформа построения; 3 – деталь; 4 – новый слой детали; 5 – выравнивающее устройство; 6 – печатающая головка

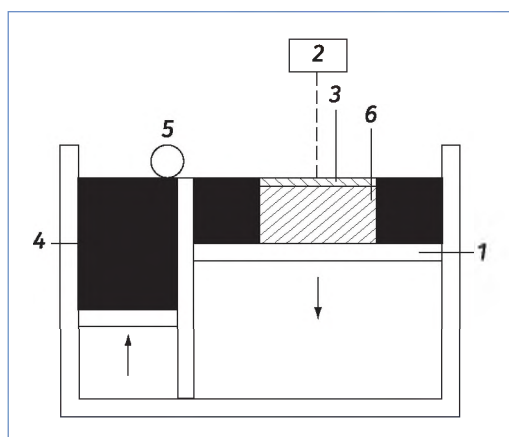


Рис. 4. Схематическое представление InkJet-технологии: 1 – платформа построения; 2 – печатающая головка; 3 – новый слой детали; 4 – платформа с материалом; 5 – вал; 6 – деталь

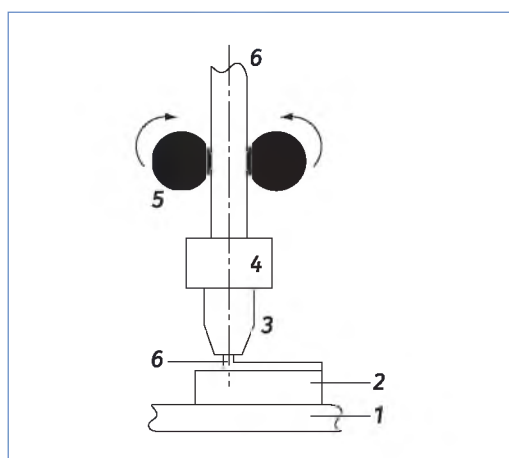


Рис. 5. Схематическое представление FDM-технологии: 1 – платформа построения; 2 – предыдущий слой модели; 3 – сопло; 4 – нагреватель материала; 5 – ролики подачи материала; 6 – материал

ной смолой, обрабатывают поверхности воском или смолой [9, 10].

InkJet-технология представляет собой послойное изготовление твердотельного изделия за счет формирования слоев из песка, связываемого полимерным связующим (рис. 4). На платформу построения 1 наносится связующее с помощью печатающей головки 2. Связующее на

платформе построения принимает вид нового слоя детали 3. Материал подается на платформу построения за счет подъема платформы с материалом 4 и разравнивается валом 5. Процесс повторяется до готовности модели. Поддерживающие элементы для нависающих элементов детали 6 не строятся. В качестве материала выступает смесь песка с отвердителем. Толщина слоя варьируется от 28 мкм до 0,5 мм. К недостаткам технологии можно отнести небольшой набор материалов.

FDM-технология предполагает (рис. 5) построение модели за счет сплавления слоев материала под воздействием высоких температур. В качестве материала чаще всего используются пластики (ABS, полилактид, поликарбонат, полиэтилентерефталат, поливинилацетат, нейлон, высокопрочный полистирол [11]), реже резиноподобные полимеры с невысокой температурой плавления (группу материалов обозначают FLEX).

Материал 6 в виде проволоки подается через нагреватель 4 печатающей головки за счет движения роликов 5. В нагревателе материал доводится до полужидкого состояния и подается через сопло 3, которое уменьшает диаметр материала. Таким образом, печатающая головка движется по маршруту, заданному программой, и соединяется с предыдущим слоем модели 2 или платформой построения, после чего происходит вертикальное перемещение платформы построения вниз на величину слоя, обычно от 0,2 до 0,3 мм. Процесс повторяется до готовности модели.

Для построения подвешенных элементов деталей и сложнопрофильных поверхностей часто используется материал поддержки, который может быть легко удален вручную или в специальных устройствах для удаления предназначенных для этой цели.

К основным преимуществам FDM-технологии можно отнести высокую производительность, широкий ассортимент, большой выбор цветов и небольшую стоимость оборудования и расходников. Основным же недостатком является чистота поверхности, выраженная в заметных линиях слоев. Однако за счет последующей постобработки возможно придать деталям необходимые качества поверхностей.

МЖМ-технология (рис. 6) позволяет изготавливать высокоточные детали любой сложности. В качестве материала применяются термопластики, воск или фотополимер. Первые два материала затвердевают за счет постепенного охлаждения. Каждый слой фотополимера обрабатывают ультрафиолетовым излучателем для затвердевания (полимеризации).

На платформу построения 1 или предыдущий слой детали 3 печатающая головка 5 через сопло 9 распределяет основной материал и материал поддержки по программе. В печатающую головку основной материал и материал поддержки поступают из картриджа материала поддержки 6 и картриджа основного материала 7 по специальным каналам. В случае использования фотополимера в качестве основного материала обязательно наличие ультрафиолетовой лампы 8 в печатающей головке для полимеризации. После полимеризации нового слоя детали 4 платформа построения опускается на величину слоя, обычно от 16 до 50 мкм. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет полностью построена модель.

Заключительный этап – удаление материала поддержки. Часто для этого используется специальный раствор, а в случае использования воска в качестве материала поддержки модель помещают в печь и нагревают до температуры 60 °С [12].

К основным преимуществам МЖМ-технологии можно отнести высокую

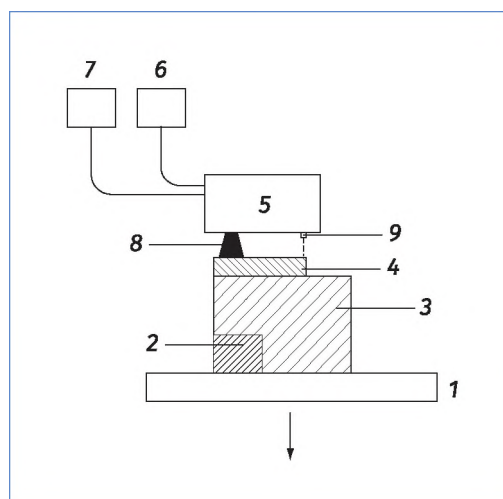


Рис. 6. Схематическое представление МЖМ-технологии: 1 – платформа построения; 2 – поддержка подвешенных элементов; 3 – деталь; 4 – новый слой детали; 5 – печатающая головка; 6 – картридж материала поддержки; 7 – картридж с основным материалом; 8 – ультрафиолетовая лампа; 9 – сопло

точность деталей, возможность создания тонкостенных деталей, простоту эксплуатации принтера, большой выбор цветов. К недостаткам – уязвимость деталей к воздействию солнечных лучей.

PolyJet-технология (или технология многоструйного напыления) схожа с МЖМ-технологией, однако в ней используется намного большее количество сопел в печатающей головке принтера, что уменьшает время изготовления деталей. Вторым отличием является большое количество доступных материалов – от твердых ударостойких до эластичных резиноподобных. К преимуществам PolyJet-технологии можно отнести: высокое качество и точность, большую скорость построения модели, широкий диапазон выбора материалов, а также возможность встраивания различных материалов в структуру друг друга. Основным недостатком PolyJet является высокая стоимость оборудования и материалов.

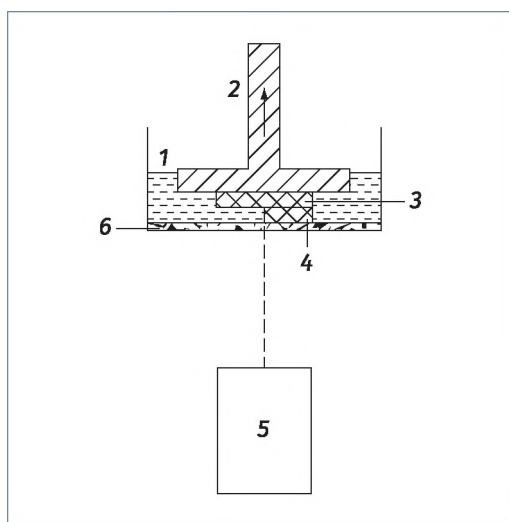


Рис. 7. Схематическое представление SLA-технологии (снизу вверх):
1 – жидкий полимер; 2 – платформа; 3 – деталь;
4 – новый слой детали;
5 – ультрафиолетовый излучатель; 6 – дно

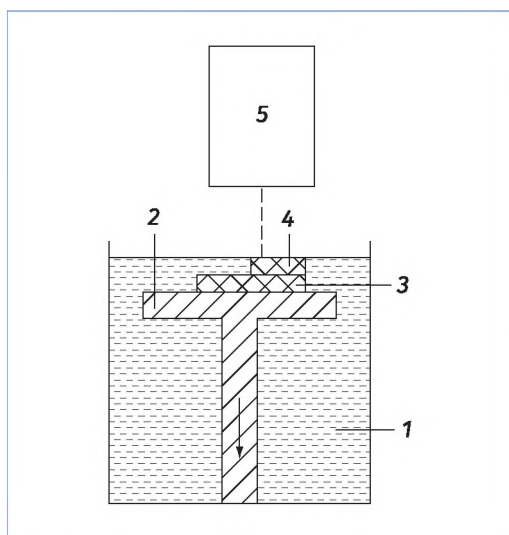


Рис. 8. Схематическое представление SLA-технологии (сверху вниз):
1 – жидкий полимер; 2 – платформа; 3 – деталь;
4 – новый слой детали;
5 – ультрафиолетовый излучатель

SLA-технология обеспечивает возможность создания детали путем селективного отверждения жидкого фотополимера под воздействием ультрафиолетового излучения. Процесс полимеризации

необратим, то есть полученные детали невозможно перевести обратно в жидкое состояние.

Принтеры, печатающие детали по SLA-технологии, выпускают двух типов: «снизу вверх» (платформа которых перемещается вверх), «сверху вниз» (платформа которых перемещается вниз).

Принцип работы принтеров SLA «снизу вверх» представлен на рис. 7. Их главная особенность заключается в том, что процесс печати инвертированный, перевернутый. Платформа 2 опускается в жидкий полимер 1 и приближается к прозрачной и неадгезионной (к ней ничто не прилипает) поверхности дна 6 на расстояние одного слоя, размер которого составляет от 0,025 до 0,3 мм [13]. Согласно программе на платформе или предыдущем слое детали 3 с помощью ультрафиолетового излучателя 5 формируется новый слой 4. Платформа поднимается на величину слоя детали, и процесс повторяется до полного построения модели. Тип SLA «снизу вверх» в основном используется в небольших принтерах.

Принцип работы принтеров SLA «сверху вниз» представлен на рис. 8. Главная особенность заключается в том, что платформа 2 в процессе печати детали всегда находится в жидком полимере 1. Сначала платформа поднимается к поверхности жидкого полимера и останавливается на расстоянии одного слоя, размер которого составляет от 0,025 до 0,1 мм. Ультрафиолетовый излучатель 5 полимеризует заданные согласно программе участки полимера, за счет чего формируется новый слой детали 4. Платформа опускается на величину слоя детали, процесс повторяется до момента полной готовности модели.

При печати моделей по SLA-технологии одного прохода ультрафиолетового излучателя недостаточно для полной

полимеризации слоя детали, а также для соединения его с ранее полимеризованным слоем, поэтому в программе рассчитывается и задается необходимое количество проходов ультрафиолетового излучателя. Часто сложнопрофильные детали, к точности которых предъявляются повышенные требования, подвергаются дополнительному ультрафиолетовому излучению в УФ-печи (камеры полимеризации) [14].

К преимуществам SLA-технологии можно отнести высокую точность, большой выбор цветов материала, гладкость поверхности. Среди недостатков самыми главными являются: хрупкость, уязвимость деталей к воздействиям солнечного света, возможность возникновения между слоями больших внутренних напряжений и токсичность не полностью отвержденной детали.

SLM-технология отличается лазерным плавлением металлических порошков, за счет чего, собственно, и получают деталь. Наиболее популярными материалами являются: нержавеющая и инструментальная сталь, титан и его сплавы, алюминий и его сплавы.

На рис. 9 представлен принцип работы принтера по SLM-технологии. Построение выполняется в камере, которая заполнена инертным газом (аргоном или азотом) [15]. Перед началом построения каждого слоя бункер с материалом 1 немного поднимается для высвобождения новой порции материала, а платформа построения 2 опускается на величину одного слоя детали, размер слоя составляет от 0,015 до 0,1 мм. Из бункера с материалом 1 с помощью выравнивающего устройства 6 металлический порошок перемещается на платформу построения, выравнивается, а излишки удаляются в бункер излишков 3. Плавление металлического порошка осуществляется ла-

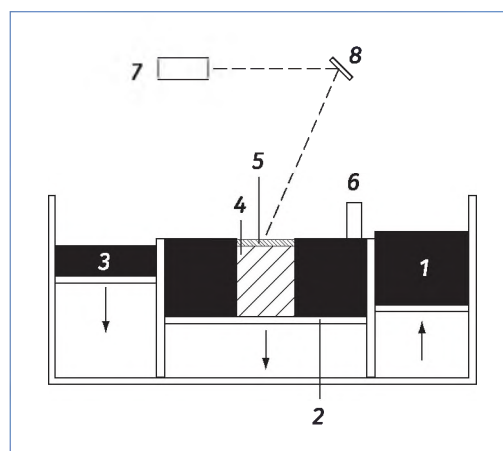


Рис. 9. Схематическое представление SLM-технологии: 1 – бункер с материалом; 2 – платформа построения; 3 – бункер излишков; 4 – деталь; 5 – новый слой детали; 6 – выравнивающее устройство; 7 – лазер; 8 – сканирующее зеркало XY

ром 7, луч которого по программе управляется сканирующим зеркалом XY 8.

Некоторым моделям, полученным по SLM-технологии, необходима минимальная постобработка, заключающаяся в следующих операциях: удаление конструкций поддержки, нарезание резьбы, снятие остаточных напряжений, улучшение качества поверхности.

К преимуществам SLM-технологии можно отнести: возможность изготовления деталей практически любой сложности, объединение нескольких простых деталей в одну сложную, заполнение всего поля печати деталями, широкий спектр выбора металлического материала. К недостаткам следует отнести высокую стоимость принтера и материалов, а также сложность в обслуживании.

SLS-технология основана на послойном спекании порошков пластика. В отличие от SLM-технологии, где лазер обеспечивает полную плавку частиц материала, здесь производится частичное плавление поверхности частиц, необходимое для их

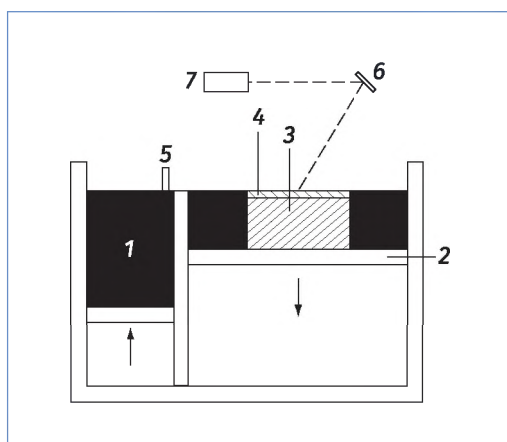


Рис. 10. Схематическое представление SLS-технологии: 1 – бункер с материалом; 2 – платформа построения; 3 – деталь; 4 – новый слой детали; 5 – выравнивающее устройство; 6 – сканирующее зеркало XY; 7 – лазер

спекания. В качестве материала используются следующие порошки [2, 16]: полистирол, полиамид, полиметилметакрилат, углеродное волокно, полипропилен, термопластичный полиуретан и другие. В настоящее время появляется множество новых порошков для SLS-технологии с различными свойствами – от гибких резиноподобных до прочных, а также электроизоляционных или химически стойких.

На рис. 10 представлен принцип работы принтера по SLS-технологии. Бункер с материалом 1 поднимается для подачи порошкового материала. Выравнивающее лезвие 5 распределяет порошковый материал по платформе построения 2. Лазер 7 с помощью движений сканирующего зеркала XY 6 спекает порошковый полимер, за счет чего образуется новый слой детали 4. После полного спекания слоя порошка платформа построения опускается на величину одного слоя, которая составляет от 0,05 до 0,2 мм. Бункер с материалом снова поднимает для подачи следующей порции порошка. Процесс повторяется до полного построения модели.

К преимуществам SLS-технологии обычно относят: повторное использование неиспользованного материала, отсутствие поддерживающих структур, высокая производительность, возможность расположения моделей по всему объему камеры, печать модели с подвижными частями. Основным недостатком SLS является зернистость поверхности и внутренняя пористость.

LOM-технология, подразумевающая поэтапное склеивание листов материала, представлена на рис. 11 [17]. Наиболее популярным материалом является полимерная пленка толщиной от 0,15 мм. Материал 1 подается в зону обработки из рулона конструкционного материала за счет вращения валов 2. По программе вырезается сечение лазером 3. Вырезанное сечение опускается на деталь 5 и нагретым валиком 4 производится спекание (ламинирование) двух слоев детали. В местах, которые склеивать не требуется, происходит нанесение специального вещества. Платформа построения 7 опускается на толщину слоя материала. Валы перемещают материал в зону обработки, а отработанный участок 6 – в отходы. Процесс повторяется до готовности модели. После окончания печати модель требует последующей постобработки. LOM-технология в качестве материала для печати использует пластик, металлическую фольгу, полимерную пленку, керамику, композит, бумагу.

К основным преимуществам LOM-технологии можно отнести: низкую себестоимость, широкий ассортимент используемых материалов. Основные недостатки: невысокая прочность (возможно расслоение), высокая шероховатость деталей, необходимость в постобработке.

CAL-технология, в отличие от других видов аддитивных технологий, не использует метод наложения слоев ма-

териала, что значительно сокращает время построения модели. Она создают модель с использованием серии 2D-изображений, проецируемых на цилиндр с материалом. CAL-технология предполагает одновременную печать всех точек внутри вращающегося цилиндра с материалом. В качестве материала используется фотополимер. Минимальный размер модели от 0,3 мм. К преимуществам технологии можно отнести скорость печати модели. Основным «минусом» на данный момент является недостаточная точность поверхностей, возможна неполная полимеризация модели [18].

UAM-технология является гибридной и предназначена для низкотемпературного ультразвукового аддитивного производства, разработанного компанией Fabrisonic. Установка Fabrisonic представляет собой фрезерный станок с ЧПУ, в который интегрирована запатентованная ультразвуковая сварочная головка. Сущность UAM-технологии заключается в том, что вибрирующие с высокой частотой ролики (обычно 20000 Гц) сваривают металлическую фольгу, а «лишний» металл удаляется фрезерованием [19]. Основные преимущества этого процесса заключаются в объединении разнородных металлов в одной детали и возможности создавать деталь со сложной внутренней геометрией.

Как видно из рассмотренных вариантов 3D-печати, аддитивное производство подразумевает технологии послойного выращивания деталей со сложной геометрической конфигурацией с использованием разнообразных источников выращивания модели. Эта уникальная особенность позволяет производить детали сложной формы практически без учета технологических ограничений и необходимости использования дорогостоящей оснастки.

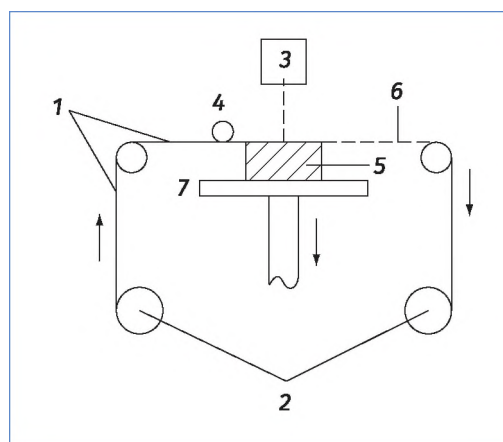


Рис. 11. Схематическое изображение LOM-технологии [17]: 1 – материал; 2 – валы; 3 – лазер; 4 – нагретый валик; 5 – деталь; 6 – отработанный участок; 7 – платформа построения

В соответствии с ГОСТ Р 57558-2017 процессы аддитивного производства подразделяются на 7 категорий:

струйное нанесение связующего (от англ. Binder Jetting) – процесс, в котором порошковые материалы соединяются выборочным нанесением жидкого связующего, например, *CJP-технология*;

прямой подвод энергии и материала (от англ. Directed Energy Deposition) – процесс, в котором энергия от внешнего источника используется для соединения материалов путем их сплавления в процессе нанесения, например, *SLM-технология*;

выдавливание материала (от англ. Material Extrusion) – процесс, в котором послойное нанесение расплавленного строительного материала подается через экструдер, например, *FDM-технология*;

струйное нанесение материала (от англ. Material Jetting) – процесс, в котором изготовление объекта осуществляют нанесением капель строительного материала, например, *MJM-технология*;

синтез на подложке (PBF от англ. Powder Bed Fusion) – процесс, в котором

энергия от внешнего источника используется для избирательного спекания (сплавления) предварительно нанесенного слоя порошкового материала, например, *SLS-технология*;

листовая ламинация (от англ. Sheet Lamination) – процесс, в котором изготовление объекта осуществляется послойным соединением листовых материалов, например, *UAM-технология*;

фотополимеризация в ванне (от англ. Vat Photopolymerization) – процесс, в котором жидкий фотополимер выборочно отверждается (полимеризуется) в ванне световым излучением, например, *SLA-технология*.

Во всех категориях в качестве источников тепловой энергии могут быть использованы: лазер, электронный луч, плазменная дуга, электрическая дуга или световое излучение, или связующее вещество вместо источника тепловой энергии. В качестве исходного материала

применяются порошковые, жидкие, проволоочные или листовые материалы.

Аддитивное производство можно рассматривать как самостоятельную отрасль и как вспомогательное производство, позволяющее в достаточной мере повысить качественные, количественные и экономические показатели производства продукции военного назначения.

Применение аддитивных технологий в России и за рубежом

В феврале 2015 г. в ГНЦ РФ ФГУП «ВИАМ» состоялась научно-практическая конференция «Аддитивные технологии в российской промышленности», в ходе которой представители различных предприятий ОПК выступили с докладами о перспективах развития и освоения аддитивных технологий в различных отраслях [20]. В одном из докладов было отмечено, что в ОАО «НПО «Прибор» осу-



ществлено применение аддитивных технологий в производстве элементов конструкций малокалиберных боеприпасов.

В ноябре 2016 г. Фонд перспективных исследований (ФПИ) и АО «ЦНИИТОЧМАШ» заявили об успешных испытаниях пуль, изготовленных с помощью SLM-технологии [21]. Были проведены испытания опытной партии пуль со сложной конструкцией, созданных с применением технологии послойного лазерного сплавления. Эта технология становится сегодня новой парадигмой высокотехнологичной металлургии: речь идет о быстром производстве с ускоренной разработкой узлов, деталей и конструкций. Как отмечают в фонде, результаты стрелковых экспериментов показали, что опытные образцы пуль существенно не уступают штатным патронам, обладают всеми необходимыми функциональными характеристиками и тем самым подтверждают возможность создания технологии промышленного изготовления боеприпасов с применением аддитивных технологий.

Перспективы 3D-печати в качестве инструмента для производства вооружения и военной техники практически безграничны. Разработкой подобных систем уже занимается компания Ultimaker. Не стоит забывать и о производстве военной техники прямо на поле боя. Как известно из работы [21], «Уралвагонзавод» ранее уже использовал 3D-принтеры американской компании Stratasys в прототипировании перспективных, не имеющих мировых аналогов танков Т-14 на базе универсальной гусеничной платформы «Амата».

ФПИ является отечественным аналогом DARPA и финансирует в первую очередь инновационные разработки для оборонной промышленности. Ранее специалисты ФПИ провели первые испыта-

ния «умных пуль» с корректируемой траекторией полета. По замыслу разработчиков, «умные пули» должны поражать цели на дистанции до 10 км. Наведение осуществляется с помощью микроэлектронной начинки.

Предполагается, что в ближайшем будущем с применением аддитивных технологий можно будет изготавливать на российском оборудовании любые сложнопрофильные детали для изделий с заданными функциональными характеристиками.

В январе 2021 г. на базе Брянского государственного технического университета был разработан метод изготовления танковой брони из проволоки [22]. При производстве брони аддитивная технология используется для плавления и осаждения исходного материала слой за слоем на подложку. Броня, изготовленная из проволок с помощью новой аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологии (АСУТ) 3D-печати, по механическим и эксплуатационным свойствам превосходит прокатную броню. Ее прочностные свойства в 1,5–2 раза превышают соответствующие свойства проката. Учеными создана опытная установка, включающая аддитивный модуль для выращивания изделий из проволоки электродуговым методом, субтрактивный модуль для обеспечения точности размеров за счет удаления стружки и упрочняющий модуль для структурирования, уплотнения и упрочнения за счет волнового деформационного воздействия. Используемая АСУТ состоит из следующих этапов: послойный синтез материала навариванием (один или несколько слоев); волновое деформационное упрочнение синтезированных слоев; механическая обработка наплавленной и, если необходимо, упрочненной поверхности с целью удаления дефектного слоя и обеспечения

высокой точности и низкой шероховатости ответственных поверхностей.

Аналогичные работы ведутся в США как минимум с 2012 г. Тем не менее в некоторых направлениях отечественная военная промышленность значительно опережает зарубежных конкурентов.

Из других источников [23, 24] известно, что армия США спроектировала и напечатала на 3D-принтере полностью функциональный гранатомет, который называется «R.A.M.V.O» и состоит из 50 частей, все из которых, за исключением пружин и метизов, также напечатаны на 3D-принтере. На испытаниях гранатомет «R.A.M.V.O» продемонстрировал характеристики, аналогичные подствольному гранатомету M203, изготовленному традиционным способом.

Команда морпехов США занимается 3D-печатью и тестированием небольших контейнеров для взрывчатых веществ, которые могут быть использованы на поле боя.

Разработка легкого стрелкового вооружения началась с частного сектора – с самых примитивных образцов пистолетов, например, Liberator, чертежи которого долгое время были доступны в открытом доступе в сети Интернет. Методом селективного лазерного спекания металла компания Solid Concepts создала копию пистолета 45 калибра «Browning» M1911 – Solid Concepts 1911 DMLS, который способен произвести до 600 выстрелов без видимых повреждений, а компания Defense Distributed создала таким образом винтовку M4.

Пока ученые изобретают новые технологии в печати для военного ведомства, простые американцы создают оружие будущего с помощью обычных 3D-принтеров. Так, американский энтузиаст David Wirth создал в своей мастерской ручной рельсотрон, который может использовать в качестве боеприпасов (БП) алюминие-

вые или графитовые пули, выстреливая их со скоростью 250 м/с. В основе конструкции – шесть огромных конденсаторов, которые при суммарном весе около 9 кг запасают более 1800 Дж энергии для каждого выстрела. Также рельсотрон состоит из аккумуляторов, двух параллельных контактных рельс и пневматической системы подачи БП.

В сентябре 2019 г. исследовательской лабораторией ВВС США разработан стальной сплав AF-9628 для аддитивного производства БП [25]. Он отличается высокой прочностью и вязкостью, его стоимость меньше некоторых других сплавов, не содержит вольфрама или кобальта. В рамках проекта по адаптации AF-9628 к аддитивному производству БП исследователи использовали два 3D-принтера для создания 130 моделей. Также были напечатаны несколько более сложных снарядов.

Кроме того, аддитивное производство позволяет перераспределить вес на боеприпасах таким образом, чтобы оставить его только там, где необходимо, создавая более легкое оружие при прочих равных характеристиках для увеличения боевой нагрузки самолетов.

Помимо США, крупные и важные центры компетенций аддитивных технологий сегодня также имеются и в Германии. Это страна благодаря Институту лазерных технологий Фраунгофера (Fraunhofer Institute for Laser Technology) стала лидером в области лазерных технологий сплавления и спекания порошковых материалов, которые, в свою очередь, имеют все шансы стать стандартом для оснащения цифровых производств Индустрии 4.0 (массовое внедрение киберфизических систем в производство) [26].

В тройку лидеров зарубежных стран по применению аддитивных технологий в промышленном производстве вошла и Франция. Заинтересованность в развитии

собственных аддитивных технологий проявляют не только французские предприятия ОПК, но и такие мировые компании как Airbus, Michelin, Safran Tech и пр. Например, всемирно известная группа Safran Tech занимается разработкой в области высоких технологий и является ключевым поставщиком предприятий авиационной, космической и оборонной промышленности [26].

Все вышеперечисленные разработки в области перспективных образцов вооружения и военной техники свидетельствуют о серьезных планах различных стран, в том числе России, в ближайшем будущем стать полноправными участниками рынка аддитивных технологий.

Выводы

Внедрение аддитивных технологий открывает широкие производственные возможности при изготовлении сложнопрофильных деталей для современных образцов вооружения и военной техники,

а также позволяет уйти от традиционных способов получения изделий, тем самым значительно повысив производительность и экономическую эффективность процессов.

При выборе вида аддитивных технологий следует учитывать следующие критерии: требуемая степень детализации модели, сложность модели, материал, габаритные размеры модели, количество и номенклатура изделий, стоимость принтера и расходных материалов.

Из-за низких затрат и высокой производительности имеет смысл изготавливать сложнопрофильные детали из пластика по FDM-технологии, а металлические сложнопрофильные детали – по SLM-технологии. Практическое овладение отечественными предприятиями ОПК, рассмотренными в настоящей статье различными видами аддитивных технологий, позволит сохранить конкурентоспособность на глобальных рынках и отстоять национальный технологический суверенитет.

Список литературы

1. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. М.: Техносфера, 2020. 658 с.
2. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении: пособ. для инженеров. М.: ГИЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.
3. Global Additive Manufacturing Market, Forecast to 2025. Frost & Sullivan. 2016.
4. «Росатом» открыл третий центр аддитивных технологий [Электронный ресурс]. URL: <https://strana-rosatom.ru/2023/02/03/rosatom-otkryl-tretij-centr-additi/> (дата обращения: 20.03.2023).
5. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 14 июля 2021 г. № 1913-р «Об утверждении Стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года».
6. Технологии аддитивного производства – полный обзор [Электронный ресурс]. URL: <https://additiv-tech.ru/news/tehnologii-additivnogo-proizvodstva-polnyu-obzor.html> (дата обращения: 14.02.2023).
7. Шишковский И.В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения. СПб.: Питер, 2016. 400 с.
8. Композитный материал VisitJet PXL Core (14 кг) [Электронный ресурс]. URL: https://3d.globatek.ru/rash_materials/visijetpxlcore14/ (дата обращения: 14.02.2023).
9. Технологии 3D-печати: ColorJet Printing (CJP) [Электронный ресурс]. URL: <https://blog.iqb.ru/cjp-technology/> (дата обращения: 16.02.2023).
10. Технология 3D-печати CJP [Электронный ресурс]. URL: <https://globatek.ru/3d-wiki/3d-printing-technologies/cjp> (дата обращения: 16.02.2023).
11. FDM-технология: все, что вам нужно знать о ней [Электронный ресурс]. URL: <https://3droom.pro/fdm-tehnologiya> (дата обращения: 20.02.2023).
12. Многоструйное моделирование (МММ): технология настоящего и будущего [Электронный ресурс]. URL: <https://3dprofy.ru/mnogostrujnoe-modelirovanie-mjm-tekhno> (дата обращения: 20.02.2023).

13. 3D-печать DLP LCD SLA фотополимерная – руководство по стереолитографии [Электронный ресурс]. URL: <https://3dpt.ru/blogs/support/sla> (дата обращения: 01.03.2023).
14. Доотверждение изделий в SLA-печати: как повысить прочность и качество [Электронный ресурс]. URL: <https://blog.iqb.ru/sla-post-curing/> (дата обращения: 01.03.2023).
15. Технология селективного лазерного плавления (SLM) [Электронный ресурс]. URL: <https://blog.iqb.ru/slm-technology/> (дата обращения: 06.03.2023).
16. Гайд по SLS-порошкам для покупателя [Электронный ресурс]. URL: <https://lider-3d.ru/wiki/nastroyki-pechati-i-sovety/gayd-po-sls-poroshkam-dlya-pokupatelya/> (дата обращения: 06.03.2023).
17. Изготовление объектов методом ламинирования (LOM) [Электронный ресурс]. URL: <http://3dprofy.ru/izgotovlenie-obektov-metodom-lamin/> (дата обращения: 20.03.2023).
18. More details emerge on UC Berkeley-LLNL new CAL volumetric 3D printing [Электронный ресурс]. URL: <https://www.voxelmatters.com/more-details-emerge-on-uc-berkeley-llnl-new-cal-volumetric-3d-printing-method/> (дата обращения: 20.03.2023).
19. Кулик В.И. Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники: учеб. пособие. СПб., 2018. 160 с.
20. ВИАМ: Конференция по аддитивным технологиям [Электронный ресурс]. URL: <https://viam.ru/news/2050> (дата обращения: 09.03.2023).
21. Российский ВПК успешно испытал 3D-печатные боеприпасы [Электронный ресурс]. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/the-russian-defense-industry-successfully-tested-a-3dprinted-ammunitio> (дата обращения: 09.03.2023).
22. Вырастить броню для танка. Сплавление проволоки: аддитивные технологии и волновое упрочнение [Электронный ресурс]. URL: <https://naukatehnika.com/dlya-tanki-additivnye-tehnologii.html> (дата обращения: 15.03.2023).
23. Обзор: 3D-принтеры на военной службе [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/company/top3dshop/blog/428271/> (дата обращения: 17.03.2023).
24. Армия США испытывает Rambo – напечатанный на 3D-принтере гранатомет [Электронный ресурс]. URL: <https://www.3dpulse.ru/news/interesnoe-o-3d/armiya-ssha-ispytyvaet-rambo--napечатанный-na-3d-printere-granatomet/> (дата обращения: 17.03.2023).
25. Стальной сплав AF-9628 для аддитивного производства боеприпасов [Электронный ресурс]. URL: <https://www.3dpulse.ru/news/nauchnye-razrabotki-tehnologii/stalnoi-splav-af-9628-dlya-additivnogo-proizvodstva-boeprilasov/> (дата обращения: 15.03.2023).
26. Франция вошла в тройку лидеров по применению аддитивных технологий [Электронный ресурс]. URL: <https://integral-russia.ru/2018/03/14/18144/> (дата обращения: 20.03.2023).

References

1. Gibson YA., Rozen D., Staker B. Additive Manufacturing Technologies. M.: Tekhnosfera, 2020. 658 p.
2. Zlenko M.A. Additive technologies in mechanical engineering: posobie dlya inzhenerov. M.: GNC RF FGUP «NAMI», 2015. 220 p.
3. Global Additive Manufacturing Market, Forecast to 2025. Frost & Sullivan. 2016.
4. «Rosatom» otkryl tretij centr additivnyh tekhnologij [Elektronnyj resurs]. URL: <https://strana-rosatom.ru/2023/02/03/rosatom-otkryl-tretij-centr-additi/> (дата обращения: 20.03.2023).
5. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 14 iyulya 2021g. № 1913-r «Ob utverzhdenii Strategii razvitiya additivnyh tekhnologij v Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda».
6. Tekhnologii additivnogo proizvodstva – polnyj obzor [Elektronnyj resurs]. URL: <https://additiv-tech.ru/news/tehnologii-additivnogo-proizvodstva-polnyj-obzor.html> (дата обращения: 14.02.2023).
7. SHishkovskij I.V. Fundamentals of High-Resolution Additive Technologies. SPb.: Piter, 2016. 400 p.
8. Kompozitnyj material VisitJet PXL Core (14 kg) [Elektronnyj resurs]. URL: <https://3d.globatek.ru/rash-materials/visitjetpxlcore14/> (дата обращения: 14.02.2023).
9. Tekhnologii 3D-pechati: ColorJet Printing (CJP) [Elektronnyj resurs]. URL: <https://blog.iqb.ru/cjp-technology/> (дата обращения: 16.02.2023).
10. Tekhnologiya 3D-pechati CJP [Elektronnyj resurs]. URL: <https://globatek.ru/3d-wiki/3d-printing-techologies/cjp> (дата обращения: 16.02.2023).
11. FDM-tehnologiya: vse, chto vam nuzhno znat' o nej [Elektronnyj resurs]. URL: <https://3droom.pro/fdm-tehnologiya> (дата обращения: 20.02.2023).
12. Mnogostrujnoe modelirovanie (MJM): tekhnologiya nastoyashchego i budushchego [Elektronnyj resurs]. URL: <https://3dprofy.ru/mnogostrujnoe-modelirovanie-mjm-tekhno/> (дата обращения: 20.02.2023).

13. 3D-pechat' DLP LCD SLA fotopolimernaya – rukovodstvo po stereolitografii [Elektronnyj resurs]. URL: <https://3dpt.ru/blogs/support/sla> (data obrashcheniya: 01.03.2023).
14. Dootverzhdenie izdelij v SLA-pechati: kak povysit' prochnost' i kachestvo [Elektronnyj resurs]. URL: <https://blog.iqb.ru/sla-post-curing/> (data obrashcheniya: 01.03.2023).
15. Tekhnologiya selektivnogo lazernogo plavleniya (SLM) [Elektronnyj resurs]. URL: <https://blog.iqb.ru/slm-technology/> (data obrashcheniya: 06.03.2023).
16. Gajd po SLS-poroshkam dlya pokupatelya [Elektronnyj resurs]. URL: <https://lider-3d.ru/wiki/nastroyki-pechati-i-sovety/gayd-po-sls-poroshkam-dlya-pokupatelya/> (data obrashcheniya: 06.03.2023).
17. Izgotovlenie ob»ektov metodom laminirovaniya (LOM) [Elektronnyj resurs]. URL: <http://3dprofy.ru/izgotovlenie-obektov-metodom-lamin/> (data obrashcheniya: 20.03.2023).
18. More details emerge on UC Berkeley-LLNL new CAL volumetric 3D printing [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.voxelmatters.com/more-details-emerge-on-uc-berkeley-llnl-new-cal-volumetric-3d-printing-method/> (data obrashcheniya: 20.03.2023).
19. *Kulik V.I.* Additive technologies in the production of wares for aviation and rocket and space technology: uchebnoe posobie. SPb., 2018. 160 p.
20. VIAM: Konferenciya po additivnym tekhnologiyam [Elektronnyj resurs]. URL: <https://viam.ru/news/2050> (data obrashcheniya: 09.03.2023).
21. Rossijskij VPK uspeshno ispytal 3D-pechatnye boepripasy [Elektronnyj resurs]. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/the-russian-defense-industry-successfully-tested-a-3dprinted-ammunitio> (data obrashcheniya: 09.03.2023).
22. Vyrastit' bronyu dlya tanka. Splavlenie provoloki: additivnye tekhnologii i volnovoe uprochnenie [Elektronnyj resurs] – URL: <https://naukatehnika.com/dlya-tanki-additivnye-tehnologii.html> (data obrashcheniya: 15.03.2023).
23. Obzor: 3D-printery na voennoj sluzhbe [Elektronnyj resurs]. URL: <https://habr.com/ru/company/top3dshop/blog/428271/> (data obrashcheniya: 17.03.2023).
24. Armiya SSHA ispytyvaet Rambo – napechatannyj na 3D-printere granatomet [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.3dpulse.ru/news/interesnoe-o-3d/armiya-ssha-ispytyvaet-rambo--napechatannyi-na-3d-printere-granatomet/> (data obrashcheniya: 17.03.2023).
25. Stal'noj splav AF-9628 dlya additivnogo proizvodstva boepripasov [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.3dpulse.ru/news/nauchnye-razrabotki-tehnologii/stalnoi-splav-af-9628-dlya-additivnogo-proizvodstva-boepripasov/> (data obrashcheniya: 15.03.2023).
26. Franciya voshla v trojku liderov po primeneniyu additivnyh tekhnologij [Elektronnyj resurs]. URL: <https://integral-russia.ru/2018/03/14/18144/> (data obrashcheniya: 20.03.2023).

Поступила в редакцию: 22.05.2022

Одобрена рецензентами: 25.06.2022

Принята к печати: 15.02.2023

Об авторах

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

Ivan V. Egorov* – PhD in Engineering sciences, employee of the 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.

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

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

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

УДК 629.78

РАСЧЕТ ПРОЕКТНЫХ ЗАПАСОВ ТОПЛИВА ДЛЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

CALCULATION OF PROJECT FUEL RESERVES FOR SMALL SPACECRAFT

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

Аннотация. Представлена методика, позволяющая оценить затраты топлива, необходимого для доведения космического аппарата на рабочую орбиту, ее поддержания в течение срока активного существования и перехода на орбиту захоронения. В расчетах учитывается изменение баллистического коэффициента по мере расходования топлива на каждом этапе полета. Решение перечисленных задач позволяет повысить безопасность полета других космических аппаратов, штатно функционирующих на орбите, и минимизирует засорение околоземного пространства.

Ключевые слова: МАЛЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ; ДВИГАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА; СРОК АКТИВНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ; НИЗКАЯ ОКОЛОЗЕМНАЯ ОРБИТА; БЕЗОПАСНОСТЬ ОРБИТАЛЬНОГО ПОЛЕТА; РЕЖИМ ТАКТОВОЙ РАБОТЫ; АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ.

Для цитирования: Улыбышев С.Ю., Храмов С.М. Расчет проектных запасов топлива для малого космического аппарата // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 1. С. 70–83.



Изображение от wirestock на Freepik

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

Abstract. *A technique is presented that makes it possible to estimate the cost of fuel required to bring a spacecraft into a working orbit, maintain it during the period of active existence, and then switch to the burial (flooding) mode. The calculations take into account the change in the ballistic coefficient as fuel is consumed at each stage of the flight. The solution of the listed problems allows to increase the safety of the flight of other spacecraft that operate normally in orbit and minimizes the contamination of the near-Earth space.*

Keywords: SMALL SPACECRAFT; PROPULSION SYSTEM; PERIOD OF ACTIVE EXISTENCE;
LOW EARTH ORBIT; SAFETY OF ORBITAL FLIGHT; CLOCK OPERATION MODE;
PROPULSION CONTROL ALGORITHM.

For citation: *Ulybyshev S.Yu., Khramov S.M. Calculation of project fuel reserves for small spacecraft // Promising technologies for security systems. 2023. N 1. P. 70–83.*

Введение

В настоящее время активно реализуются проекты по развертыванию многоспутниковых орбитальных группировок из малых космических аппаратов (МКА) для связи и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). С целью повышения оперативности наблюдения заданных районов на поверхности планеты применяется сегментное построение спутниковых систем (СС) [1–6], когда МКА выводятся на одну и ту же орбиту и распределяются вдоль нее на определенные фазовые углы [7]. Это позволяет осуществлять групповые запуски нескольких аппаратов одним средством выведения [8], а также увеличить их количество за счет отделения на более низкой орбите и самостоятельного довыведения МКА на рабочую орбиту [9]. Аппараты ДЗЗ при этом обычно размещаются на низкой солнечно-синхронной орбите – не выше 600 км – для обеспечения требуемых условий съемки и пространственного разрешения [1, 3, 10, 11].

Таким образом, МКА в течение заданного срока активного существования (САС), особенно находясь в групповом полете с другими космическими аппаратами (КА), проводят периодические маневры коррекции орбиты для удержания взаимного фазового положения и высоты полета [12]. Для этих задач целесообразно использовать осевые двигательные установки (ДУ) с несколькими сонаправленными двигателями [13, 14], позволяющие совместно с применением режима тактовой работы (РТР) ДУ осуществлять высокоточное маневрирование МКА [15, 16].

Кроме того, после завершения САС согласно нормативным требованиям [17] срок баллистического существования на низкой околоземной орбите (НОО) не должен превышать 25 лет. Для многоспутниковых орбитальных группировок с учетом

интенсивного наращивания всеми странами количества аппаратов на НОО данный срок необходимо сокращать, поскольку с каждым годом все более остро встает проблема утилизации космического мусора [18–22]. В свою очередь, для ее решения могут быть использованы специальные космические буксировщики для увода отработанных аппаратов на орбиту захоронения [23, 24]. Впрочем, если на МКА предусмотреть запас топлива, необходимый для затопления аппарата, отработавшего свой срок, или перевод его на орбиту захоронения, то тем самым можно существенно обезопасить орбитальные полеты других КА, штатно функционирующих в околоземном пространстве.

Постановка задачи

В рамках представленной статьи рассмотрена методика расчета требуемых запасов топлива на МКА при реализации им следующих основных операций маневрирования:

довыведение на рабочую орбиту и установка в требуемое фазовое положение на этапе развертывания сегмента СС;

поддержание рабочей орбиты в течение САС;

осуществление прямого схода с орбиты в конце САС.

При этом в качестве исходных данных должны быть заданы следующие характеристики:

высота и наклонение орбиты выведения МКА;

высота и наклонение рабочей орбиты; начальный баллистический коэффициент МКА;

срок активного существования: прием $T_{\text{САС}} = 5$ лет;

высота перигея орбиты захоронения (для прямого схода с орбиты эта величина составляет 80 км);

удельный импульс двигателя МКА:
примем $Iu = 2060$ м/с;
масса МКА на рабочей орбите в начале САС ($M_{\text{МКА}_0}$).

Фазовое положение на рабочей орбите выбирается временем начала перелета на нее. Принято, что довыведение осуществляется с одной круговой солнечно-синхронной орбиты (ССО) на другую, тем самым номинально отсутствует взаимный разворот орбитальных плоскостей по долготе восходящего узла.

В результате требуется определить в обобщенном виде зависимость выводимой начальной массы МКА от высоты рабочей орбиты. В свою очередь, масса МКА складывается из параметров массы: бортовой съемочной оптико-электронной аппаратуры (СОА), независимой от пространственного разрешения $M_{\text{СОА}}$; основных бортовых систем (ОБС) МКА (согласно работе [11], примем $M_{\text{ОБС}} = 170$ кг); баков с топливом; двигательной установки; рабочего запаса топлива; невырабатываемого остатка топлива и компонентов системы наддува.

Указанный перечень может быть задан определенными величинами, либо через функциональную зависимость от высоты полета.

Цель данной статьи – определить все перечисленные параметры и сформировать итоговую расчетную сводку формул для вычисления массы МКА на рабочей орбите, а также требуемых запасов топлива на борту с учетом распределения их на каждую из решаемых задач маневрирования.

Определение массы СОА в зависимости от высоты полета

Диаметр входной апертуры СОА, согласно работе [11], определяется соотношением:

$$D = k(\lambda h/d), \quad (1)$$

где $k = 1,6$ – эмпирический коэффициент; $\lambda = 1$ – длина волны излучения, мкм; h – высота полета МКА; d – требуемое пространственное разрешение при съемке Земли.

Данный параметр связан с массой СОА следующим соотношением:

$$M_{\text{СОА}} = k_M D^2, \quad (2)$$

где $k_M = 300$ – коэффициент пропорциональности по данным аппроксимации проектных характеристик летающих МКА, проведенной в работе [11].

После подстановки первого уравнения и соответствующих констант можно записать выражение:

$$M_{\text{СОА}} = k_M \left(k \frac{\lambda h}{d} \right)^2 = 7,68 \cdot 10^{-4} \cdot (h/d)^2. \quad (3)$$

Здесь и далее высота полета h задается в «км», а d – «м».

Характерный вид получаемой зависимости при вариации высоты полета для двух типовых значений пространственного разрешения представлен на рис. 1.

Полученная зависимость является обобщенной в рамках рассмотренных проектных параметров МКА, а также выбранного пространственного разрешения и может быть уточнена под конкретные характеристики СОА.

Определение массы баков и топлива

В общем виде масса элементов, обеспечивающих маневрирование МКА, включает

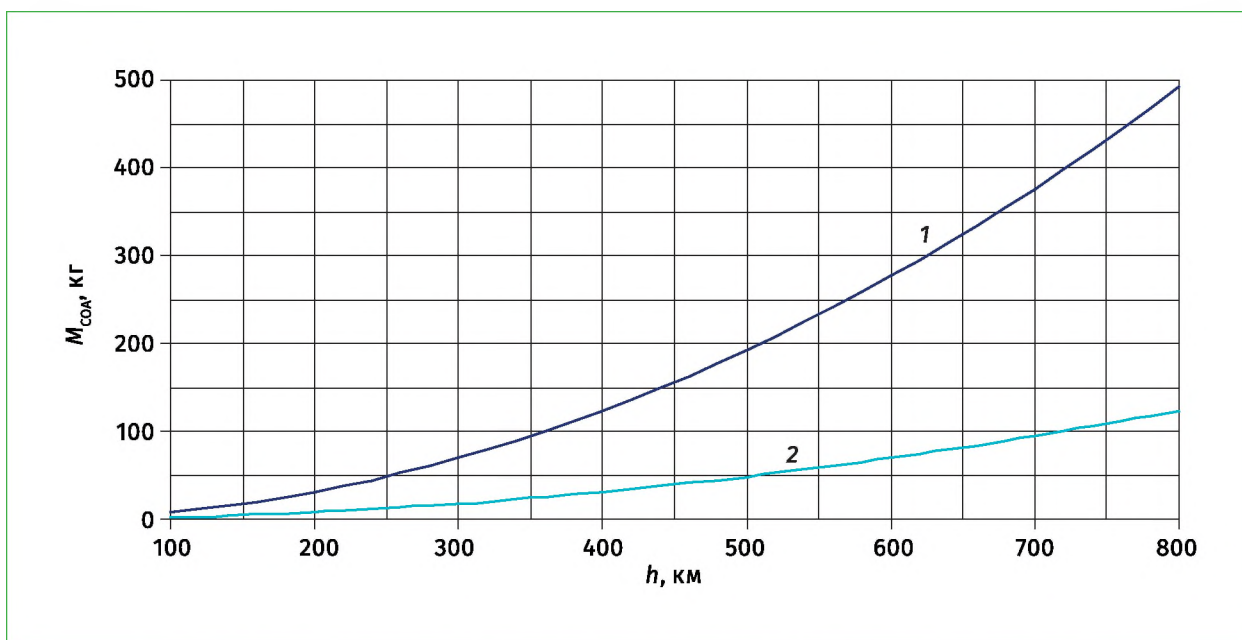


Рис. 1. Зависимость массы COA от высоты рабочей орбиты: 1 – $d = 1$ м; 2 – $d = 2$ м

Таблица 1

Расчетные параметры двигателя МКА

Параметр	Наименование (значение)
Тип двигателя	К50–10.6
Топливо	Гидразин
Тяга, Н	0,5
Удельный импульс, м/с	2060
Масса двигателя M_d , кг	0,19

Таблица 2

Параметры бака для однокомпонентной ДУ

Название	МВСК84
Топливо	Гидразин
Масса бака $M_{бк}$, кг, не более	2,5
Объем топливной полости, $дм^3$	$8,4 \pm 0,1$
Масса газа наддува $M_{гн,г}$, кг	0,4
Невырабатываемый остаток топлива $M_{но,г}$, кг	0,2
Рабочий запас топлива $M_{тр,г}$, кг	7,8
Диаметр бака, м	0,254
Масса конструктивных элементов $M_{кэ,г}$, кг	1,5

массу: ДУ для выдачи импульса; баков для хранения топлива и обеспечивающих элементов (газ наддува, трубопровода и другие конструктивные элементы); топлива.

Далее примем, что на МКА устанавливается группа из четырех номинально равнотяговых двигателей типа К50–10.6 производства ОКБ «Факел» [25], параметры которого указаны в табл. 1. Данная компоновка ДУ позволяет реализовать РТР, используемый при выдачи импульса, требуемой величины.

Для определения массы топлива и баков к рассмотрению принят уже существующий и используемый в настоящее время топливный бак МВСК84 производства АО «НИИМаш» [26], данные по которому приведены в табл. 2.

В результате масса топливного блока в первом приближении будет складываться из следующих составляющих:

$$M_{\text{ТБ}} = M_{\text{Т.р.}} + M_{\text{н.о.}} + M_{\text{г.н.}} + M_{\text{б.}} + M_{\text{к.э.}} = 7,8 + 0,2 + 0,4 + 2,5 + 1,5 = 13 \text{ кг.} \quad (4)$$

Таким образом, масса рабочего запаса топлива (7,8 кг) составляет 0,6 от массы заправленного топливного блока. Примем данное соотношение для дальнейших расчетов при определении массы топливного блока МКА в зависимости от требуемого запаса топлива на борту $M_{\text{ТБ}} = (5/3)M_{\text{Т.р.}}$.

Определение выводимой массы МКА

С учетом зависимостей, полученных выше, масса выводимого МКА может быть представлена в следующем виде:

$$M_{\text{МКА.выв}} = M_{\text{ОБС}} + M_{\text{СОА}} + 4M_{\text{д}} + M_{\text{ТБ}} = M_{\text{пл.}} + M_{\text{СОА}} + \frac{5}{3}M_{\text{Т.р.}} \quad (5)$$

Первое слагаемое в данном уравнении $M_{\text{пл.}}$ – это масса платформы МКА, на которой устанавливаются СОА и баки с топливом. Два последних слагаемых в формуле функционально зависят от высоты полета МКА. Причем для определения последней величины даже при известной высоте полета потребуется провести некоторые преобразования.

Основные затраты топлива МКА будут приходиться на операции довыведения на рабочую орбиту с синхронной прецессией (ОСП), поддержание этой орбиты в течение заданного САС и проведение маневра схода с орбиты для затопления определяются соотношением:

$$M_{\text{Т.р.}} = M_{\text{Т.дов.}} + M_{\text{Т.под.}} + M_{\text{Т.сх.}} \quad (6)$$

Затраты на довыведение будем определять в импульсной постановке, исходя из параметров рабочей (высоты – h_p и наклона – i_p) и орбиты выведения (h_0, i_0). С учетом использования ССО наклонение орбиты зависит от высоты и определяется уравнением по аналогии с работой [27]:

$$i_{\text{ССО}} = \arccos\left(\frac{-0,9856 \cdot (R_z + h_{\text{ССО}})^{7/2}}{20,64734 \cdot 10^{13}}\right) \quad (7)$$

При известных параметрах начальной и конечной орбит затраты V_x на подъем высоты за два импульса можно определить в виде уравнений:

$$\Delta V_{h_{-1}} = V_{h_{-0}} \cdot \left(\sqrt{\frac{R_z + h_p}{R_z + (h_0 + h_p)/2}} - 1 \right); \quad (8)$$

$$\Delta V_{h_{-2}} = V_{h_{-p}} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{R_z + h_0}{R_z + (h_0 + h_p)/2}} \right),$$

где V_{h_0} и V_{h_P} – орбитальные скорости движения на орбите выведения и рабочей соответственно; $R_z = 6378,14$ – экваториальный радиус Земли, км.

С учетом реализации изменения наклонения орбиты на величину $\Delta i = i_p - i_0$ в этих же двух импульсах в равных долях можно записать формулы:

$$\begin{aligned} \Delta V_{i_1} &= 2 \cdot V_{h_0} \cdot \sin\left(\frac{\Delta i}{4}\right); \\ \Delta V_{i_2} &= 2 \cdot V_{h_B} \cdot \sin\left(\frac{\Delta i}{4}\right); \\ \Delta V_{X_{\text{дов.}}} &= \sqrt{(\Delta V_{h_1})^2 + (\Delta V_{i_1})^2} + \\ &+ \sqrt{(\Delta V_{h_2})^2 + (\Delta V_{i_2})^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Коэффициент изменения массы МКА при довыведении будет следующий:

$$K_{M_{\text{дов}}} = \frac{M_{\text{МКА}_0}}{M_{\text{МКА}_{\text{выв}}}} = e^{-\Delta V_{X_{\text{дов.}}}/Iu}. \quad (10)$$

Тогда для массы топлива при довыведении запишем выражение:

$$\begin{aligned} M_{\text{т.дов.}} &= M_{\text{МКА}_{\text{выв}}} - M_{\text{МКА}_0} = \\ &= (1 - K_{M_{\text{дов}}})M_{\text{МКА}_{\text{выв}}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Затраты V_x на прямой сход с орбиты, подразумевающий понижение перигея до высоты порядка 80 км, можно записать в виде уравнения:

$$\Delta V_{X_{\text{сх.}}} = V_{h_P} \left(\sqrt{\frac{R_z + h_p}{R_z + (h_p + 80)/2}} - 1 \right). \quad (12)$$

Коэффициент изменения массы МКА при сходе с орбиты определим как уравнение:

$$\begin{aligned} K_{M_{\text{сх.}}} &= \frac{M_{\text{МКА}_0} - M_{\text{т.под.}} - M_{\text{т.сх.}}}{M_{\text{МКА}_0} - M_{\text{т.под.}}} = \\ &= e^{-\Delta V_{X_{\text{сх.}}}/Iu}. \end{aligned} \quad (13)$$

Тогда для массы топлива на сход с орбиты в общем виде запишем выражение:

$$\begin{aligned} M_{\text{т.сх.}} &= M_{\text{МКА}_0} - M_{\text{т.под.}} - \\ &- K_{M_{\text{сх.}}}(M_{\text{МКА}_0} - M_{\text{т.под.}}). \end{aligned} \quad (14)$$

Для определения затрат на поддержание орбиты воспользуемся следующим порядком расчетов. Темп торможения МКА атмосферой зависит от его баллистического коэффициента и плотности атмосферы на заданной высоте полета. С учетом принятых допущений баллистический коэффициент МКА определяется главным образом его массой в следующем виде, задавшись площадью миделя $S_m = 1 \text{ м}^2$ и коэффициентом лобового сопротивления $C_x = 2$:

$$\begin{aligned} S_B &= C_x S_m / (2M_{\text{МКА}}) = \\ &= 2 \cdot 1 / (2M_{\text{МКА}}) = 1/M_{\text{МКА}}. \end{aligned} \quad (15)$$

По мере расхода топлива масса аппарата будет уменьшаться, а баллистический коэффициент расти. В результате следует оперировать понятием начального и конечного баллистического коэффициентов МКА на рабочей орбите. Тогда для них справедливо записать соотношения:

$$\begin{aligned} S_{B_0} &= 1/M_{\text{МКА}_0}; \\ S_{B_K} &= 1/(M_{\text{МКА}_0} - M_{\text{т.под.}}), \end{aligned} \quad (16)$$

где $M_{\text{т.под.}}$ – масса топлива, затрачиваемая на поддержание рабочей орбиты.

Отношение данных параметров обозначим как коэффициент $K_{sb} = S_{B_0}/S_{B_K}$, который можно обобщенно записать в виде уравнения:

$$K_{sb} = 1 - K_h \cdot \frac{S_{B_0}}{S_{B_{прив}}} \cdot T_{CAC}, \quad (17)$$

где $K_h = f(h)$ при $|S_{B_{прив}} = 0,001|$ $T_{CAC} = 1$ – высотный коэффициент, функционально зависящий от заданной высоты полета для приведенного начального баллистического коэффициента $S_{B_{прив}}$ и фиксированного срока поддержания орбиты $T_{CAC} = 1$ год; $S_{B_{прив}} = 0,001$ – приведенное значение начального баллистического коэффициента МКА, для которого определены функциональные зависимости высотного коэффициента, m^2/kg ; T_{CAC} – заданный срок активного существования МКА.

Таким образом, данная формула в общем виде описывает степень изменения баллистического коэффициента для заданных высоты орбиты поддержания, начального баллистического коэффициента МКА и САС.

Для расчета коэффициента K_h в случае использования статической модели атмосферы, согласно работе [28], можно записать следующие приближенные соотношения:

$$K_h = \begin{cases} 2 \cdot 10^{15} h^{-6,929} & \text{при } 165 < h < 200 \text{ км} \\ 1 \cdot 10^{14} h^{-6,361} & \text{при } 200 \leq h < 320 \text{ км} \\ 3 \cdot 10^{14} h^{-6,56} & \text{при } 320 \leq h < 410 \text{ км} \\ 1 \cdot 10^{17} h^{-7,528} & \text{при } 410 \leq h \leq 1000 \text{ км} \end{cases} \quad (18)$$

Для высот полета ниже 165 км значение данного коэффициента превышает 0,9. Это означает, что масса топлива на МКА должна составлять свыше 90% от его начальной массы и рассматривать на

таких высотах ДУ на однокомпонентном топливе с заданным удельным импульсом нецелесообразно. Необходимо либо повышать удельный импульс за счет использования двухкомпонентной ДУ, либо переходить на другой тип двигателя, либо уменьшать срок поддержания орбиты.

После подстановок соотношений (16) в уравнение (17), можно записать:

$$K_{sb} = \frac{S_{B_0}}{S_{B_K}} = \frac{M_{MKA_0} - M_{т.под.}}{M_{MKA_0}} = 1 - K_h \cdot \frac{1}{M_{MKA_0}} \cdot \frac{T_{CAC}}{S_{B_{прив}}}, \quad (19)$$

Преобразуем соотношение к виду:

$$M_{т.под.} = K_h (T_{CAC}/S_{B_{прив}}) = 1000 K_h \cdot T_{CAC}. \quad (20)$$

Подставляя соотношения (6), (11) и (14) в выражение (5), получим уравнение:

$$M_{MKA_{выв}} = M_{пл.} + M_{COA} + \frac{5}{3} \left((1 - K_{M_{дов}}) \times M_{KA_{выв}} + M_{т.под.} + M_{MKA_0} - M_{т.под.} - K_{M_{дов}} \cdot (M_{MKA_0} - M_{т.под.}) \right). \quad (21)$$

Для начальной массы МКА на самой рабочей орбите справедливо выражение:

$$M_{MKA_0} = M_{т.под.}/(1 - K_{sb}) = M_{MKA_{выв}} \cdot K_{M_{дов}}. \quad (22)$$

Для определения выводимой массы МКА подставим выражение (22) в уравнение (21) и преобразуем все к окончательному виду:

$$M_{\text{МКА_выв}} = \frac{M_{\text{пл.}} + M_{\text{СОА}} + \frac{5}{3} \cdot 1000 \cdot K_h \cdot T_{\text{САС}} \cdot K_{\text{М.сх.}}}{\frac{5}{3} K_{\text{М.дов.}} \cdot K_{\text{М.сх.}} - \frac{2}{3}}. \quad (23)$$

Подставив соотношение (20) в уравнение (23) и дополнив другими уравнениями, запишем в окончательном виде расчетную совокупность соотношений для оценки массовых характеристик МКА:

$$M_{\text{МКА_выв}} = \frac{M_{\text{пл.}} + M_{\text{СОА}} + \frac{5}{3} \cdot 1000 \cdot K_h \cdot T_{\text{САС}} \cdot K_{\text{М.сх.}}}{\frac{5}{3} K_{\text{М.дов.}} \cdot K_{\text{М.сх.}} - \frac{2}{3}};$$

$$M_{\text{пл.}} = M_{\text{ОБС}} + 4M_{\text{Д}};$$

$$M_{\text{СОА}} = 7,68 \cdot 10^{-4} (h/d)^2;$$

$$K_{\text{М.дов.}} = e^{-\Delta V_{\text{х.дов.}}/Iu};$$

$$K_h = \begin{cases} 2 \cdot 10^{15} h^{-6,929} & \text{при } 165 < h < 200 \text{ км} \\ 1 \cdot 10^{14} h^{-6,361} & \text{при } 200 \leq h < 320 \text{ км} \\ 3 \cdot 10^{14} h^{-6,56} & \text{при } 320 \leq h < 410 \text{ км} \\ 1 \cdot 10^{17} h^{-7,528} & \text{при } 410 \leq h \leq 1000 \text{ км} \end{cases}; \quad (24)$$

$$K_{\text{М.сх.}} = e^{-\Delta V_{\text{х.сх.}}/Iu};$$

$$M_{\text{МКА}_0} = M_{\text{МКА_выв}} \cdot K_{\text{М.дов.}};$$

$$M_{\text{т.р.}} = M_{\text{т.дов.}} + M_{\text{т.под.}} + M_{\text{т.сх.}};$$

$$M_{\text{т.дов.}} = (1 - K_{\text{М.дов.}}) M_{\text{МКА_выв}};$$

$$M_{\text{т.под.}} = 1000 K_h \cdot T_{\text{САС}};$$

$$M_{\text{т.сх.}} = (1 - K_{\text{М.сх.}}) (M_{\text{МКА_выв}} \cdot K_{\text{М.дов.}} - M_{\text{т.под.}}).$$

Данные соотношения позволяют определить требуемую массу выводимого

МКА как функцию от высоты полета на рабочей орбите при заданном САС, характеристиках ДУ и пространственном разрешении d . На рис. 2 показаны графики изменения массы выводимого МКА в зависимости от высоты рабочей орбиты при тех же проектных значениях линейного разрешения и САС 5 лет. При этом принято, что высота ССО выведения составляет 275 км, а перелет осуществляется на более высокую орбиту.

Как видно из графика, для разрешения $d = 1$ м оптимальной областью высот для этих данных является 350...355 км и соответствует массе $M_{\text{МКА_выв}} \approx 350$ кг. Для разрешения $d = 2$ м оптимальная область высот 395...405 км и соответствует массе $M_{\text{МКА_выв}} \approx 260$ кг.

Характер экстремума данной зависимости обусловлен тем, что с ростом высоты полета увеличиваются затраты топлива на сход с орбиты, но при этом на ее поддержание затраты снижаются. На фоне этого также растет масса СОА. На рис. 3 и 4 показано распределение массы топлива по основным операциям для указанных значений линейного разрешения.

Как видно из диаграмм, реализация схода с орбиты МКА в конце САС для снижения уровня загрязнения космического пространства требует затрат топлива на уровне 25...30% от располагаемого запаса. Эти запасы могут существенно продлить САС в случае реализации вариантов пассивного схода с орбиты МКА после завершения штатной работы.

В результате в табл. 3 представлены сводные данные по проектным запасам топлива на МКА и его основным характеристикам. При этом, согласно ранее принятым исходным данным, площадь миделя МКА считается равной 1 м². На основе нее рассчитывается баллистический коэффициент.

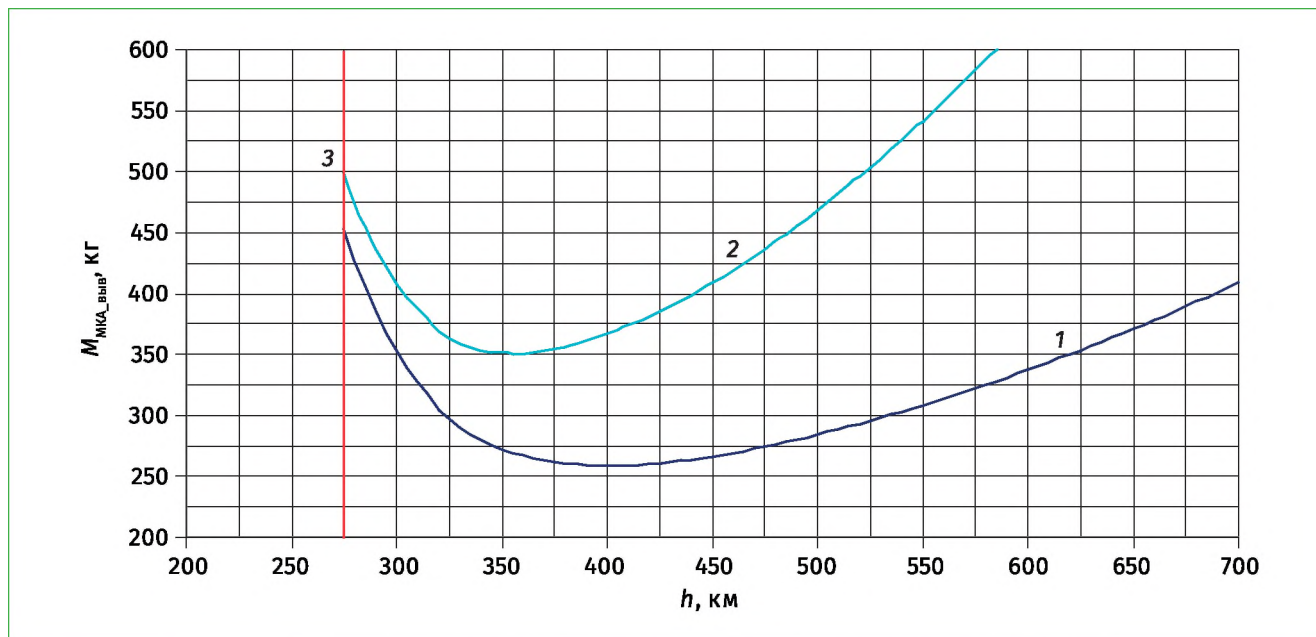


Рис. 2. Проектная масса МКА при выведении: 1 – $d = 2$ м; 2 – $d = 1$ м; 3 – $h_0 = 275$ км

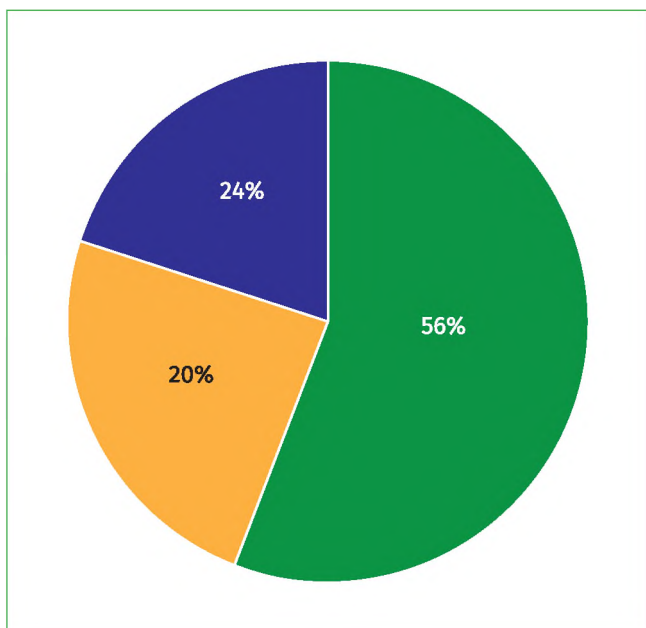


Рис. 3. Распределение топлива при $h = 350$ км и $d = 1$ м:
 ■ – поддержание; ■ – довыведение; ■ – сход с орбиты

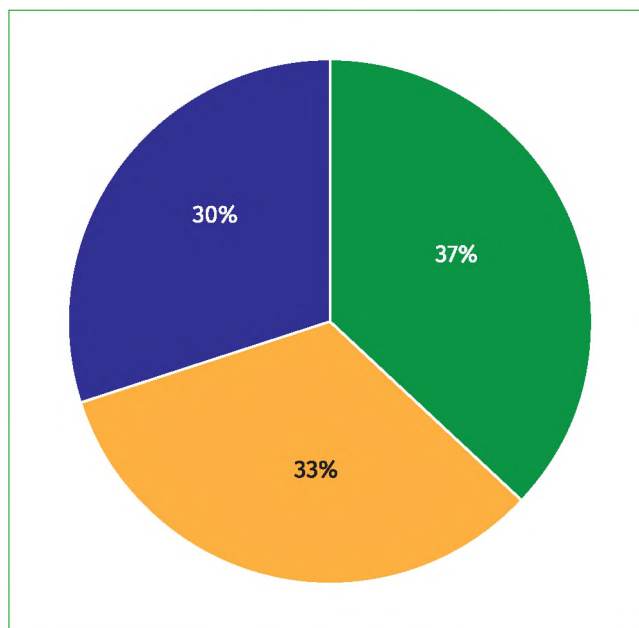


Рис. 4. Распределение топлива при $h = 400$ км и $d = 2$ м:
 ■ – поддержание; ■ – довыведение; ■ – сход с орбиты

Для обеспечения всех операций по маневрированию МКА, включая сход с орбиты, доля топлива на борту составит порядка 14,2% от выводимой массы при размещении на ССО высотой 350 км и по-

рядка 13,3% при размещении на ССО высотой 400 км. Данные значения следует считать консервативной оценкой снизу, которая получена для статической модели атмосферы. С учетом изменения геомаг-

Проектные запасы топлива на МКА при $T_{\text{САС}} = 5$ лет

Характеристика	Линейное разрешение, м	
	1	2
Высоты ССО с минимальной массой МКА, км	350...355	395...405
Выводимая масса МКА $M_{\text{МКА_выв}}$, кг	350,67	259,04
Масса топлива на довыведение $M_{\text{Т_дов}}$, кг	10,03	12,78
Масса топлива на поддержание $M_{\text{Т_под}}$, кг	27,96	11,48
Масса топлива на сход с орбиты $M_{\text{Т_сх}}$, кг	11,88	10,27
Рабочий запас топлива $M_{\text{Т_р}}$, кг	49,87	34,53
Баллистический коэффициент МКА на начало функционирования на рабочей орбите $S_{\text{Б,д}}$, м ² /кг	0,00293	0,00404
Баллистический коэффициент МКА в конце функционирования на рабочей орбите $S_{\text{Б,к}}$, м ² /кг	0,00319	0,00423
Запас характеристической скорости, м/с	316,0	294,7

нитной обстановки и влияния 11-летнего цикла солнечной активности пиковые значения параметров атмосферного торможения могут быть выше на 30...40%. Таким образом, в проектных расчетах следует доводить долю запаса топлива на борту до 15...20% от массы МКА при указанном САС.

Выводы

В статье описана методика расчета проектных запасов топлива для МКА дистанционного зондирования Земли. Получены конечные расчетные зависимости для определения общей массы аппарата,

выводимого на орбиту, и распределение топлива на основные динамические операции. Показано, что функциональная зависимость массы МКА от высоты рабочей ССО имеет экстремум и оптимальный диапазон высот размещения. При обеспечении САС 5 лет и линейного разрешения ССО на уровне 1 м целесообразно выведение МКА на ССО высотой 350 км, а при линейном разрешении 2 м на ССО высотой 400 км. Анализ распределения топлива на основные операции показал, что в проектных расчетах следует доводить долю топлива до 15...20% от выводимой массы МКА при САС не менее 5 лет.

Список литературы

1. Гриценко А.А. Высокоскоростные спутниковые системы LEO/MEO/HEO-HTS – текущее состояние и перспективы развития [Электронный ресурс] // Форум CSTB/TELECOM&MEDIA-2017. М. URL: http://www.spacecenter.ru/Resurses/2017/LEO_MEO_HEO-HTS_Gritsenko_2017.pdf.
2. Гриценко А.А. Основные направления развития и новые проекты HTS спутниковых систем на НГСО // XXI Межд. выставка CSTB/ TELECOM&MEDIA-2019. М., 2019.
3. Лысенко А.А., Улыбышев С.Ю. Методика орбитального построения спутниковой системы для решения задач оперативного глобального мониторинга // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 11 (71). С. 1.
4. Улыбышев С.Ю. Применение солнечно-синхронных орбит для космического аппарата оперативного глобального мониторинга // Космические исследования. 2016. Т. 54. № 6. С. 486–492.

5. Улыбышев С.Ю. Комбинированные спутниковые системы непрерывного глобального обзора на экваториальной и полярных круговых орбитах // *Космические исследования*. 2015. Т. 53. № 4. С. 332–344.
6. Улыбышев С.Ю. Неоднородные спутниковые системы глобального обзора на экваториальной и приполярных круговых орбитах // *Космические исследования*. 2016. Т. 54. № 4. С. 323–333.
7. Зельвин Д.А., Топорков А.Г. Анализ особенностей реализации схемы полета блока выведения при запуске микрокосмических аппаратов на промежуточную орбиту с синхронной прецессией // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2019. № 9 (93). С. 6.
8. Улыбышев С.Ю. Оптимизация траекторий выведения ракет-носителей с использованием линейного программирования при учете ограничений // *Космонавтика и ракетостроение*. 2011. № 4. С. 92–100.
9. Улыбышев С.Ю. Выведение группировки микроспутников с использованием промежуточной орбиты с синхронной прецессией // *Тр. МАИ*. 2018. № 98.
10. 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.
11. Хмельщиков Ю.С., Сенцов Ю.И. Зависимость веса космического аппарата дистанционного зондирования Земли от пространственного разрешения съемочной аппаратуры // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*. 2015. № 2 (28). С. 81–88.
12. Баранов А.А. Маневрирование космических аппаратов в окрестности круговой орбиты. М.: Изд-во «Спутник +», 2016. 512 с.
13. Глушков А.В., Улыбышев С.Ю. Управление многосопловой двигательной установкой космического аппарата с ограничением накопления кинетического момента: сб. материалов конф. «Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных исследований». Химки: ФГУП «НПО им. С. А. Лавочкина», 2015. С. 316–322.
14. Улыбышев С.Ю. Математическая модель для режима тактовой работы жидкостного ракетного двигателя космического аппарата // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2018. Вып. 10. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-10-1813>.
15. Глушков А.В., Улыбышев С.Ю. Применение режима тактовой работы к двигательной установке для высокоточного орбитального маневрирования и переориентации космического аппарата [Электронный ресурс]: тр. МАИ. 2018. № 101. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=96960>.
16. Улыбышев С.Ю. Алгоритм управления двигательной установкой космического аппарата с парированием накопления кинетического момента // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2019. № 5. С. 145–154.
17. ГОСТ 52925-2018. Изделия космической техники. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства. М.: Стандартинформ, 2011. 8 с.
18. Зеленцов В.В. Проблемы мелкого космического мусора // *Наука и образование*. 2015. № 4. С. 89–104.
19. Асланов В.С., Алексеев А.В., Ледков А.С. Определение параметров оснащенной гарпуном тросовой системы для буксировки космического [Электронный ресурс]: тр. МАИ. 2016. № 90. С.1–10. URL: <http://www.mai.ru/science/trudymai.ru/published.php?ID=74644>.
20. Aslanov V., Yudinsev V. Dynamics of large space debris removal using tethered space tug // *Acta Astronautica*. 2013. Vol. 91. P. 149–156.
21. Varanov A.A., Grishko D.A. Ballistic aspects of large-size space debris flyby at low earth near-circular orbits // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2015. Vol. 54. N 4. P. 639–650.
22. Баранов А.А., Гришко Д.А., Чернов Н.В. Облет низкоорбитальных объектов крупногабаритного космического мусора с их последовательным уводом на орбиту с уменьшенным временем баллистического существования // *Наука и Образование*. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. № 4. С. 48–64.
23. Улыбышев С.Ю. Математическое моделирование и сравнительный анализ схем применения аппарата-буксировщика для решения задачи увода объектов космического мусора на орбиту захоронения // *Тр. МАИ*. 2019. Ч. 1. № 106.
24. Улыбышев С.Ю. Математическое моделирование и сравнительный анализ схем применения аппарата-буксировщика для решения задачи увода объектов космического мусора на орбиту захоронения // *Тр. МАИ*. 2019. Ч. 2. № 107.
25. ОКБ «Факел». Термокаталитические двигатели [Электронный ресурс]. URL: https://www.fakel-russia.com/images/gallery/producia/fakel_tkd_print.pdf. (дата обращения: 10.08.2020).
26. Топливные баки и газовые баллоны высокого давления. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.niimashspace.ru/files/2020/Katalog-2019-rus.pdf> (дата обращения: 10.08.2020).

27. Улыбышев С.Ю. Анализ взаимной эволюции параметров двух синхронно прецессирующих орбит [Электронный ресурс] // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. Вып. 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/arse/adb/1471.html>. DOI 10.18698/2308-6033-2016-03-1471.

28. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. М., 1981. 11 с.

References

1. Gricenko A.A. Vysokoskorostnye sputnikovye sistemy LEO/MEO/HEO-HTS – tekushchee sostoyanie i perspektivy razvitiya // Forum CSTB/TELECOM&MEDIA–2017 [Elektronnyj resurs]. M. URL: http://www.spacecenter.ru/Resurses/2017/LEO_MEO_HEO-HTS_Gritsenko_2017.
2. Gricenko A.A. Osnovnye napravleniya razvitiya i novye proekty HTS sputnikovyh sistem na NGSO // XXI Mezhd. vystavka CSTB/TELECOM&MEDIA–2019 [Elektronnyj resurs]. M. URL: https://spacecenter.ru/Resurses/2019/NGSO_System_Gritsenko.pdf
3. Lysenko A.A., Ulybyshev S.Yu. Metodika orbital'nogo postroeniya sputnikovoj sistemy dlya resheniya zadach operativnogo global'nogo monitoringa // Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii. 2017. N 11 (71). P. 1.
4. Ulybyshev S.Yu. Primenenie solnechno-sinhronnyh orbit dlya kosmicheskogo apparata operativnogo global'nogo monitoringa // Kosmicheskie issledovaniya. 2016. T. 54. N 6. P. 486–492.
5. Ulybyshev S.Yu. Kombinirovannye sputnikovye sistemy nepreryvnogo global'nogo obzora na ekvatorial'noj i polyarnyh krugovyh orbitah // Kosmicheskie issledovaniya. 2015. T. 53. N 4. P. 332–344.
6. Ulybyshev S.Yu. Neodnorodnye sputnikovye sistemy global'nogo obzora na ekvatorial'noj i pripolyarnyh krugovyh orbitah // Kosmicheskie issledovaniya. 2016. T. 54. N 4. P. 323–333.
7. Zelvin D.A., Toporkov A.G. Analiz osobennostej realizacii skhemy poleta bloka vyvedeniya pri zapuske mikrokosmicheskikh apparatov na promezhutochnuyu orbitu s sinhronnoj precessiej // Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii. 2019. N 9 (93). P. 6.
8. Ulybyshev S.Yu. Optimizaciya traektorij vyvedeniya raket-nositelej s ispol'zovaniem linejnogo programmirovaniya pri uchete ogranichenij // Kosmonavtika i raketostroenie. 2011. N 4. P. 92–100.
9. Ulybyshev S.Yu. Vyvedenie gruppirovki mikrospatnikov s ispol'zovaniem promezhutochnoj orbity s sinhronnoj precessiej // Tr. MAI. 2018. № 98.
10. Lysenko A.A., Ulybyshev S.Yu. Vybor parametrov orbity kosmicheskogo apparata dlya operativnogo global'nogo monitoringa poverhnosti Zemli // Kosmonavtika i raketostroenie. 2016. N 5 (90). P. 45–56.
11. Hmel'shchikov Y.S., Sencov Y.I. Zavisimost' vesa kosmicheskogo apparata distancionnogo zondirovaniya Zemli ot prostranstvennogo razresheniya s»emochnoj apparatury // Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina. 2015. N 2 (28). P. 81–88.
12. Baranov A.A. Manevrirovaniye kosmicheskikh apparatov v okrestnosti krugovoj orbity. – M.: Izdatel'stvo «Sputnik +», 2016. 512 p.
13. Glushkov A.V., Ulybyshev S.Yu. Upravlenie mnogoplovoj dvigatel'noj ustanovkoj kosmicheskogo apparata s ogranicheniem nakopleniya kineticheskogo momenta: sb. materialov konf. «Aktual'nye voprosy proektirovaniya avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov dlya fundamental'nyh i prikladnyh issledovanij». Himki: Izdatel' FGUP «NPO im. S. A. Lavochkina», 2015. P. 316–322.
14. Ulybyshev S.Yu. Matematicheskaya model'dlya rezhima taktovoj raboty zhidkostnogo raketnogo dvigatelya kosmicheskogo apparata // Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii. 2018. Vol. 10. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-10-1813>.
15. Glushkov A.V., Ulybyshev S.Yu. Primenenie rezhima taktovoj raboty k dvigatel'noj ustanovke dlya vysokotochnogo orbital'nogo manevrirovaniya i pereorientacii kosmicheskogo apparata [Elektronnyj resurs]: tr. MAI. 2018. N 101. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=96960>.
16. Ulybyshev S.Yu. Algoritm upravleniya dvigatel'noj ustanovkoj kosmicheskogo apparata s parirovaniem nakopleniya kineticheskogo momenta // Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya. 2019. N 5. P. 145–154.
17. GOST 52925-2018. Izdeliya kosmicheskoy tekhniki. Obshchie trebovaniya k kosmicheskim sredstvam po ogranicheniyu tekhnogennogo zasoreniya okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva. M.: Standartinform, 2011. 8 p.
18. Zelencov V.V. Problemy melkogo kosmicheskogo musora // Nauka i obrazovanie. 2015. N 4. P. 89–104.
19. Aslanov V.S., Alekseev A.V., Ledkov A.S. Opredelenie parametrov osnashchennoj garpunom trosovoj sistemy dlya buksirovki kosmicheskogo [Elektronnyj resurs]: tr. MAI. 2016. N 90. P. 1–10. URL: <http://www.mai.ru/science/trudymai.ru/published.php?ID=74644>.
20. Aslanov V., Yudinsev V. Dynamics of large space debris removal using tethered space tug // Acta Astronautica. 2013. Vol. 91. P. 149–156.
21. Baranov A.A., Grishko D.A. Ballistic aspects of large-size space debris flyby at low earth near-circular orbits // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2015. Vol. 54. N 4. P. 639–650.

22. Baranov A.A., Grishko D.A., Chernov N.V. Oblet nizkoorbital'nyh ob'ektov krupnogabaritnogo kosmicheskogo musora s ih posledovatel'nyim uvodom na orbitu s umen'shennym vremenem ballisticheskogo sushchestvovaniya // Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana. Elektronnyj zhurnal. 2016. N 4. P. 48–64.

23. Ulybyshev S.Yu. Matematicheskoe modelirovanie i sravnitel'nyj analiz skhem primeneniya apparata-buksirovshchika dlya resheniya zadachi uvoda ob'ektov kosmicheskogo musora na orbitu zahoroneniya // Tr. MAI. 2019. CHast' 1. N 106.

24. Ulybyshev S.Yu. Matematicheskoe modelirovanie i sravnitel'nyj analiz skhem primeneniya apparata-buksirovshchika dlya resheniya zadachi uvoda ob'ektov kosmicheskogo musora na orbitu zahoroneniya // Tr. MAI. 2019. CHast' 2. N 107.

25. ОКБ «Fakel». Termokataliticheskie dvigateli [Elektronnyj resurs]. URL: https://www.fakel-russia.com/images/gallery/produczia/fakel_tkd_print.pdf (data obrashcheniya: 10.08.2020).

26. Toplivnye baki i gazovye ballony vysokogo davleniya [Elektronnyj resurs]. URL: <http://www.niimashspace.ru/files/2020/Katalog-2019-rus.pdf> (data obrashcheniya: 10.08.2020).

27. Ulybyshev S.Yu. Analiz vzaimnoj evolyucii parametrov dvuh sinhronno precessiruyushchih orbit [Elektronnyj resurs] // Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii. 2016. Vol. 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/arise/adb/1471.html>. DOI 10.18698/2308-6033-2016-03-1471.

28. GOST 4401-81. Atmosfera standartnaya. Parametry. M., 1981. 11 p.

Поступила в редакцию: 22.05.2022

Одобрена рецензентами: 25.06.2022

Принята к печати: 15.02.2023

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: wardoc5@rambler.ru.

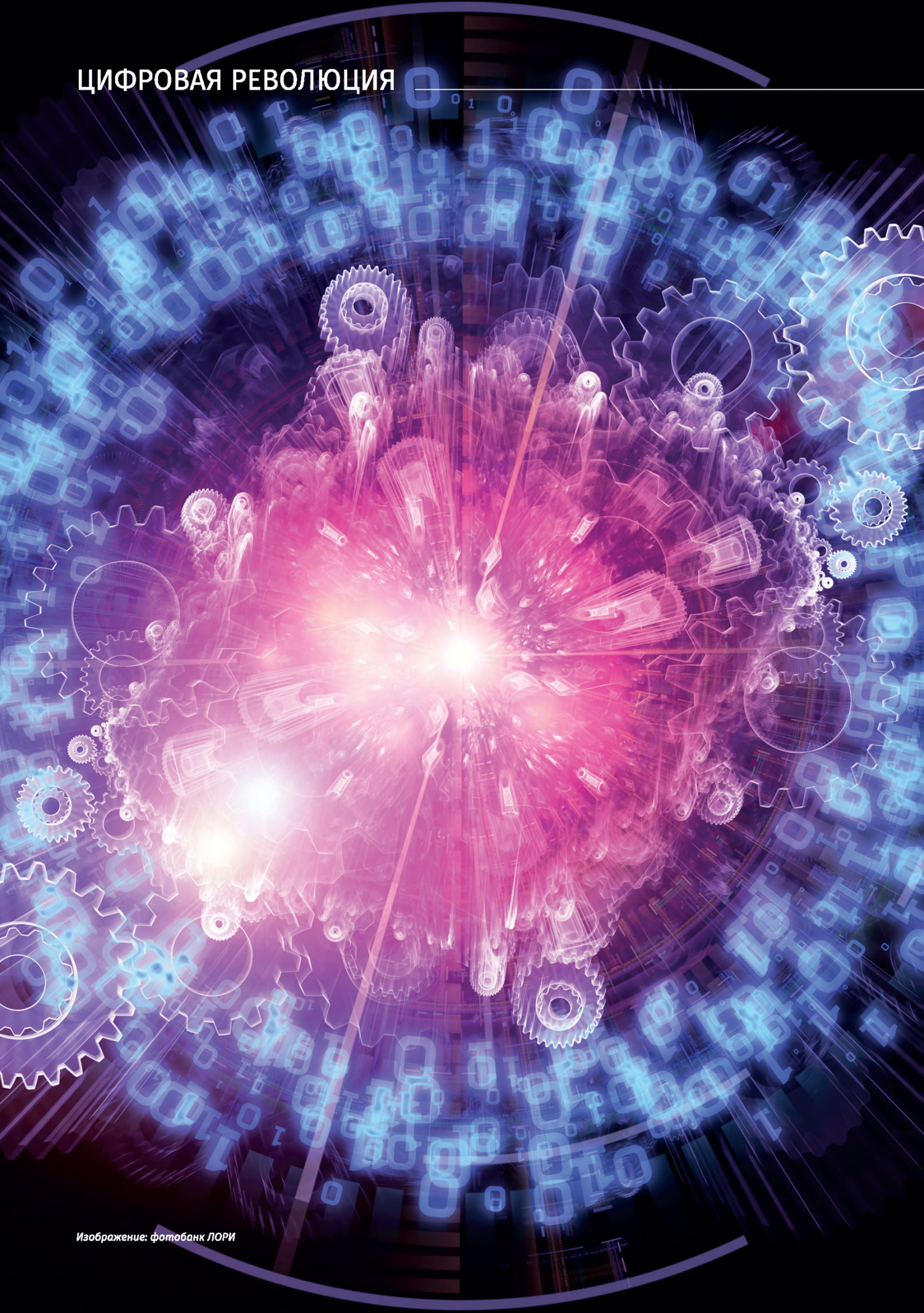
Sergei Yu. Ulybyshev* – Grand PhD in Engineering sciences, employee of the SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics». Postal address: 16A Nagatinskaya str., Moscow, 115487. E-mail: wardoc5@rambler.ru.

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

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

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

ЦИФРОВАЯ РЕВОЛЮЦИЯ



УДК 004.942, 355.692.4

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ КАК СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ*

С.М. МУЖИЧЕК, д.т.н., проф., М.А. КОРЗУН, к.т.н., Т.М. БОРИСОВА, А.А. ИВАНОВ,
ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики»
А.А. СКРЫННИКОВ, к.т.н., А.К. САВЕНКО,
ФАУ «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»

Аннотация. Рассмотрена методика создания специализированных цифровых двойников таких сложных технических систем, как средства поражения. Предложенный подход может быть использован при разработке цифровых систем исходных данных.

Ключевые слова: СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК; ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ПОЛИГОН; ЦИФРОВОЙ ПОЛИГОН; ОСКОЛОЧНОЕ ПОЛЕ; ПРОБИВНОЕ ДЕЙСТВИЕ.

Для цитирования: Мужичек С.М., Корзун М.А., Борисова Т.М., Иванов А.А., Скрынников А.А., Савенко А.К. Цифровые двойники как специализированная система исходных данных для средств поражения. 2023. № 1. С. 84–94.

DIGITAL DOUBLES AS A SPECIALIZED SOURCE DATA SYSTEM FOR WEAPONS OF DESTRUCTION

S.M. MUZHICHEK, Grand PhD in Engineering, Prof., M.A. KORZUN, PhD in Engineering,
T.M. BORISOVA, A.A. IVANOV,
SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics»
A.A. SKRYNNIKOV, PhD in Engineering, A.K. SAVENKO,
FAU «State Research Institute of Aviation Systems»

Abstract. The technique of creating specialized digital twins of such complex technical systems as means of destruction is considered. The proposed approach can be used in the development of digital systems of initial data.

Keywords: SPECIALIZED DIGITAL TWIN; TEST SITE; DIGITAL TEST SITE; FRAGMENTATION FIELD; PENETRATING ACTION.

For citation: Muzhichek S.M., Korzun M.A., Borisova T.M., Ivanov A.A., Skrynnikov A.A., Savenko A.K. Digital doubles as a specialized source data system for weapons of destruction // Promising technologies for security systems. 2023. N 1. P. 84–94.

* Работа выполнена при поддержке РФФ, проект 23-29-00244.

Введение

Основными документами, позволяющими рассчитать эффективность поражающего действия боеприпасов (БП), являются системы исходных данных. Многие из них были разработаны еще в прошлом веке без учета существующих требований по цифровизации.

Как известно, 2 марта 2019 г. Правительство РФ приняло постановление № 234, утвердившее Положение о системе управления реализацией национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации», которая охватывает все отрасли отечественной промышленности, а также многие сферы жизнедеятельности государства.

Критически важно внедрение цифровых технологий на всех стадиях жизненного цикла такой сложной высокотехнологичной и дорогостоящей продукции, как вооружение, военная и специальная техника, в том числе БП. Здесь цена любой даже небольшой ошибки или временной задержки может привести к непоправимым последствиям.

В связи с всеобщей цифровизацией все чаще встречается термин «цифровой двойник» (ЦД). Сама концепция виртуального представления физического объекта используется уже не одно десятилетие. Однако за последние несколько лет развитие информационных технологий резко изменило ситуацию. Создание цифровой

За последние несколько лет развитие информационных технологий резко изменило ситуацию. Создание цифровой модели изделия стало одним из ведущих трендов промышленности.

модели изделия стало одним из ведущих трендов промышленности. Что такое ЦД, подробно изложено в ГОСТ Р 57700.37–2021 [1]. Согласно этому документу, для разработки ЦД конкретного изделия необходимо создать испытательный и цифровой (виртуальный) полигоны, а также многоуровневую систему требований.

Последняя обычно формируется заказчиком и излагается в тактико-техническом задании на разработку изделия. Испытательный и цифровой полигоны приходится разрабатывать исполнителю. При этом важное значение имеет разработка методического обеспечения этих полигонов, так как именно качество его разработки напрямую влияет на финансовые, материальные и иные затраты, связанные с разработкой самого изделия.

Методология исследования

В качестве специализированного ЦД БП будем понимать виртуальный аналог поражающего действия реального изделия, который содержит все необходимые данные по этому БП, включая информацию со стадий разработки, проектирования и производства, например, требования к объекту, трехмерную модель объекта, описание технологических процессов проведения испытаний, верификации и сертификации полученных моделей и т.д.

Рассмотрим в качестве примера методику создания специализированного ЦД осесимметричного осколочно-фугасного БП по пробивному действию его осколочного поля. Действующие ГОСТы [2–4] предполагают отдельное проведение экспериментов при определении распределений осколков по массам и углам. Распределение осколков по скоростям в действующих ГОСТах не предусмотрено, но для полной оценки поражающего действия осколочного поля боеприпаса

оно необходимо. Поэтому в разрабатываемой методике целесообразно объединить в одном опыте получение распределений осколков по массам, углам и скоростям.

Далее определение, собственно, пробивного действия осколков целесообразно объединить с определением распределений осколков по массам, углам и скоростям.

Пробивное действие осколков может быть оценено следующим образом [5]:

производят подрыв боеприпаса, установленного в заданное положение в центре профилированной мишенной стенки, размеченной на зоны, соответствующие направлениям разлета осколков в принятой системе координат;

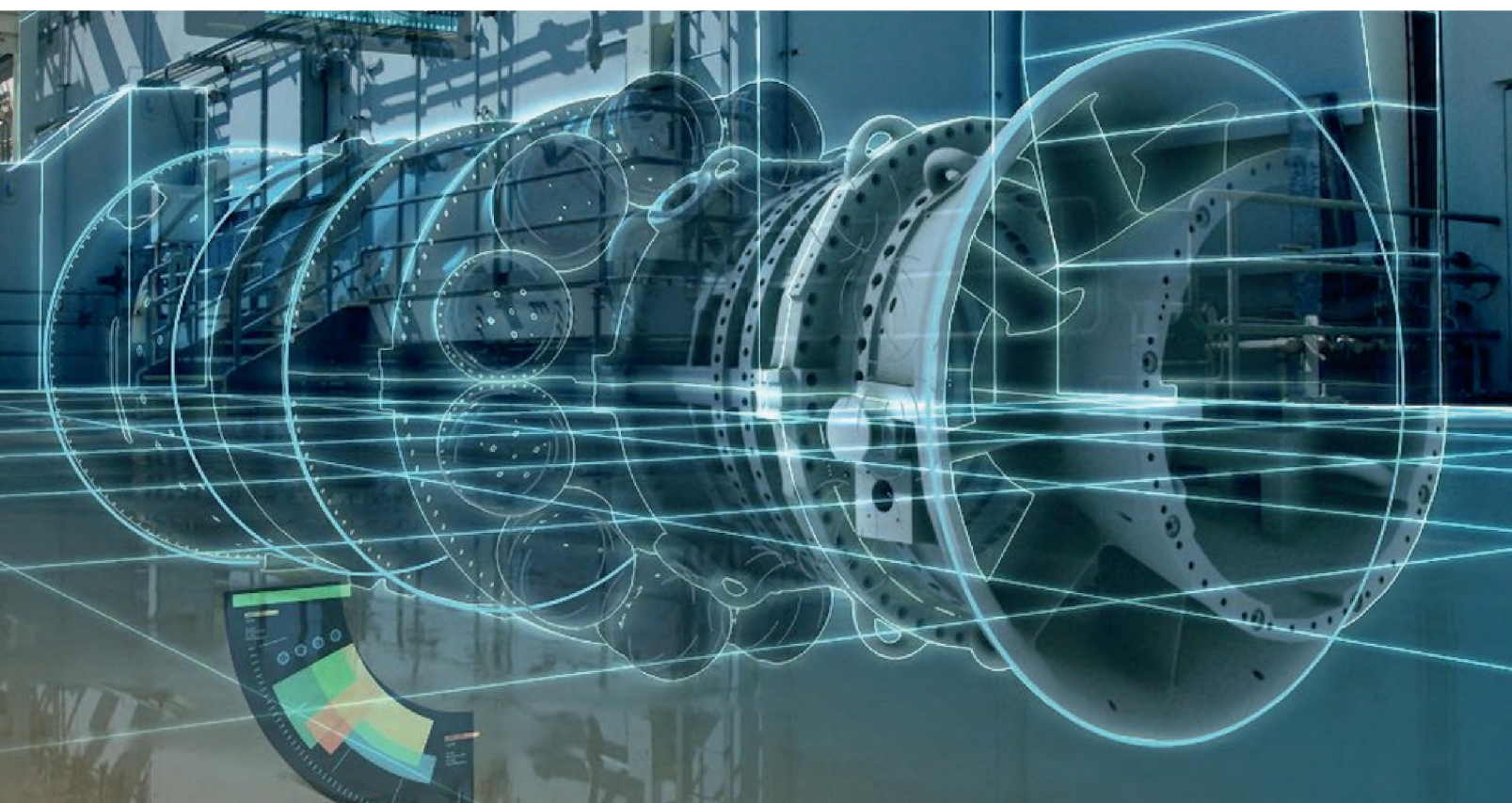
осуществляют регистрацию попадающих в каждую зону, измерение размеров и площади пробоин, регистрацию, запись и последующую обработку сигналов с электретных датчиков, размещенных по соответствующим зонам мишенной стенки и равным им по размерам;

проводят оценку количественных характеристик осколочного поля по массам, скоростям, форме и размерам осколков.

Боеприпас устанавливают так, чтобы его продольная ось совпадала с про-

дольной осью профилированной стенки, профилированную мишенную стенку выполняют полуцилиндрической, симметрично зонам полуцилиндрической продольной стенки устанавливают имитатор полубесконечной преграды, имитатор отсека с жизненно-важными агрегатами (ЖВА) первого типа, имитатор отсека с ЖВА второго типа. Затем на лицевую поверхность зон мишенной стенки, расположенных симметрично имитаторам, наносят размеры входных стенок имитаторов и определяют их координаты, для имитатора полубесконечной преграды определяют предельную толщину монолитной преграды конечной толщины, которую способно пробить осколочное поле боеприпаса.

Для имитаторов отсека с ЖВА первого и второго типов определяют факт поражения (непоражения), соотносят полученные данные с энергетикой осколочного поля поражения, накрывающего входные стенки имитаторов первого и второго типа, уточняют для них значения параметров запреградного осколочного поля в виде предельной суммарной толщины разнесенных преград, которые способно пробить осколочное поле,



Исследования показали, что блоки аппаратуры как экраны неоднородны, то есть характеризуются достаточно большим разбросом значений поля разброса осколков в зависимости от места попадания.

и регрессионных зависимостей вида $S_x = a + ve^K$ для оценки площади сечения запреградного поля осколков (ЗПО), способного поразить ЖВА, находящиеся в отсеках цели, где a и v – эмпирические коэффициенты; K – обобщенный параметр ЗПО.

Известно, что агрегаты бортовой системы управления, вторичные источники и распределительные щитки системы электроснабжения обычно представляют собой блоки, содержащие электронную, электротехническую и электромеханическую аппаратуру. Возможны два варианта их компоновки: непосредственно на некотором расстоянии за обшивкой или даже прикрепленными к внутренней стороне обшивки и экранированными другими элементами: электрожгутами, трубопроводами, блоками с аппаратурой и т.д. При оценках уязвимости экранирующие элементы представляются набором дюралевых преград, размеры которых соответствуют размерам экрана. В работе [6] приведены экспериментально оцененные коэффициенты дюралевого эквивалента различных типов аппаратуры. В результате выполненных исследований было установлено, что блоки аппаратуры как экраны неоднородны, то есть характеризуются достаточно большим разбросом значений K_d в зависимости от места попадания осколка в блок. Значения K_d ,

как случайные величины, распределены по логарифмически нормальному закону.

Характерной особенностью агрегатов бортовой системы управления полетом (вычислителей, преобразователей сигналов, датчиков и др.) является их резервирование. По условиям компоновки на типовой цели не всегда существует возможность их разнесения по бортам для исключения одновременного поражения при подходе осколков с одного направления. Часто резервирующие друг друга модули располагаются компактно, в том числе в одном конструктиве. При этом большое значение приобретают размеры ЗПО при его дроблении на преградах-экранах, которое способно одновременно поразить модули.

Современные и перспективные типовые цели содержат ЖВА, имеющие различное конструктивное исполнение и характеристики, разную степень экранировки, что вместе с высокой стоимостью делает невозможным проведение экспериментальных исследований на реальных объектах. Поэтому в экспериментах по исследованию механического действия осколков предложено использовать физические модели (имитаторы) уязвимых отсеков целей, содержащих ЖВА.

В существующем методическом аппарате оценки характеристик уязвимости к механическому (пробивному) действию осколков ЖВА различного назначения представляются физическими моделями в виде набора разнесенных дюралевых преград, пробивное действие осколков по которым хорошо изучено. Правомерность такого представления показана в работе [6], где для оценки пробивного действия осколков предлагается представлять агрегат-экран набором дюралевых преград, суммарная толщина которых определяется коэффициентом дюралевого эквивалента в зависимости от состава,

конструкционного исполнения элементов ЖВА, их электрической мощности.

Анализ отсеков типовых целей, поражаемых механическим действием осколков, показал, что все множество отсеков можно представить двумя унифицированными моделями. Первая модель А представляет собой обшивку цели, выполненную из реального материала (сплавов алюминия, титана, углепластика, стали), и находящиеся на заданном расстоянии от нее уязвимые агрегаты различного физического содержания. Множество вариантов конструкций моделей ЖВА соответствует исследуемому типу цели.

Вторая модель В дополняется агрегатом, экранирующим ЖВА, так называемым агрегатом-экраном, также различного физического содержания, размещенным между обшивкой и ЖВА.

Модели отсеков можно описать двумя унифицированными схемами, изображенными на рисунке.

Модель А обычно описывается с помощью четырех параметров: ρ_1 – плотность материала внешней обшивки отсека; h_1 – толщина внешней обшивки (преграды); L_1 – расстояние от обшивки до ЖВА; h_2 – толщина дюралевой преграды, выбираемая из условия поражения ЖВА ЗПО.

Модель В описывается семью параметрами: ρ_1 – плотность материала внешней обшивки отсека; h_1 – толщина внешней обшивки (преграды); L_1 – расстояние от обшивки до модели агрегата-экрана; h_3^* – суммарная толщина разнесенных дюралевых преград модели агрегата-экрана, как эквивалент агрегата-экрана по отношению к механическому действию осколка; l_3 – длина модели агрегата-экрана; L_2 – расстояние от модели агрегата-экрана до ЖВА; h_2 – толщина дюралевой преграды, выбираемая из условия поражения ЖВА осколками.

Для практического использования рассмотренных выше моделей отсеков необходимо выполнить следующие условия подобия натурального объекта (индекс «Н») и модели (индекс «М»):

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{1Н} = L_{1М}, \quad h_{1Н} = h_{1М} \\ L_{2Н} = L_{2М}, \quad h_{2Н} = h_{2М} \\ \rho_{0Н} = \rho_{0М}, \quad m_{0Н} = m_{0М} \\ \vec{V}_{0М} = |\vec{V}_{0Н} + \vec{V}_{0СВН}| \end{array} \right.$$

Кроме этого, известно, что агрегат-экран может быть представлен набором дюралевых преград толщиной $h_1 \approx 1...3$ мм, размещенных на длине, равной размеру агрегата l_3 , а приведенные на рисунке унифицированные схемы А и В могут использоваться как физические модели отсеков ЖВА для исследования как критериев поражения отсеков с ЖВА,

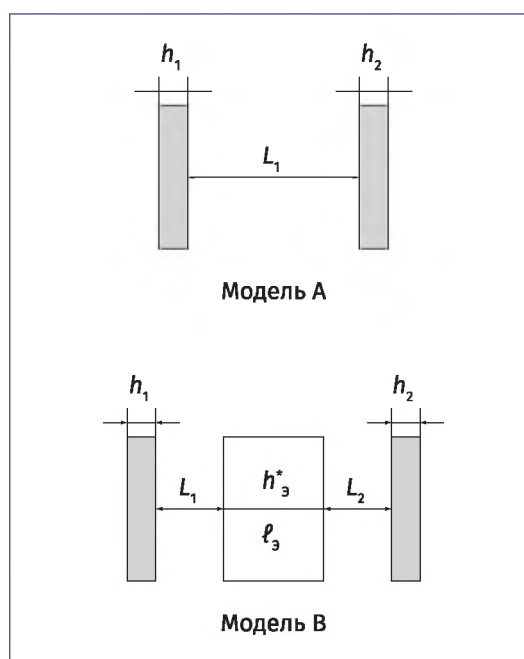


Рисунок. Унифицированные схемы отсека с ЖВА

так и поражающего действия по ним ЗПО. Адекватность такой модели проверена на основе сравнительной оценки с экспериментальными результатами, полученными с использованием натуральных образцов агрегатов-экранов. Поэтому в настоящей методике по унифицированной схеме А выполняется имитатор отсека с ЖВА первого типа, а по унифицированной схеме В – имитатор отсека с ЖВА второго типа.

При проведении экспериментальных исследований механического (пробивного) действия осколка по монолитной и разнесенным преградам в качестве показателей пробивной способности осколка принимаются обычно следующие величины [6]:

$h_{пр}$ – предельная толщина монолитной преграды конечной толщины, которую способен пробить поражающий элемент (ПЭ);

h_{Σ} – предельная суммарная толщина разнесенных преград, которые способен пробить ПЭ.

Перечисленные показатели пробивной способности осколка представ-

Анализ отсеков типовых целей, поражаемых механическим действием осколков, показал, что все множество отсеков можно представить двумя унифицированными моделями. Первая представляет собой обшивку цели, выполненную из реального материала, вторая – дополняется агрегатом-экраном.

ляют собой обобщенные параметры, зависящие от физико-механических и конструктивных характеристик осколка и экранирующих преград, от скорости и углов соударения осколка с преградами.

Согласно работе [6], между величинами $h_{пр}$ и h_{Σ} существует связь $h_{\Sigma} = h_{пр} (1 - k_v \lg \sigma)$, где k_v – коэффициент, учитывающий уменьшение (при $V_b > V_b^{кр}$) или увеличение (при $V_b < V_b^{кр}$) пробивного действия осколка по разнесенным преградам в сравнении с действием того же осколка по монолитной преграде; V_b – скорость ПЭ; $V_b^{кр}$ – значение скорости V_b , при котором $h_{\Sigma} = h_{пр} (k_v = 0)$; $\lg \sigma$ – обобщенный параметр, характеризующий схему разнесения преград, учитывающий толщины преград и расстояния между ними; h_i – толщина i -й преграды, выраженная в дюралевом эквиваленте; x_i – расстояние от 1-й до i -й преграды по линии стрельбы; n – количество разнесенных преград, с которыми произошло взаимодействие осколка при различных схемах разнесенных преград.

Вероятность поражения исходного отсека механическим действием осколка определяется путем сравнения его пробивной способности, оцениваемой интервалом значений ($h_{\Sigma min}, h_{\Sigma max}$), с суммарной толщиной (h_{min}, h_{max}) разнесенных преград в дюралевом эквиваленте, которые должен пробить осколок, чтобы поразить ЖВА, находящийся в отсеке.

Для расчета вероятности поражения исходного отсека механическим действием ЗПО используется параметр S_{Σ} , численно равный приведенной площади следа ЗПО, накрывающего ЖВА и способного практически достоверно его поразить. Экспериментальные исследования, результаты которых опубликованы, в частности, в работе [6], показали, что значение S_{Σ} зависит от следующих переменных:



Изображение: фотобанк ЛОРИ

$$S_{\Sigma} = f(m_0, V_B, h_1, L_1, \alpha, \rho_0, K_{\Phi}, h_{\Sigma}^*, l_{\Sigma}, L_2),$$

где m_0 , ρ_0 , K_{Φ} , V_B , α – масса, удельная плотность материала, коэффициент формы осколка, скорость и угол его соударения с первой преградой соответственно; h_1 , L_1 – толщина первой преграды в дюралевом эквиваленте и расстояние от нее до агрегата (жизненно важного или экрана); h_{Σ}^* , l_{Σ} , L_2 – параметр, характеризующий стойкость (дюралевый эквивалент) агрегата-экрана к пробивному действию ПЭ, линейный размер агрегата-экрана с рассматриваемого уязвимого направления и расстояние от его тыльной грани до ЖВА соответственно.

Известно, что величины h_1 , h_{Σ}^* , l_{Σ} , L_1 , L_2 используются при определении значений h_{\min} , h_{\max} , $\lg \sigma$, которые входят в число исходных данных для каждого отсека, поражаемого механическим действием осколков. Другие переменные функции, а именно m_0 , V_B , α , ρ_0 , K_{Φ} , используются для расчета значений $h_{\text{пр}}$, $h_{\Sigma \min}$, $h_{\Sigma \max}$. Поэтому целесообразно связать расчет значений S_{Σ} с уже имеющимися параметрами или вы-

числяемыми при оценках эффективности механического поражающего действия значениями, то есть получить функцию $S_{\Sigma} = S_{\Sigma}(h_{\min}, h_{\max}, \lg \sigma, h_{\text{пр}}, h_{\Sigma \min}, h_{\Sigma \max})$.

Для получения функции S_{Σ} , исходя из физических аспектов механического поражающего действия осколков по ЖВА, целесообразно определить ее структуру. Известно, что поражение ЖВА достигается, если попавший в отсек осколок способен пробить экранирующие преграды, а энергия запреградного осколочного поля, состоящего из фрагментов разрушившегося осколка и частиц выбитого из экранирующих преград материала, достаточна для поражения уязвимых элементов ЖВА. Причем необходимым условием образования ЗПО, способного поразить ЖВА, является дробление ПЭ. Это условие выражается соотношением $h_{\Sigma} < h_{\text{пр}}$. Чем больше эта разница, тем большая часть энергетического потенциала осколка идет на образование ЗПО, а не на пробитие преград. Введем параметр $K_1 = (h_{\text{пр}} - h_{\Sigma})/h_{\text{пр}}$, определяющий долю энергетического потенциала осколка, идущего на образование ЗПО.



Изображение: fia.ru

Анализ результатов проведенных экспериментов показал, что на параметры запреградного поля осколков существенно влияет масса первичного осколка.

Другим условием, необходимым для поражения ЖВА ЗПО, является неравенство $h_3 < h_2$. В данном случае значение h_3 вычисляется как сумма h_1, h_3^*, h_2 , где h_2 – критерий поражения ЖВА ЗПО, определяемый толщиной дюралевой преграды, которую оно должно пробить, чтобы ЖВА полностью вывести из строя. Причем, если $h_3 \approx h_2$, то есть на пределе пробития преград-экранов, значение S_2 стремится к нулю, так как практически весь энергетический потенциал ЗПО расходуется на пробитие преград-экранов. Поэтому вводится параметр $K_2 = 1 - (h_2/h_3)^{3/2}$, определяющий долю энергетического потенциала ЗПО, воздействующего непосредственно на ЖВА.

Произведение $K_1 K_2$ определяет долю энергетического потенциала осколка, воздействующего непосредственно на ЖВА. Но этот потенциал по мере продвижения осколка по системе преград-экранов расходуется неравномерно. Так, при скорости соударения осколка с первой преградой, существенно превышающей скорость дробления осколка, наибольшее значение S_2 смещается в сторону меньших значений h_3 . Кроме этого, на характер дробления осколка влияет и значение $\lg \sigma$. Поэтому вводится параметр $K_3 = 1 - |0,5c - K_2|$, где $c \approx (V_B/V_{др\max})^{0,5} \cdot \lg \sigma / 3,5$; $V_{др\max}$ – наибольшее значение скорости V_B , при которой случайная функция $K_V(V_B)$ может принимать значения, равные 0.

Помимо основного осколка в формировании ЗПО участвуют и частицы преграды, скорость которых несущественно отличается от запреградной скорости осколка. Причем результаты исследований показали, что при прочих равных условиях энергетический потенциал выбитых частиц прямо пропорционален толщине преграды. Поэтому вводится параметр $K_4 = (m_0 + \rho_1 h_1 S_1 / \sin \alpha) / m_0$, где m_0 – масса первичного осколка; ρ_1 – удельная плотность материала первой преграды; h_1 – толщина первой преграды; α – угол соударения осколка с первой преградой; S_1 – площадь пробоины на первой преграде, образовавшейся в результате воздействия по ней осколка.

Значение S_1 рассчитывается по формулам, приведенным в исходных данных по уязвимости типовой цели. Параметр K_4 характеризует увеличение доли энергетического потенциала осколка, используемого на формирование ЗПО, за счет выбитых частиц первой преграды.

Анализ результатов проведенных экспериментов показал, что на параметры ЗПО существенно влияет масса первичного осколка. Это влияние проявляется

и косвенно, через вторичные параметры $h_{пр}$, $h_{э}$, для расчета которых используются значения m_0 в сочетании с другими параметрами. Однако, как видно из результатов опытов, приведенных в работе [7], значение массы осколка является наиболее значимым параметром при формировании ЗПО и во многом определяет величину S_2 . Поэтому целесообразно ввести параметр $K_5 = m_0^{1/3}$, определяющий непосредственно зависимость S_2 от m_0 .

Далее по результатам опытов рассчитываются значения K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K . Обобщенный параметр ЗПО K получается как произведение значений параметров K_i , $i = 1...4$. Параметры $h_{пр}$, $h_{э}$, с использованием которых рассчитаны значения K_1 , K_2 , являются случайными величинами, вариации которых относительно статистического математического ожидания достигают 0,15...0,2. Случайными величинами также являются параметры K_3 , K_4 , следовательно, и параметр K . По результатам проведенных испытаний в качестве независимого параметра ЗПО в работе [7] предложено преобразование входной переменной вида e^K . Построенные с его использованием по результатам испытаний

парные регрессии имеют вид $\hat{S}_2 = a + be^K$, где a и b – константы, полученные в результате обработки экспериментальных данных; K – обобщенный параметр ЗПО.

Выводы

Использование предлагаемой методики обеспечивает возможность определения количественных характеристик осколочного поля по массам, углам, скоростям, форме и размерам осколков для осесимметричных боеприпасов с осесимметричными осколочными полями, а также одновременно оценивать пробивное действие осколочного поля испытываемого боеприпаса по силовому набору и ЖВА типовых целей.

Таким образом, по результатам выполненных авторами исследований предложена методика разработки специализированных цифровых двойников боеприпасов применительно к пробивному действию их осколочного поля. Представленный подход к получению специализированных ЦД БП может быть использован при разработке цифровых систем исходных данных.

Список литературы

1. ГОСТР 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 10 с.
2. ГОСТ 25798–83 Боеприпасы. Общие требования к экспериментальным методам определения характеристик и параметров осколочности и фугасности. М.: Стандартинформ, 2018. 4 с.
3. ГОСТ 25799–83 Боеприпасы. Метод определения характеристик и параметров осколочности подрывом в устройствах для улавливания поражающих элементов. М.: Стандартинформ, 2018. 28 с.
4. ГОСТ 25800–83 Боеприпасы. Метод определения характеристик осколочного поля поражения подрывом в щитовой мишенной обстановке. М.: Стандартинформ, 2018. 50 с.
5. Способ оценки пробивного действия осколков осесимметричного боеприпаса с осесимметричным полем разлета осколков: пат. 2788241 Рос. Федерация / С.А. Бобков [и др.]. 2022.
6. Желязков Е.П., Комраков Н.Ю., Крысин А.В. Методические основы определения исходных данных по уязвимости воздушных целей для оценок эффективности стрельбы по ним малогабаритными ЗУР: монография. Тверь, 2002.
7. Комраков Н.Ю., Смагин П.В. Методика оценки параметров запреградного поля осколков, способного поразить жизненно важные агрегаты воздушных целей: сб. статей // XXII Всерос. науч.-техн. конф. школы-семинара «Передача, прием, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах». М.: РПА «АРП», 2011. С. 253–257.

References

1. GOST 57700.37–2021. Computer models and modeling. Digital twins of products. General provisions. M.: Russian Institute for Standardization, 2021. 10 p.
2. GOST 25798–83 Ammunition. General requirements for experimental methods for determining the characteristics and parameters of fragmentation and explosiveness. M.: Standartinform, 2018. 4 p.
3. GOST 25799–83 Ammunition. Method for determining the characteristics and parameters of fragmentation by detonation in devices for trapping striking elements. M.: Standartinform, 2018. 28 p.
4. GOST 25800–83 Ammunition. Method for determining the characteristics of a fragmentation field of destruction by detonation in a shield target environment. Moscow: Standartinform, 2018. 50 p.
5. A method for evaluating the penetrating effect of fragments of an axisymmetric ammunition with an axisymmetric field of fragmentation: pat. N 2788241 Rus. Federation / S.A. Bobkov [at al.]. 2022.
6. Zhelyazkov E.P., Komrakov N.Yu., Krysin A.V. Methodological bases for determining the initial data on the vulnerability of air targets for assessing the effectiveness of firing at them with small-sized missiles: monograph. Tver, 2002.
7. Komrakov N.Yu., Smagin P.V. Methodology for estimating the parameters of the behind-the-barrier field of fragments capable of hitting vital units of air targets: collection of articles // XXII All-Russian scientific and technical conference of the school-seminar «Transmission, reception, processing and display of information about fast processes». M.: RPA «ARP», 2011. P. 253–257.

Поступила в редакцию: 22.05.2022

Одобрена рецензентами: 25.06.2022

Принята к печати: 15.02.2023

Об авторах

Сергей Михайлович Мужичек* – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики». Адрес для почтовых отправлений: 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А. E-mail: Msm19@yandex.ru.

Sergei M. Muzhichek* – Corresponding Member Russian Academy of Sciences, Grand PhD in Engineering sciences, Professor, employee of the SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics». Postal address: 16A Nagatinskaya str., Moscow, 115487. E-mail: Msm19@yandex.ru.

Михаил Анатольевич Корзун – кандидат технических наук, сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики». 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А. E-mail: Mi7kor@yandex.ru.

Mikhail An. Korzun – PhD in Engineering sciences, employee of the SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics». 16A Nagatinskaya str., Moscow, 115487. E-mail: Mi7kor@yandex.ru.

Татьяна Михайловна Борисова – сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики». 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А. E-mail: tm-47@yandex.ru.

Tatyana M. Borisova – employee of the SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics». 16A Nagatinskaya str., Moscow, 115487. E-mail: tm-47@yandex.ru.

Андрей Александрович Иванов – сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики». 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А.

Andrey A. Ivanov – employee of the SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics». 16A Nagatinskaya str., Moscow, 115487.

Андрей Александрович Скрынников – кандидат технических наук, доцент, сотрудник ФАУ «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем». 125167, г. Москва, ул. Викторенко, 7. E-mail: A1260@mail.ru.

Andrey A. Skrynnikov – PhD in Engineering sciences, Associate Professor, employee of the FAU «State Research Institute of Aviation Systems». 7 Viktorenko str., Moscow, 125167. E-mail: A1260@mail.ru.

Анастасия Константиновна Савенко – аспирант, ФАУ «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем». 125167, г. Москва, ул. Викторенко, 7. E-mail: Sawenko.Nastya@yandex.ru.

Anastasia K. Savenko – postgraduate student, FAU «State Research Institute of Aviation Systems». 7 Viktorenko str., Moscow, 125167. E-mail: Sawenko.Nastya@yandex.ru.

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

РОСТЕХ ВНЕДРЯЕТ УНИКАЛЬНОЕ ИОТ-РЕШЕНИЕ ДЛЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СТРОИТЕЛЕЙ

Едва ли кто-то будет спорить, что одной из самых востребованных и перспективных технологий в мире являются «цифровые двойники». Они становятся не просто отражением окружающей реальности, но и получают свойства, которых в ней еще не было. Это открывает перед человечеством интересные перспективы.

По данным консалтинговой компании Deloitte, к 2023 г. глобальный рынок технологий «цифровых двойников» вырастет до 16 млрд долларов. Эта технология используется для разработки, освоения и оптимизации продуктов и процессов, быстро распространяется в разных сферах. Согласно исследованию Gartner, 48% крупных компаний, использующих IoT, параллельно внедряют технологии «цифровых двойников».

В РФ передовые позиции в этой сфере занимают госкорпорации, в частности, Ростех. Бытует ошибочное мнение, что его предприятия создают продукцию лишь для оборонно-промышленного комплекса. Однако в начале лета на конференции «ЦИПР-2023» («Цифровая индустрия промышленной России»), которая проходила в Нижнем Новгороде, холдинг «Росэлектроника» (Ростех) показал новейшую разработку, после внедрения которой о продуктах компаний Siemens, Huawei, Xiaomi и Samsung можно будет забыть. У представленного IoT-решения нет отечественных аналогов, и оно призвано полностью импортозаместить программное обеспечение (ПО) для эксплуатации объектов гражданского и промышленного строительства.

ПО создано НПП «Исток» им. Шокина (входит в «Росэлектронику») на основе российской же платформы промышленного интернета вещей IIoT.Istok. С помощью IoT-решения можно в режиме реального времени собирать данные для управления оборудованием. Особенно это актуально, когда объектов строительства большое количество, они удалены друг от друга и объединены в сеть.

В результате в онлайн-режиме становится возможным проконтролировать загрузку и функционирование производственных линий – от отдельного рабочего места до всего предприятия на всех этапах жизненного цикла сооружения. Благодаря этой работе и объединению IIoT.Istok с BIM-моделью создается цифровой двойник объекта и эффективное управление зданиями. IoT-решение относится к категории SCADA, а платформа IIoT.Istok включена в индустриальный центр компетенций «Строительство» при Минстрое России.



По материалам: iot.ru, trends.rbc.ru, всеостройке.рф

УДК 629.7.054.07

ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТНОГО ОБЛИКА БЛОКА ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

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

Аннотация. Представлены результаты проработки состава и основных характеристик малогабаритного блока ориентации и навигации, которая обеспечивает измерение вектора направления на Луну с привязкой к инерциальному базису. Приводится обоснование проектно-конструкторского облика и достижимых характеристик блока ориентации и навигации, который создается путем модернизации современного образца звездного датчика.

Ключевые слова: СРЕДСТВА НАВИГАЦИИ; ЗВЕЗДНЫЙ ДАТЧИК; ФОТОПРИЕМНОЕ УСТРОЙСТВО; БЛОК ОРИЕНТАЦИИ; МАЛЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ; ЛУНА.

Для цитирования: Шильниковский В.С. Обоснование проектного облика блока ориентации и навигации малого космического аппарата // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 1. С. 96–103.

Изображение: фотобанк ЛОРИ

SUBSTANTIATION OF THE DESIGN IMAGE OF THE ORIENTATION AND NAVIGATION BLOCK OF A SMALL SPACECRAFT

V.S. SHILNIKOVSKY,
SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute
of Chemistry and Mechanics»

Abstract. *The results of the study of the composition and main characteristics of a small-sized orientation and navigation unit, which provides the measurement of the direction vector to the Moon with reference to the inertial basis, are presented. The article provides a justification for the design appearance and achievable characteristics of the orientation and navigation unit, which is created by upgrading a modern sample of a star sensor.*

Keywords: NAVIGATION SYSTEM; STAR SENSOR; PHOTSENSITIVE MATRIX; PHOTODETECTOR; ORIENTATION BLOCK; SMALL SPACECRAFT; MOON.

For citation: *Shilnikovskiy V.S. Substantiation of the design image of the orientation and navigation block of a small spacecraft // Promising technologies for security systems. 2023. N 1. P. 96–103.*

Введение

Повышение защищенности современных комплексов навигации при воздействии средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) является одним из наиболее приоритетных направлений развития вооружения и военной техники (ВВТ). Еще в 2021 г. на заседании научно-технического совета Военно-промышленной комиссии РФ отмечалось, что опыт применения техники РЭБ показывает необходимость использования локальных систем навигации в условиях интенсивных помех [1].

В этой связи исследования по обоснованию возможности создания средств автономной навигации для малого космического аппарата (МКА), которые обеспечивали бы получение навигационных данных без использования информации от радиоэлек-

тронных средств, представляются весьма актуальными и своевременными.

Традиционно возможность автономной навигации и наведения высокоточных образцов ВВТ связывают с использованием систем, независимых от внешних источников информации определения положения объекта и его ориентации в инерциальном пространстве. Это так называемые средства инерциальной навигации (СИН).

Однако подобные системы чаще всего применяются для решения задач определения ориентации и навигации носителя, совершающего перемещение по Земле или в атмосфере Земли. В составе космического аппарата (КА) применение СИН традиционно ограничивается решением задач определения ориентации.

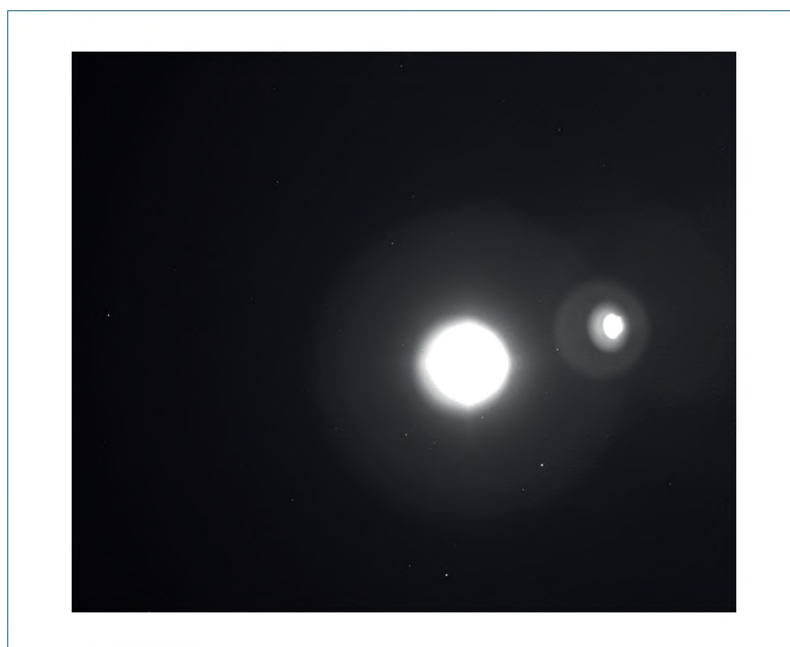


Рис. 1. Изображение участка небесной сферы, полученное с ЗД со временем экспозиции, оптимизированным для получения изображений звезд (не менее 5,5 мин)

Кроме СИН, для построения комбинированных навигационных систем используются и другие средства автономной навигации [2, 3], например, основанные на измерении аномалий силовых полей Земли: гравитационного или магнитного; или астрономические средства навигации.

Целью настоящей статьи является обоснование проектно-конструкторского облика малогабаритного блока ориентации и навигации (БОН) для применения

в составе комбинированной системы навигации малых и микрокосмических аппаратов.

Обоснование и выбор методов

Вычислительные ресурсы современных звездных датчиков (ЗД) достаточны для того, чтобы использовать их в качестве универсального угломерного инструмента для измерения углов направления на изображения отснятых астрономических объектов. Характеристики современных ЗД вполне пригодны для реализации на их базе дополнительных функций определения первичных навигационных параметров для решения задач навигации, в частности, измерения вектора направления на Луну.

Если ЗД сможет обеспечивать получение в одном кадре изображения Луны и звезд, то задача их увязки будет решена. Сложность создания такого прибора с технической точки зрения состоит в том, что

Вычислительные ресурсы современных звездных датчиков достаточны для того, чтобы использовать их в качестве универсального инструмента для измерения углов направления на изображения отснятых астрономических объектов.

яркость звезд и Луны существенно различается. В настоящий момент фотоприемных устройств (ФПУ), которые бы имели такой широкий динамический диапазон, не существует.

На рис. 1 приведен пример изображения участка небесной сферы. На нем параметры ФПУ были оптимизированы для получения изображений звезд. При таких настройках Луна «пересвечена». То есть ни контур, ни изображение рельефа на ее поверхности неразличимы. Разумеется, использовать такое изображение для измерения вектора направления на Луну не представляется возможным.

Одним из ключевых свойств современных ФПУ, выполненных по КМОП-технологии, является то, что каждый из активных пикселей современных ФПУ оборудован собственным элементом считывания. Именно это свойство предоставляет разработчикам оптико-электронных приборов возможность применять различные настройки к различным областям ФПУ и «вытягивать» определенные области изображения.

Были проведены исследования по определению возможности расширения динамического диапазона ФПУ за счет различных настроек времени экспонирования для различных частей изображения: параметры пикселей средней части ФПУ оптимизировались для получения изображения Луны, параметры остальных – для получения изображений звезд. Результат такого способа расширения динамического диапазона оптико-электронного прибора приведен на рис. 2. Как видно, изображения Луны имеют достаточно четкий контур. Также хорошо просматриваются очертания рельефа. Данное техническое решение защищено Российским патентом на полезную модель [4].

Изображения такого качества вполне пригодны для вычисления центра масс

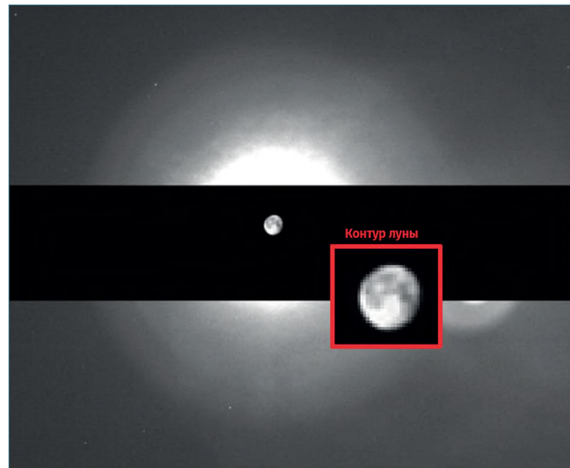


Рис. 2. Изображение участка небесной сферы, полученное с прототипа оптико-электронного прибора с расширенным динамическим диапазоном

Луны с привязкой к звездному узору с применением обзорно-сравнительного метода. Метод заключается в том, что в памяти БОН сохраняются эталонные изображения, сгенерированные с определенным шагом в зависимости от четырех параметров: двух углов либрации Луны, длины радиуса-вектора Луны, угла между радиусом-вектором и углом между вектором направления на Солнце. Для каждого эталонного изображения также сохраняется и положение центра масс.

Эталонные изображения масштабируются методом «свертки», который является общим для обработки изображений. На рис. 3 приведены примеры реального и эталонного изображений. В качестве решения выбирается центр масс Луны, соответствующий эталонному изображению, для которого получено наилучшее совпадение. Результаты математического моделирования показали, что применение метода обеспечивает выделение центра Луны на растровом изображении с погрешностью σ не хуже $0,14''$.

Создание малогабаритного БОН проводится путем доработки ЗД «Азимут-19».

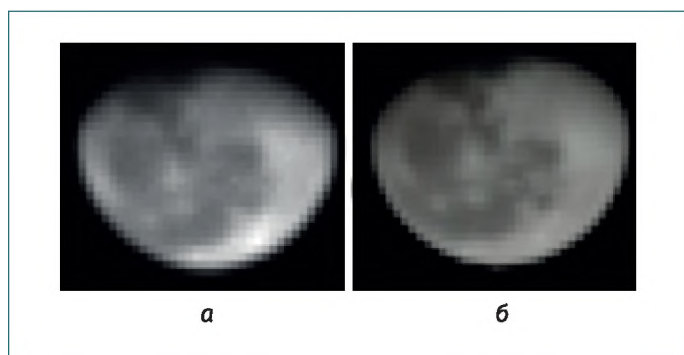


Рис. 3. Пример изображений убывающей Луны для одного момента времени:
 а – реальное, полученное с прототипа БОИ;
 б – эталонное масштабированное

Прибор был представлен в 2017 г. в Москве на II Международном форуме по коммерческой космонавтике INSPACE FORUM 17. Разработчиком прибора является ООО «НПП Астроориентир», г. Зеленоград. В табл. 1 приведены основные характеристики прибора.

Высокая точность определения ориентации достигается за счет уникального сверхчерного покрытия компактной бленды, высококачественной оптики, технических решений и разработанных способов обработки информации [5]. Для реализации предложенного способа требуется доработка прибора в части замены ФПУ. В БОИ вместо ФПУ «Чибис» ЯЛАР.432239.003 используется ФПУ GSENSE2020-BSI. ФПУ «Чибис» имеет фронтальную засветку, тогда как ФПУ GSENSE2020-BSI выполнена в топологии с обратной засветкой. Вследствие этого размеры пикселя и кристалла ФПУ «Чибис» избыточно велики: по сравнению с GSENSE2020-BSI, линейный размер пикселя больше в 2,46 раза, линейный размер кристалла – в 1,23 раза, при этом количество фоточувствительных пикселей меньше вчетверо. Квантовая эффективность ФПУ GSENSE2020-BSI на 30% выше по сравнению с ФПУ «Чибис». Также в ходе

доработки проведена замена ПЛИС (программируемой логической интегральной схемы) и запоминающего устройства.

В текущей реализации ЗД центроиды звезд определяются как центры яркости их проекции в картинной плоскости ФПУ. Погрешность определения центроидов σ при таком способе составляет 1". При такой погрешности определения центроидов звезд предложенный метод позволяет определять вектор направления на Луну с погрешностью (3σ) не более 3". Также в работе исследовалась возможность применения описанного выше обзорно-сравнительного метода для выделения координат центроидов звезд. Исследовалась возможность генерирования эталонных изображений звезд с применением несимметричной функции рассеяния точки. Результаты проведенного математического моделирования показали, что применение обзорно-сравнительного метода позволит повысить точность определения центроидов звезд до 0,12", а получаемая при этом среднеквадратичная погрешность определения ориентации σ будет составлять не хуже 0,8".

В случае, если на программно-аппаратных средствах БОИ будут реализованы оба описанных метода, то верхняя оценка стандартного среднеквадратического отклонения определения вектора направления на Луну σ может быть уменьшена до 1".

Характеристики малогабаритного блока ориентации и навигации

Изучена возможность замены ФПУ ЗД «Азимут-19» на более современный аналог. Обследования показали, что потребуются минимальные изменения в части сопряжения по информационному интерфейсу и небольшая доработка источника вторичного питания. Учитывая, что габаритные размеры GSENSE2020-BSI меньше,

Таблица 1

Основные технические характеристики звездного датчика «Азимут-19»

Наименование параметра	Значение погрешности
Точность определения ориентации МКА σ вокруг оси визирования / вдоль оси визирования, угл. с	3/8
Частота обновления информации об ориентации, Гц	8
Поле зрения, град.	15×15
Фотоприемное устройство	«Чибис» ЯЛАР.432239.003
Технология фотоприемного устройства	КМОП
Разрешение фотоприемного устройства, пиксель	1024×1024
Потребляемая мощность прибора, Вт	4
Габаритные размеры прибора, мм	80×80×120
Масса прибора, кг	0,5

чем у фотоприемного устройства «Чибис», аппаратная часть БОН может быть размещена в корпусе прибора «Азимут-19».

Общий вид прототипа БОН приведен на рис. 4. На рис. 5 показана его структура. В передней части корпуса располагается объектив, который защищен блендой. Бленда обеспечивает углы отстройки для предотвращения засветки бликами от Солнца и Земли.

Блок электроники БОН размещается на трех печатных платах, которые соединены гибко-жесткими печатными платами. В задней части корпуса – плата ФПУ. Управление работой матрицы, в том числе получением изображений, осуществляется на средствах программируемой логической интегральной схемы фирмы Actel нового поколения.

Для дальнейшей обработки изображений и реализации вычислительных алгоритмов средств ориентации и навигации применяется микропроцессор на базе процессорного ядра ARM Cortex-M4F.

Память БОН включает:

радиационно-стойкое однократно программируемое постоянное запоминающее устройство 5576PT1У емкостью

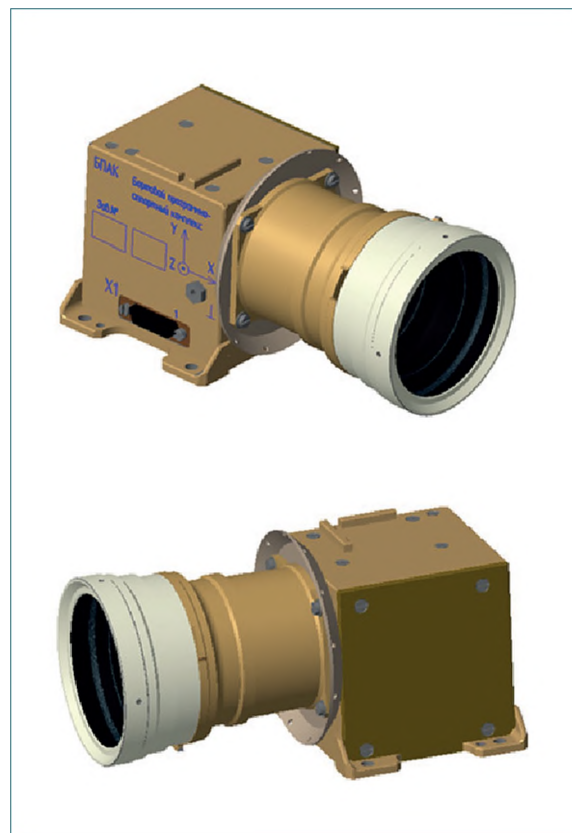


Рис. 4. Общий вид прототипа БОН

1 Мбит и Flash память 1636PP4У общей емкостью не менее 32 Мбит (для хранения алгоритмов);

Таблица 2

Основные технические характеристики БОН

Наименование параметра	Значение погрешности
Среднеквадратическая погрешность σ определения ориентации МКА вокруг оси визирования/вдоль оси визирования, угл. с	0,8/2
Погрешность определения вектора направления на Луну 3σ , угл. с	3
Частота обновления информации об ориентации, Гц	8
Поле зрения, град.	15×15
Фотоприемное устройство	GSENSE2020-BSI
Технология фотоприемного устройства	КМОП
Разрешение фотоприемного устройства, пиксель	2048×2048
Потребляемая мощность прибора, не более, Вт	5
Габаритные размеры прибора, мм	80×80×120
Масса прибора, кг	0,5

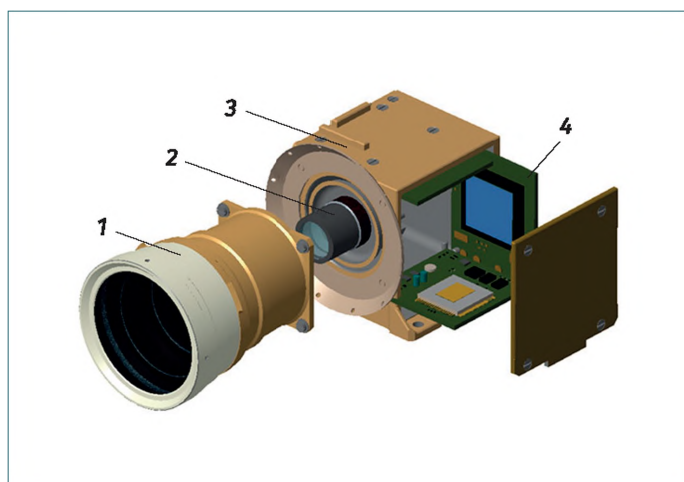


Рис. 5. Структура прототипа БОН:
1 – светозащитная бленда; 2 – объектив;
3 – электронный блок; 4 – плата ФПУ

В табл. 2 приведены основные характеристики БОН для применения в составе малогабаритной автономной астронавигационной системы МКА.

Выводы

В работе приводится описание проектно-конструкторского облика малогабаритного БОН для применения в составе автономной навигационной системы МКА. БОН предлагается создавать посредством модернизации ЗД «Азимут-19». Обоснованы достижимые характеристики БОН. На программно-аппаратных средствах БОН предполагается реализовать новые методики: определения центра масс Луны и центроидов звезд. Применение последней позволит снизить среднеквадратическую погрешность определения ориентации с применением БОН до 0,8".

Описанные программно-алгоритмические решения по созданию БОН пригодны для реализации методики определения орбитальных параметров МКА по серии измерений вектора направления на Луну [6].

синхронное статическое запоминающее устройство 1645PY7Я конвейерного типа емкостью 72 Мбит;

Flash память MT29F128G08AJAAWP-ITZ:A NAND общей емкостью 32 Гб (для хранения изображений);

Flash память 1636PP4U (для хранения программного обеспечения);

Flash память NAND.

Список литературы

1. Протокол заседания рабочей группы № 12 научно-технического совета Военно-промышленной комиссии Российской Федерации от 12 сентября 2021 г. 23 с.
2. Автономная навигация космических аппаратов / Г.П. Аншаков [и др.]. Самара: Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс», 2011. 486 с.
3. Научно-технические проблемы разработки и создания средств автономной навигации и наведения высокоточных, гиперзвуковых и межконтинентальных (трансокеанских) средств поражения и их носителей с использованием физических полей Земли: материалы по итогам заседания науч.-техн. совета Военно-промышленной комиссии Российской Федерации. М.: АО ЦНИИ «Дельфин», 2023.
4. Устройство для создания изображений с высоким динамическим диапазоном: пат. Рос. Федерация № 212 327 U1; опубл. 15.07.2022.
5. Наука и жизнь. Бюро научно-технической информации. 2017. № 4 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/31025/> (дата обращения: 06.01.2022).
6. Шильниковский В.С. Методика автономного определения орбитальных параметров малых космических аппаратов по серии измерений направлений на Луну: тр. Воен.-косм. акад. им. А.Ф. Можайского. Вып. 684. 2022. С. 74–81.

References

1. Minutes of the meeting of the working Group N 12 of the Scientific and Technical Council of the Military-Industrial Commission of the Russian Federation dated September 12, 2021. 23 p.
2. Autonomous navigation of spacecraft / G.P. Anshakov [at al.]. Samara: State Research and Production Rocket and Space Center «TSSKB-Progress», 2011. 486 p.
3. Scientific and technical problems of development and creation of means of autonomous navigation and guidance of high-precision, hypersonic and intercontinental (transoceanic) weapons and their carriers using physical fields of the Earth: Materials on the results of the meeting of the Scientific and Technical Council of the Military-Industrial Commission of the Russian Federation. M.: JSC Central Research Institute «Dolphin», 2023.
4. A device for creating images with a high dynamic range: pat. Rus. Federation N 212 327 U1; date of publication 15.07.2022.
5. Science and life. Bureau of Scientific and Technical Information. 2017. N 4 [Electronic resource]. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/31025> (accessed: 06.01.2022).
6. Shilnikovskiy V.S. Method of autonomous determination of orbital parameters of small spacecraft by a series of measurements of directions to the Moon: Proceedings of the Military Space Academy named after A.F.Mozhaisky. Issue 684. 2022. P. 74–81.

Поступила в редакцию: 20.04.2022

Одобрена рецензентами: 25.06.2022

Принята к печати: 15.02.2023

Об авторах

Валерий Сергеевич Шильниковский* – аспирант, сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики». Адрес для почтовых отправлений: 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А. E-mail: svalera2003@mail.ru.

Valeru S. Shilnikovskiy* – Postgraduate Student, employee of the SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics». Postal address: 16A Nagatinskaya str., Moscow, 115487. E-mail: svalera2003@mail.ru.

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

УДК 53.08

ПРИНЦИП ИСПЫТАНИЙ ОБЪЕКТА, СОДЕРЖАЩЕГО ВЗРЫВООПАСНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, НА ЗАЩИЩЕННОСТЬ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

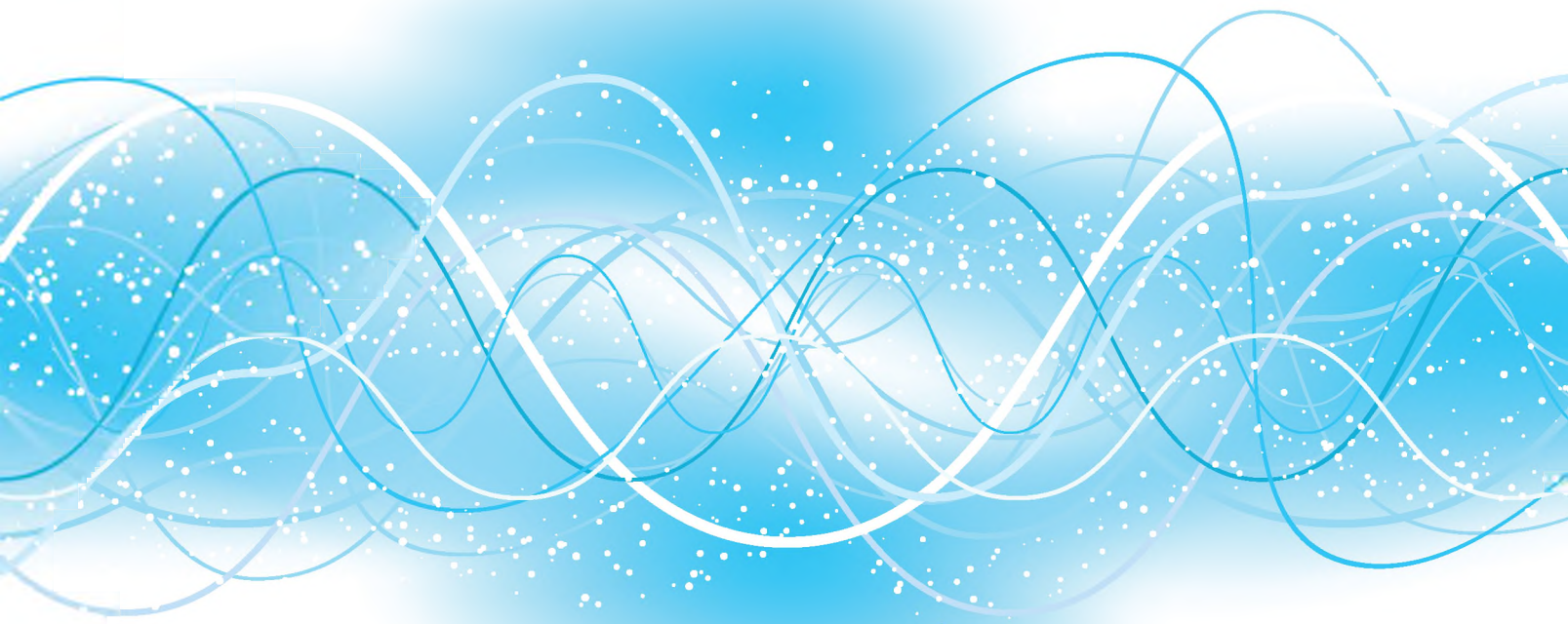
А.В. СКЛОНИН, к.т.н.,

ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики»

Аннотация. Представлен принцип испытания (контроля) объекта, содержащего взрывоопасные (критические) элементы, на защищенность от воздействия электромагнитного поля, отличный от таких известных практик экспериментального подтверждения, как сравнительный анализ и метод повышенных режимов нагружения электромагнитным полем. В основе данного принципа – описания двух запатентованных способов испытаний объекта, в которых осуществляется замена критического элемента на аналогичный, но повышенной чувствительности, и на его имитатор с соответствующим датчиком.

Ключевые слова: МЕТОД ИСПЫТАНИЯ; ВЗРЫВООПАСНЫЙ ОБЪЕКТ; ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ; ТОК; ИСКРОВОЙ РАЗРЯД; КРИТИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ; ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.

Для цитирования: Склонин А.В. Принцип испытаний объекта, содержащего взрывоопасные элементы, на защищенность от воздействия электромагнитного поля // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 1. С. 104–108.



THE PRINCIPLE OF TESTING AN OBJECT CONTAINING EXPLOSIVE ELEMENTS FOR PROTECTION FROM THE EFFECTS OF AN ELECTROMAGNETIC FIELD

A.V.SKOLONIN, PhD in Engineering,

SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics»

Abstract. *The principle of testing (control) of an object containing explosive (critical) elements for protection from the effects of an electromagnetic field is presented, which differs from such well-known experimental confirmation practices as comparative analysis and the method of increased electromagnetic field loading modes. This principle is based on descriptions of two patented methods of testing the object, in which the critical element is replaced with a similar, but high sensitivity, and its simulator with the corresponding sensor.*

Keywords: TEST METHOD; EXPLOSIVE OBJECT; ELECTROMAGNETIC FIELD; CURRENT; SPARK DISCHARGE; CRITICAL ELEMENT; SENSITIVITY TO ELECTRICAL ENERGY.

For citation: Sklonin A.V. The principle of testing an object containing explosive elements for protection from the effects of an electromagnetic field // Promising technologies for security systems. 2023. N 1. P. 104–108.

Введение

При воздействии на взрывоопасный объект электромагнитных полей различного происхождения (разрядов статического электричества и молнии, радиопередающих средств, ядерного взрыва и др.) в его критических элементах (КЭ) могут выделяться энергии, способные вызвать самопроизвольное срабатывание опасной электрической цепи в результате действия энергии наведенного тока через мостик накаливания и воспламенение (взрыв) в результате действия энергии тока электрического разряда (искры) на взрывчатое вещество. Поэтому при испытаниях важное значение имеет применение адекватного метода экспериментального подтверждения взрывозащищенности объекта от воздействия электромагнитных полей. Как правило, такое подтверждение необходимо проводить по результатам испытаний

ограниченного числа образцов (не более пяти) с заданной достоверностью. В настоящее время могут применяться следующие методы испытаний [1]:

сравнительный анализ;
повышенные режимы нагружения электромагнитным полем.

Метод сравнительного анализа предполагает реализацию следующего принципа. Испытания проводятся путем воздействия на образец электромагнитного поля с заданными параметрами, измерения амплитудно-временных значений наведенных токов в опасных электрических цепях и последующего сравнения их значений в нити накаливания электрического средства инициирования с током гарантированного несрабатывания этого средства с учетом нормированного коэффициента.

Недостатком данного метода является сложность и несовершенство

Задача поиска принципиально новых подходов, направленных на обеспечение адекватности испытаний объектов, содержащих критические элементы, на воздействие электромагнитных факторов, нашла свое решение.

применяемых способов и средств измерений наведенных токов, иногда не позволяющих измерить наведенные токи во всем диапазоне амплитудных и временных значений и, соответственно, сравнить их с током гарантированного несрабатывания. Кроме этого, при испытаниях малогабаритных объектов добиться адекватного воспроизведения наведенных токов в ряде случаев невозможно из-за размеров измерительного преобразователя, выступающих за габаритные размеры испытываемого образца.

Метод повышенных режимов нагружения базируется на принципе необходимого увеличения параметров электромагнитного поля сверх установленных (заданных) в техническом задании. Взрывозащищенность подтверждается по положительному результату испытаний образца. Недостатком данного метода является неадекватность воспроизведения наведенных токов в электрических цепях объекта в случае нелинейности переходных процессов. Кроме этого, создание имитатора электромагнитного поля с повышенными параметрами проблематично. Так, например, при нормированном уровне тока молнии 200 кА увеличение амплитуды тока имитатора молнии даже в два раза практически нереально.

Таким образом, задача поиска принципиально новых подходов, направленных на обеспечение адекватности

испытаний объектов, содержащих критические элементы, на воздействие электромагнитных факторов, является актуальной.

Принцип повышенной чувствительности КЭ

Если в объекте, подвергнутом воздействию электромагнитного поля, каждый КЭ, чувствительный к действию тока, заменить на элемент повышенной чувствительности (ЭПЧ) к действию тока, при этом должно выполняться условие того, что при воздействии типового тока КЭ гарантированно не срабатывает, а ЭПЧ гарантированно срабатывает. Если после воздействия электромагнитного поля ни один из ЭПЧ не сработал, то можно сделать вывод, что объект, содержащий критические элементы, защищен от воздействия электромагнитного поля.

Замена КЭ на аналогичный элемент повышенной чувствительности

Для замены КЭ в объекте используется аналогичный элемент с повышенной чувствительностью к действию тока. В качестве КЭ могут рассматриваться электровзрывные устройства (ЭВУ): электровоспламенители, электродетонаторы, взрывчатые или пиротехнические составы, способные к химическому превращению при внешних электрических воздействиях. Также в качестве критического элемента иногда используют резистор определенного номинала мощности, замена которого в объекте испытаний может быть произведена на резистор меньшей мощности.

В основу рассматриваемого принципа положено описание патента на изобретение «Способ испытания объекта, содержащего электровзрывное устройство, на воздействие электромагнитного по-

ля» [2]. Способ испытания объекта включает воздействие электромагнитного поля с заданными параметрами на объект с ЭВУ повышенной чувствительности. По факту несрабатывания и срабатывания этого устройства при воздействии на него безопасного для штатного ЭВУ импульса тока устанавливается положительный результат испытаний. Значение показателя взрывозащищенности ЭВУ от воздействия электромагнитного поля определяется по формуле:

$$P_{\text{защ}} = 1 - P_{\text{ЭВУ-Ш}}(1 - P_{\text{ЭВУ-ПЧ}}),$$

где $P_{\text{ЭВУ-Ш}}$ – значение вероятности срабатывания штатного ЭВУ при протекании безопасного импульса тока; $P_{\text{ЭВУ-ПЧ}}$ – значение вероятности безотказного срабатывания ЭВУ с повышенной чувствительностью при протекании безопасного импульса тока для штатного ЭВУ.

Техническим результатом является повышение точности оценки взрывозащищенности объекта от воздействия электромагнитного поля.

Замена КЭ на его имитатор с датчиком повышенной чувствительности

Для замены КЭ в объекте используется его имитатор с датчиком повышенной чувствительности к действию тока. В качестве критических элементов также могут рассматриваться ЭВУ, а также элементы резистивного типа.

В основу рассматриваемого принципа положено описание патента на изобретение «Способ испытания объекта, содержащего критические элементы, на защищенность от действия тока и имитаторы критических элементов» [3]. Способ испытания объекта заключается

в электромагнитном воздействии с заданными параметрами на объект, в котором установлены взрывобезопасные имитаторы КЭ. Каждый из них находится в пределах габаритных размеров и электрических характеристик соответствующего КЭ и включает датчик повышенной чувствительности к действию тока, характеризующийся коэффициентом запаса чувствительности, определяемым по формуле:

$$K = W_{\text{КЭ}}/W_{\text{д}} \geq 1,$$

где $W_{\text{КЭ}}$ – уровень нечувствительности критического элемента к действию типового импульса тока, при котором гарантировано не происходит его срабатывание; $W_{\text{д}}$ – уровень чувствительности датчика к действию типового импульса тока, при котором гарантировано происходит его срабатывание.

Факт защищенности объекта от действия тока устанавливается, если после электромагнитного воздействия ни один из датчиков не работает. Имитатор пожаровзрывоопасного вещества и имитатор электровоспламенителя мостикового типа содержат датчики в виде резистора с выводами и электродами, размещенными в инертной среде в пределах габаритных размеров и электрических характеристик соответствующего критического элемента.

Техническим результатом являются обеспечение адекватности (точности) и повышение безопасности испытаний.

Выводы

1. Предложенный принцип испытаний взрывоопасного объекта на защищенность от воздействия электромагнитных полей, основанный на замене КЭ на

элементы повышенной чувствительности к действию токов, позволяет проводить оценку взрывозащищенности объекта с приемлемой точностью.

2. Применение принципа открывает новые возможности в области испытаний как малогабаритных, так и крупногабаритных образцов (ракетной техники, пиротехнических изделий и др.), содержащих КЭ (ЭВУ и др.), на воздействие электромагнитных полей и токов источников различного происхождения, с возможностью подтверждения как безопасности

образца (взрывобезопасности, функциональной безопасности), так и других его свойств (устойчивости, электрической прочности, защищенности). При этом процесс отработки и контроля защиты объекта от воздействия электромагнитных полей и токов существенно упрощается, т.к. при испытаниях не требуется использование сложных измерительно-вычислительных комплексов для определения величины наведенного тока, что позволяет существенно снизить сроки и стоимость проведения работ.

Список литературы

1. *Комягин С.И.* Электромагнитная стойкость беспилотных летательных аппаратов. М.: КРАСАНДР, 2015. 432 с.
2. *Склонин А.В.* Способ испытания объекта, содержащего электровзрывное устройство, на воздействие электромагнитного поля: пат. 2785468 Рос. Федерация. № 2022107015; заявл. 17.03.2022; опубл. 08.12.2022, Бюл. № 34. 6 с.
3. Способ испытания объекта, содержащего критические элементы, на защищенность от действия тока и имитаторы критических элементов: пат. 2791675 Рос. Федерация. № 2022107014 / А.В. Склонин [и др.]; заявл. 17.03.2022; опубл. 13.03.2023, Бюл. № 8. 15 с.

References

1. *Komyagin S.I.* Electromagnetic resistance of unmanned aerial vehicles. M.: KRASANDER, 2015. 432 p.
2. *Sklonin A.V.* Method of testing an object containing an electric explosive device for the effect of an electromagnetic field: pat. 2785468 Ros. Federation. N 2022107015; application 17.03.2022; publ. 08.12.2022, Bul. N 34. 6 p.
3. Method of testing an object containing critical elements for protection from the action of current and simulators of critical elements: pat. 2791675 Ros. Federation. N 2022107014 / A.V. Sklonin [et al.]; application 17.03.2022; publ. 13.03.2023, Bul. N 8. 15 p.

Поступила в редакцию: 20.04.2022

Одобрена рецензентами: 25.06.2022

Принята к печати: 15.02.2023

Об авторах

Андрей Викторович Склонин* – кандидат технических наук, сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики». Адрес для почтовых отправок: 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А. E-mail: 826@cniim.ru (в теме письма указать «Для Склонина А.В.»).

Andrey V. Sklonin* – PhD in Engineering sciences, employee of the SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics». Postal address: 16A Nagatinskaya str., Moscow, 115487. E-mail: 826@cniim.ru (in the subject of the letter, specify «For Sklonin A.V.»).

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

ОПЫТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ФГУП «ЦНИИХМ»

ВЫПОЛНЯЕТ

- изготовление макетов, экспериментальных и опытных образцов изделий;
- отработку технологии изготовления;
- поиск и отработку решений по оптимизации технологии изготовления с целью сокращения затрат и сроков производства

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОСНАЩЕНИЕ ОПЫТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

МЕТАЛЛООБРАБОТКА

- многофункциональные токарно-фрезерные обрабатывающие центры с ЧПУ повышенной точности;
- электроэрозионное оборудование;
- координатная шлифовка;
- зубофрезерование;
- лазерная сварка и резка металлов

ЛИТЬЕВОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Технология высокоточного литья по выплавляемым моделям, современное, высокопроизводительное оборудование с автоматизацией процесса отливок из жаропрочных сталей и алюминия.

ГАЛЬВАНИЧЕСКОЕ ПРОИЗВОДСТВО

4 линии с компьютерным управлением на 6 технологических процессов:

- анодирование;
- цинкование;
- меднение;
- хромирование;
- никелирование;
- микродуговое оксидирование

ТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

Высокоточные средства измерений, включая контрольно-измерительную машину, мультисенсорную оптическую систему, системы неразрушающего контроля (рентген, УЗК), рентгеновские и эмиссионные анализаторы металлов

Сертифицированная интегрированная система менеджмента качества и экологического менеджмента на предприятии обеспечивает Опытному производству соответствие требованиям потребителя

ПО ВОПРОСАМ СОТРУДНИЧЕСТВА ОБРАЩАТЬСЯ

по телефону: 8 (499) 611-87-54

115487 г. Москва, ул. Нагатинская, 16А. E-mail: mail@cniihm.ru

ТЕХНОЛОГИИ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 550.344; 550.348; 622.23

**УДАРНО-ВОЛНОВАЯ РЕЗКА –
ИННОВАЦИОННЫЙ
ИНСТРУМЕНТ
ЭФФЕКТИВНЫХ
И БЕЗОПАСНЫХ
ВЗРЫВНЫХ РАБОТ**

С.И. ДОРОШЕНКО, к.т.н., А.С. ИВАНОВ, В.А. МАЛЫХ,
АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»

Аннотация. Оценивается эффективность применения технологии ударно-волновой резки материалов. Показано ее выгодное отличие от кумулятивной в плане снижения расхода взрывчатого вещества с одновременным сокращением безопасных расстояний при ведении работ. Найдено решение задач подводных взрывов.

Ключевые слова: УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ЗАРЯД; МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ; ВОЛНА МАХА; ЭКСПЕРИМЕНТ; ГОРНАЯ ПОРОДА; БЕТОННЫЙ БЛОК; ПОДВОДНЫЙ ВЗРЫВ.

Для цитирования: 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. С. 110–121.

SHOCK WAVE CUTTING – AN INNOVATIVE TOOL FOR EFFICIENT AND SAFE BLASTING OPERATIONS

S.I. DOROSHENKO, PhD in Engineering, A.A. IVANOV, V.A. MALYKH,
JSC «Scientific and Production Enterprise «Radar mms»

Abstract. The paper assesses the effectiveness of shock-wave technology cutting for rocks and materials. A comparison of materials cutting technologies using a shock-wave and a shaped charge is done. Shows a significant reduction in the consumption of explosives and an increase in efficiency in shock-wave cutting with a simultaneous reduction in safe distances. Solving the problems of underwater explosions in the interests of rescue operations in emergency situations.

Keywords: SHOCK-WAVE CHARGE; BILINEAR CHARGE; MATHEMATICAL MODEL; MACH WAVE; EXPERIMENT; ROCK; CONCRETE BLOCK; UNDERWATER EXPLOSION.

For citation: Doroshenko S.I., Ivanov A.S., Malykh V.A. Shock wave cutting – an innovative tool for efficient and safe blasting operations // Promising technologies for security systems. 2023. N 1. P. 110–121.

Введение

Сегодня в РФ остро стоит вопрос о необходимости совершенствования процессов управления безопасностью и повышения эффективности взрывных работ, тем более в существующих условиях увеличения количества чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера. Аварийно-спасательные работы

диктуют необходимость использования инновационных технологий, которые могут способствовать сокращению сроков и увеличению объемов работ, а также снижению общей стоимости их проведения.

Для выполнения взрывных работ в промышленном комплексе страны имеется довольно широкая линейка взрыв-

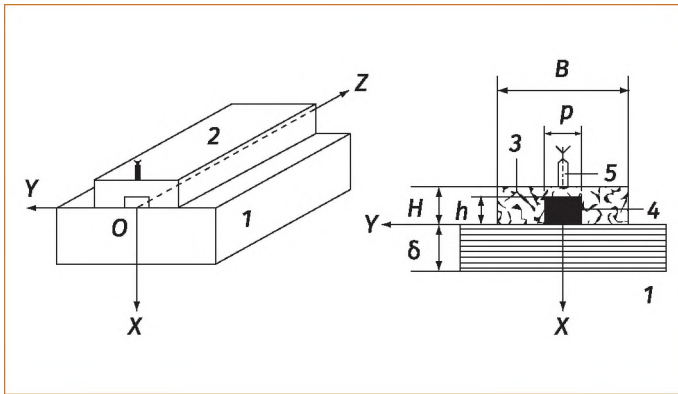


Рис. 1. Конструкция ударно-волнового заряда:
1 – преграда (металл); 2 – ударно-волновой заряд (УВЗ);
3 – взрывчатое вещество; 4 – сердечник-линза;
5 – детонатор

чатых веществ (ВВ) и зарядов, проработаны методы их применения с учетом требований взрывобезопасности. Но отечественная наука не стоит на месте, за последнее время появились новые ВВ, средства инициирования и технологии, воплощенные в новые заряды. Одной из них – ударно-волновой резке взрывом – и посвящена эта статья. Инструментом данной технологии является заряд ударно-волновой резки (ЗУВР), который в разы превосходит качества аналогов, имеющих в промышленности.

Теоретические основы технологии ударно-волновой резки

В настоящее время основным средством резки материалов и пород взрывом являются кумулятивные заряды (КЗ). Чем толще материал, тем больше масса КЗ, что требует применения специальных дорогостоящих мер защиты окружающей среды и объектов от действия взрыва. Более эффективно использование технологии ударно-волновой резки.

Конструкция ударно-волнового заряда. В отличие от кумулятивной, ударно-волновая резка основана на использовании

экстремальных (маховских) режимов интерференции ударных волн, образованных при синхронной детонации параллельных зарядов на поверхности преграды [1–3].

В результате теоретических и экспериментальных исследований в Балтийском государственном техническом университете «ВОЕНМЕХ» (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им Д.Ф. Устинова) с участием специалистов АО «НПП «Радар ммс» разработана конструкция ударно-волнового заряда [3–6], которая представлена на рис. 1.

Математическая модель ударно-волнового заряда. Для совершенствования технологии ударно-волновой резки проведены теоретические исследования разрушения преград импловзивными (симметрично сходящимися) ударными волнами. Разработаны физические и математические модели, описываемые системами уравнений (1) и (2).

Основные уравнения движения сплошной среды:

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{dE}{dx} + \frac{dF}{dy} = 0; \tag{1}$$

$$Q = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{pmatrix}; E(Q) = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (e + p)u \end{pmatrix};$$

$$F(Q) = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (e + p)v \end{pmatrix}.$$

$$e = \rho \epsilon + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2).$$

Уравнение внутренней энергии и уравнение состояния:

$$\begin{aligned} \varepsilon(\rho, T) &= \varepsilon_x(\rho) + \varepsilon_T(\rho, T); \\ p(\rho, T) &= p_x(\rho) + \rho\gamma(\rho)c_v T, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\gamma(\rho) = \gamma_0 - \gamma_1 \frac{\rho}{\rho_0}.$$

Разрушение происходит в результате разгрузки материала за фронтом волны Маха и позволяет эффективно резать преграды толщиной до 1500 мм и более.

Практический опыт применения зарядов ударно-волновой резки

В БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова разработан технический проект и совместно с ФГУП СКТБ «Технолог» на защитных сооружениях Санкт-Петербурга с помощью ЗУВР выполнено обрушение транспортного моста весом ~2000 т. Результаты до и после показаны на рис. 2.

Демонстрационные испытания ЗУВР для Вооруженных Сил РФ выполнялись на 18 Испытательном полигоне инженерных войск (пос. Елизаветинка). В ходе работ были проведены сравнительные подрывы ЗУВР и инженерных КЗ (рис. 3, 4). Преграды соответствовали прицельным характеристикам по пробивной способности КЗ. В результате работ получены сравнительные показатели (табл. 1, 2).

На острове Новая Земля инженерной службой подразделения ВКС и ПВО по методике БГТУ выполнено взрывное обрушение аварийной стрелы подъемного крана высотой 80 м (рис. 5), при этом официально установлен рекорд России № 00828. Применение ЗУВР позволило

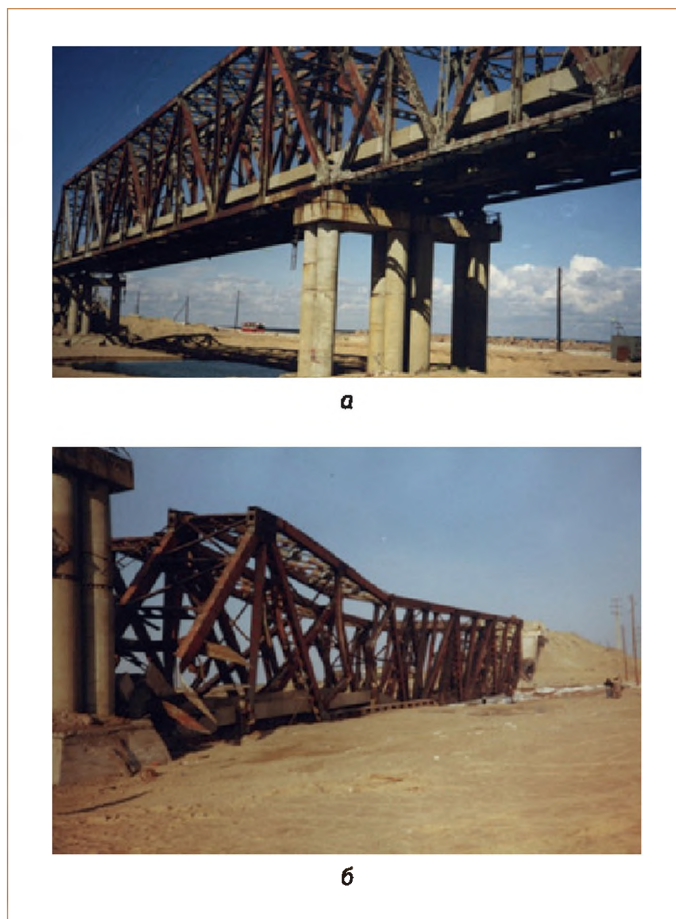


Рис. 2. Обрушение транспортного моста с применением ЗУВР: а – мост до разрушения; б – после разрушения







Рис. 3. Примеры выполнения работ по резке стального листа 13 мм фигурным ЗУВР



Рис. 4. Перебитие бетонного блока толщиной 520 мм с помощью ЗУВР

Таблица 1

Сравнительные показатели для кумулятивных зарядов и ЗУВР

Заряд	Удельный расход, г/см ²	Уменьшение массы ЗУВР	Внешний вид
КЗУ-2	118,2	В 40,8 раза	
УМКЗ	68,4	В 23,6 раза	
СЗ-1Э	7,7	В 3,7 раза	
ЗУВР	2,9	-	

снять риски чрезвычайной ситуации в порту «Новая Земля» от воздействия ударных волн и осколочного воздействия на работу коммуникаций, боеготовность пирсов и гавани в целом.

Примеры выполнения экспериментальных работ с применением импловзивных ударных волн взрыва приведены на

рис. 6, 7, 8. Технология позволяет нивелировать риски в стесненных условиях и на пожароопасных объектах. Уменьшение массы заряда на метр реза конструкций и отсутствие запреградного действия повышает безопасность взрывных работ.

В ходе испытаний зарядов ЗУВР под водой было вырезано отверстие в сталь-

Таблица 2

Сравнительные показатели для кумулятивных зарядов и ЗУВР

Заряд	Удельный расход, г/см ²	Уменьшение массы ЗУВР	Внешний вид
ЛКЗ-80	1,2	В 12 раз	
КЗУ	4,6	В 46 раз	
ЗУВР	0,1	–	

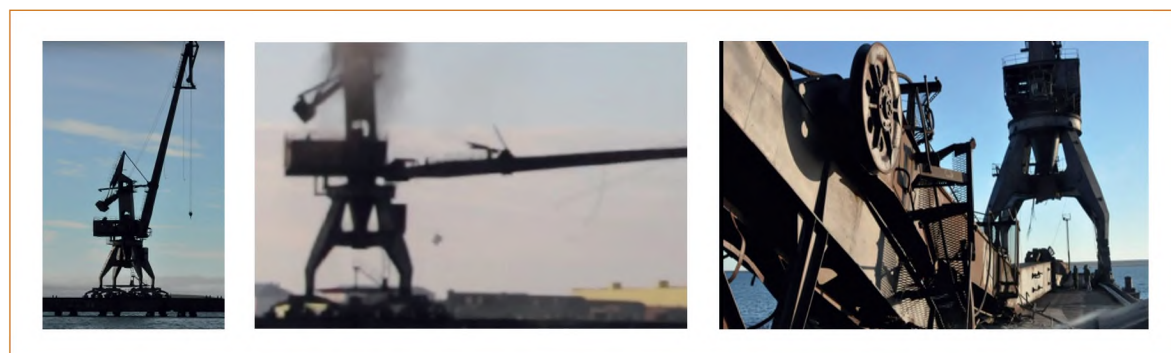


Рис. 5. Обрушение стрелы крана с применением ЗУВР



Рис. 6. Разрушение конструкции самолета с применением ЗУВР

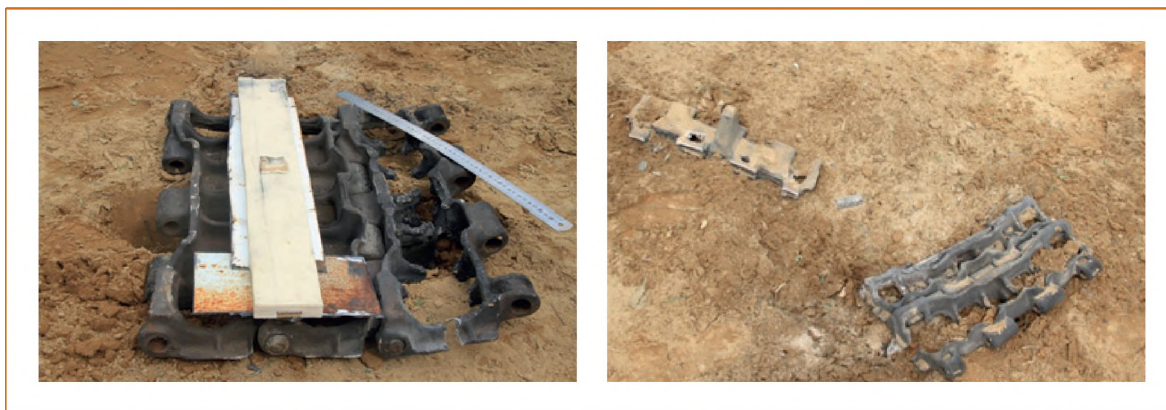


Рис. 7. Разрушение трака бронированной машины с применением ЗУВР

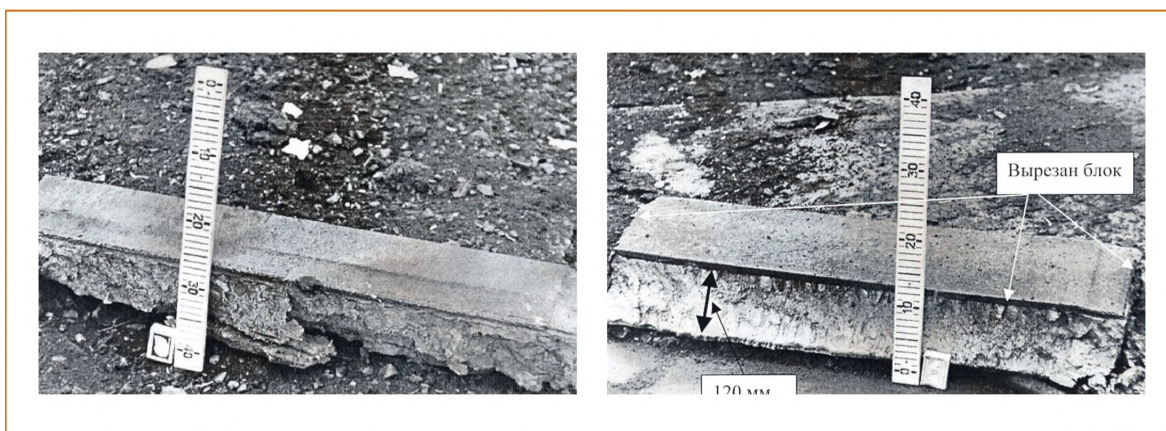


Рис. 8. Разделка металлоконструкции с применением ЗУВР

Уменьшение массы взрывчатого вещества на метр реза конструкций и отсутствие запреградного действия повышает безопасность взрывных работ при использовании заряда ЗУВР.

ной трубе. Длина реза составила 2400 мм. Расход взрывчатого вещества составил 600 г. На рис. 9 представлен образец, полученный после применения ЗУВР под водой, толщина стенки трубы – 10 мм.

Для сравнения в табл. 3 приведены показатели расхода взрывчатого вещества относительно общих габаритов стандартных сосредоточенных и удлиненных зарядов (рис. 10), применяемых под водой.

Сравнение ЗУВР с аналогами промышленных образцов

В промышленности имеется линейка шнуровых кумулятивных зарядов (ШКЗ) [7] от производителей ФГУП «ГосНИИ «Кристал» и ФГУП «СКТБ «Технолог» (табл. 4). Заряды представляют собой эластичные шнуры с продольной параболической кумулятивной выемкой, отделанной металлопластиком. Пос-



Рис. 9. Разрушение (резка) стальной трубы под водой

Таблица 3

Основные характеристики зарядов

Тип заряда	Общая масса, кг	Масса ВВ, кг	Габаритные размеры, мм
СЗ-1	1,4	1	65×166×126
СЗ-3	3,7	3	65×171×337
СЗ-3а*	3,7	2,8	98×142×200
СЗ-6*	7,3	5,9	98×142×395
СЗ-6м*	6,9	6	Диаметр 82, длина 1200
СЗ-4П	4,2	4	Диаметр 45, длина 2000
СЗ-1П	1,5	1	Диаметр 45, длина 600

*Заряды СЗ-3а, СЗ-6 и СЗ-6м могут применяться для взрывных работ под водой на глубинах до 10 м.



Рис. 10. Стандартные сосредоточенные и удлиненные заряды

Таблица 4

Основные характеристики промышленных зарядов для резки конструкций

Тип заряда	Масса ВВ, г/м	Размеры			Эффективность действия, мм		
		длина, м	высота, мм	ширина, мм	сталь	алюминий	дерево
Алмаз-4	15	5,5	4	5	2	4	20
Алмаз-8	45	3	8	9	5	–	50
ШКЗ-1	65±15	1...30	∅9±1,5	–	4	8	–
ШКЗ-2	130±20	1...30	∅13±1,5	–	7	14	–
ШКЗ-3	240±25	1...30	∅17±1,5	–	11	22	–
ШКЗ-4	340±30	1...30	∅21±2,0	–	15	30	–
ШКЗ-5	520±35	1...30	∅26±2,0	–	19	28	–
ШКЗ-6	730±40	1...30	∅32±2,5	–	25	50	–

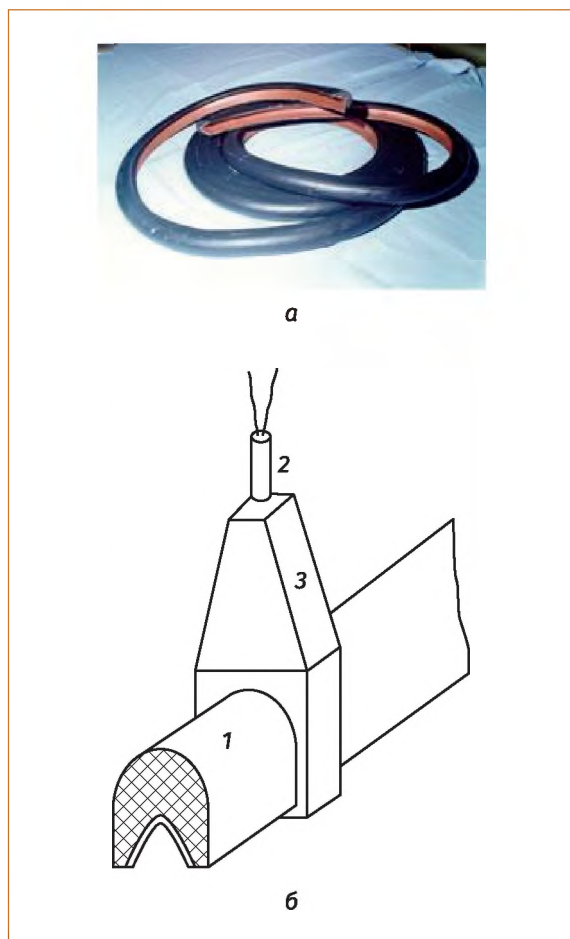


Рис. 11. Шнуровой кумулятивный заряд (а) и дополнительное приспособление (б) для его инициирования: 1 – заряд ШКЗ; 2 – промежуточный заряд ВВ в корпусе; 3 – электродетонатор

ледний применяется для облицовки вещества на полимерной основе, содержащее значительное (до 85%) количество порошкообразного железа, а также и ВВ, обладающее свойством эластичности. На рис. 11 показан вариант дополнительного приспособления для инициирования заряда.

Основные технические недостатки способа резки шнуровыми зарядами:

способ не позволяет осуществить резку крупногабаритных толстостенных конструкций с толщиной 30...100 мм и более;

способ и заряд не позволяют осуществить резку с высоким качеством поверхности реза, для последующего монтажа и сварки;

способ и заряд не позволяют осуществить резку под водой;

установка зарядов на конструкцию требует дополнительных приспособлений для выдерживания фокусных расстояний, обеспечивающих устойчивое формирование струйных течений в теле преграды, и, чем больше калибр применяемого заряда, тем сложнее решается задача;

требуется дополнительное устройство для гарантированного инициирования.

Заряды производятся из эластичного ВВ на основе гексогена, но конструктивные характеристики и состав ВВ более сбалансированы в образцах «Алмаз» производителя ФГУП «СКТБ «Технолог». В качестве ВВ здесь применен «Эластит 15». В сравнении с ШКЗ-1 при равных габаритах работоспособность «Алмаз-8» выше на 20...25% при одновременном снижении массы ВВ 25...30%. В зарядах ЗУВР также применено ВВ «Эластит 15» ТУ 7276-418-05121441-201.

Основные проблемы шнуровых зарядов решены в способе с применением импловзивных ударных волн взрыва, где в качестве инструмента используется ЗУВР. Их производство освоено ФГУП «СКТБ «Технолог», г. Санкт-Петербург [8, 9]. Заряды выпускаются в двух типоразмерах согласно ТУ 20.51.12-001-02066374-2020. Они рассчитаны на разрушение 10 и 30-мм конструкционной стали, проходят этап контрольных и приемочных испытаний для разрешения на постоянное применение, в соответствии со ст. 3 Технического регламента Таможенного союза 028/2012 и ст. 6 Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности № 494 от 03.12.2020 г. [10].

Удлиненный заряд взрывчатого вещества ЗУВР (рис. 12) выполнен в форме монолитного желоба, полость которого симметрична оси и заполнена инертной вставкой, на ВВ имеются скругления краевых частей и проделана канавка с возможностью размещения детонирующего шнура (ДШ), который фиксируется закраинами, при этом кратчайшее расстояние между противоположными краями закраин меньше диаметра ДШ. При этом инертная вставка выполнена с магнитным материалом (виниловый магнит), что позволяет ЗУВР крепить к ферромагнитной преграде без лишних приспособлений. Наличие канавки обес-

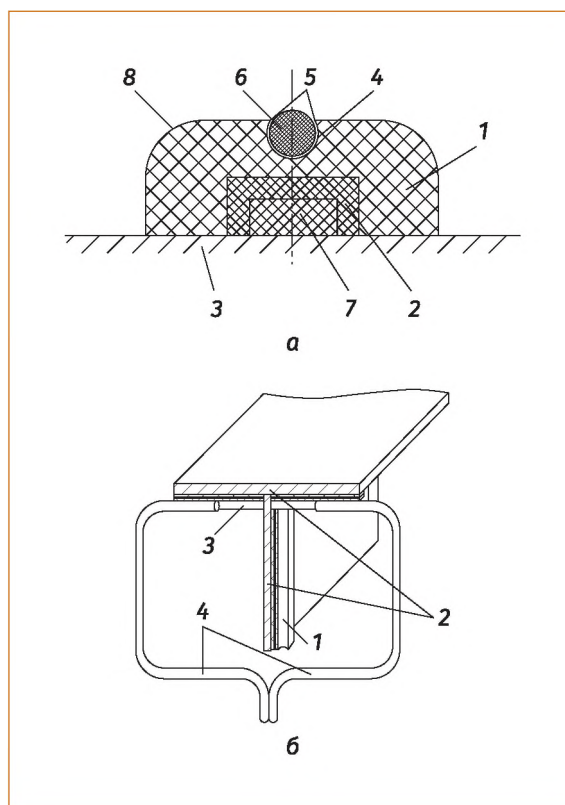


Рис. 12. Заряд ударно-волновой резки (а): 1 – ВВ «Эластит-15»; 2 – инертная вставка; 3 – преграда; 4 – канавка; 5 – закраины для фиксации детонатора и ДШ; 6 – ДШ; 7 – виниловый магнит; 8 – скругления в краевых частях. Вариант крепления ЗУВР на конструкции (б): 1 – плоскость крепления; 2 – металлоконструкция; 3 – ЗУВР; 4 – ДШ

печивает удобную установку детонатора и надежное инициирование заряда, а в фигурных зарядах повышает надежность передачи детонации с применением ДШ. Он специально изготовлен из высокоскоростного ВВ и поставляется в комплекте. В сумме используемые технические решения обеспечивают высокую технологичность ведения взрывных работ, надежность и качество.

Из представленных испытаний наглядно видны преимущества резки (разрушений) преград, материалов с применением ЗУВР – по экономному расходу ВВ, снижению воздействию ударных волн,

практически отсутствию запреградного действия взрыва, значительно улучшенной технологии применения по сравнению с шнуровыми зарядами. Благодаря этому значительно расширяется область применения ЗУВР, что положительно скажется на спасательных работах при чрезвычайных ситуациях.

Но самое большое достоинство способа – возможность выполнения взрывных работ под водой, на глубинах до 6000 м. Подобных аналогов в мире пока не существует.

Выводы

В качестве выводов можно отметить, что резка с помощью ЗУВР по сравнению с резкой другими видами зарядов обладает рядом преимуществ, которые могут быть использованы в интересах решения задач при ЧС:

расход взрывчатого вещества (ВВ) в 2...6 раз ниже при разрушении стальных конструкций большой толщины (до 200 мм и более);

не изменяет структуру и состав металла в области разрушения;

исключает образование высокоскоростных осколков и обладает минимальным запреградным воздействием ударных волн при оптимальной (минимально-возможной) величине заряда;

допускает работу с преградами, имеющими сложный рельеф поверхности (шар, конус, цилиндр и их производные), с минимальным радиусом кривизны благодаря небольшому сечению и выбору эластичного материала заряда ВВ;

использование под водой, в том числе на глубинах до 6000 м;

возможна работа как с готовыми (заводскими) ЗУВР, так и изготовление зарядов необходимых размеров и форм из штатных пластичных ВВ на месте производства работ, без применения специального оборудования;

ударно-волновая резка пород с использованием билинейных зарядов, реализующих резку волнами Маха, позволит существенно снизить расход взрывчатых материалов и время проведения работ;

технологичность и простота применения не требуют дополнительного оборудования, что обеспечивает высокий темп выполнения задач.

Список литературы

1. Физика взрыва: в 2-х т. / под. ред. Л.П. Орленко. 3-е изд., переработ. 2004.
2. Михайлов Н.П. Основы математического моделирования процессов взрыва и удара: учебник. СПб.: Балт. техн. гос. ун-т, 2012. 202 с.
3. К вопросу эффективной ликвидации ЧС природного характера на основе инновационных технологий ударно-волновой резки / С.И. Дорошенко [и др.] // Мат-лы III Всерос. науч.-практ. конф. с Межд. уч. «Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций». Воронеж, 2014. С. 241–244.
4. Михайлов Н.П., Дорошенко С.И., Бригадин И.В. Совершенствование технологии резки, сварки и упрочнения металлов // Взрывное дело. 2013. № 109/67. С. 101–117.
5. Ударно-волновая резка массивных стальных конструкций / Н.П. Михайлов [и др.] // Вопросы оборонной техники. 2012. № 5–6. С. 55–60.
6. Развитие технологии разрушения пород импловивными ударными волнами / Н.П. Михайлов [и др.] // Горный информационно-аналогический бюллетень (научно-технический журнал). С. 313–320.
7. Управление взрывом. Средства взрывания. Взрывобезопасность: учеб. пособие / С.И. Дорошенко [и др.]. СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2022. 100 с.
8. Заряд для разрезания твердых материалов: пат. 2701600 Рос. Федерация; заявл. 03.07.2017; опубл. 30.09.2019.

9. Удлиненный заряд взрывчатого вещества: пат. 204402 Рос. Федерация / С.И. Дорошенко [и др.]; заявл. 19.05.2020; опубл. 24.05.2021.

10. Взрыв и взрывные явления, взрывчатые вещества и взрывные устройства. Взрывобезопасность: учеб. пособие / С.И. Дорошенко [и др.]. СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2022. 112 с.

References

1. Физика взрыва: в 2-х т / под. ред. Л.П. Орленко. 3-е изд., переработ. 2004.
2. *Mikhailov N.P.* Osnovy matematicheskogo modelirovaniia protsessov vzryva i udara: uchebnik. Sankt-Peterburg: Balt. tekhn. gos. un-t, 2012. 202 p.
3. K voprosu effektivnoi likvidatsii CHS prirodnogo kharaktera na osnove innovatsionnykh tekhnologii udarno-volnovoi rezki / S.I. Doroshenko [et al.] // Materialy III Vseros. nauch.-prakt. konf. s Mezhd. uch. «Problemy obespecheniia bezopasnosti pri likvidatsii posledstviu chrezvychainykh situatsii». Voronezh, 2014. P. 241–244.
4. *Mikhailov N.P., Doroshenko S.I., Brigadin I.V.* Sovershenstvovanie tekhnologii rezki, svarki i uprochneniia metallov // Vzryvnoe delo. 2013. N 109/67. P. 101–117.
5. Udarno-volnovaiia rezka massivnikh stalnikh konstrukciy / N.P. Mikhailov [et al.] // Voprosi oboronnoy tehniki. 2012. N 5–6. P. 55–60.
6. *Mikhailov N.P., Znamenskiy E.A.* I dr. Razvitie tekhnologii razrusheniia porod implozivnimi udarnimi volnami / N.P. Mikhailov [et al.] // Gorniy informacionno-analogicheskii biulleten (nauchno-ehnicheskii zhurnal). P. 313–320.
7. Upravleniie vzrivom. Sredstva vzrivaniia. Vzrivobezopasnost: ucheb. posobie / S.I. Doroshenko [et al.]. SPb.: Sankt-Peterburg universitet GPC MCHS Rossii, 2022. 100 p.
8. Zariad dlia razrezaniia tverdiy materialov: pat. 2701600 Ros. Federatsiya; zaiavk. 03.07.2017; opubl. 30.09.2019.
9. Udlinenniy zariad vzrivchatogo veschestva: pat. 204402 Ros. Federatsiya / S.I. Doroshenko [et al.]; zaiyvk. 19.05.2020; opubl. 24.05.2021.
10. Vzriv i vzrivnie iavleniia, vzrivchatie veschestva, vzrivnie ustroystva. Vzrivobezopasnost. Uchebnoe posobie / S.I. Doroshenko [et al.]. SPb.: Sankt-Peterburg universitet GPC MCHS Rossii, 2022. 112 p.

Поступила в редакцию: 20.04.2022

Одобрена рецензентами: 25.06.2022

Принята к печати: 15.02.2023

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, Россия. E-mail: ivanov_as@radar-mms.com.

Andrey S. Ivanov – deputy director of JSC «Scientific and Production Enterprise «Radar mms». E-mail: ivanov_as@radar-mms.com.

Вадим Александрович Малых – инженер-конструктор 1 категории АО «НПП «Радар ммс», Санкт-Петербург, Россия. E-mail: malyh_@radar-mms.com.

Vadim A. Malykh – design engineer of the 1st category of JSC «Scientific and Production Enterprise «Radar mms». E-mail: malyh_@radar-mms.com.

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

УДК 519.72

ИМИТАТОРЫ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ В СИСТЕМЕ ТРАНСПОРТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Н.Ю. ИЛЬКУХИН, к.т.н.,

ООО «Элементный анализ и технологии»

С.М. ЯКОВЛЕВ, Д.В. БАРМАШОВА, А.С. КОЗЛОВ, к.т.н.,

ФГУП «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог»

Аннотация. Рассмотрено применение имитаторов взрывчатых веществ для контроля качества проведения досмотровых мероприятий с применением рентгеновских установок. Разработанные образцы соответствуют реальным материалам по основным показателям, на основе которых происходит их выявление в багажном объеме инспектируемого объекта: эффективному атомному номеру и плотности. Представленные имитаторы позволяют осуществлять проверку эффективности работы специального оборудования, способствуют повышению квалификации сотрудников контролирующих органов по выявлению скрытых закладок взрывчатых веществ. Внедрение в практику разработанных образцов позволит значительно повысить уровень транспортной безопасности.

Ключевые слова: РЕНТГЕНОВСКИЕ УСТАНОВКИ; ТЕСТ-ОБЪЕКТЫ; ИМИТАТОРЫ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ; ТРАНСПОРТНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ; ДОСМОТР; АТОМНЫЙ НОМЕР ИМИТАТОРА.

Для цитирования: Илькухин Н.Ю., Яковлев С.М., Бармашова Д.В., Козлов А.С. Имитаторы взрывчатых веществ в системе транспортной безопасности // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 1. С. 122–127.



Изображение: yaustal.com

IMITS OF EXPLOSIVES IN THE TRANSPORT SECURITY SYSTEM

N.Yu. ILKUKHIN, PhD in Engineering,

LLC «Elementary Analysis and Technology»

C.M. YAKOVLEV, D.V. BARMASHOVA, A.S. KOZLOV, PhD in Engineering,

Federal State Unitary Enterprise «Special Construction and Technological Bureau «Technologist»

Abstract. *The use of explosives for monitoring the quality of inspection measures using x-ray attitudes was considered. The developed samples correspond to real materials according to the main indicators, on the basis of which they are detected in the luggage volume of the object of the inspected object: an effective atomic number and density. The presented imitators allow you to verify the effectiveness of the work of special equipment, help to improve the qualifications of employees of the regulatory authorities to identify hidden bookmarks of explosives.*

The introduction of the developed samples will significantly increase the level of transport safety.

Keywords: X-RAY INSTALLATIONS; TEST OBJECTS; SIMULATORS OF EXPLOSIVES; TRANSPORT SECURITY; INSPECTION; THE ATOMIC NUMBER OF THE SIMULATOR.

For citation: *Ilkukhin N.Yu., Yakovlev S.M., Barmashova D.V., Kozlov A.S. Imits of explosives in the transport security system // Promising technologies for security systems. 2023. N 1. P. 122–127.*

Введение

В целях реализации Федерального закона № 16 от 07.02.2007 «О транспортной безопасности» и использования субъектами транспортной инфраструктуры эффективных в противодействии террористическим угрозам технических средств досмотра 26 сентября 2016 г. было утверждено Постановление Правительства РФ № 969 о требованиях к функциональным свойствам технических средств обеспечения транспортной безопасности (ТС ОТБ) и правилам обязательной сертификации ТС ОТБ (далее – ПП № 969). ПП № 969 регламентирует процедуру получения сертификата транспортной безопасности на ТС ОТБ, без наличия которого использование оборудования в целях обеспечения безопасности на объектах транспортной инфраструктуры невозможно.

Символично, что принятие ПП № 969 произошло через четыре дня после принятия на Совете Безопасности ООН резолюции № 2309 о необходимости повышения эффективности мер безопасности на транспорте. Последнее было связано с результатами проверки систем безопасности аэропортов США в 2015 г., которые показали, что вероятность обнаружения взрывчатых веществ при их провозе в ручной клади, багаже и личных предметах пассажиров, в том числе в электронных устройствах, составляет всего 5% [1]. Главным образом это произошло из-за ошибок, связанных со значительным влиянием человеческого фактора при принятии окончательных решений, отсутствия эффективных средств дополнительного досмотра в автоматическом режиме, а также технологий их использования.

Актуальность отечественных имитаторов ВВ обусловлена тем, что в настоящее время все поставляемые тест-объекты являются зарубежными, ориентированными под иностранные виды взрывчатых веществ, не используемых в РФ.

Однако помимо создания новых образцов аппаратуры обнаружения взрывчатых веществ (ВВ), одной из важных задач в области обеспечения транспортной безопасности является проверка работоспособности эксплуатируемой досмотровой техники и повышение квалификации сотрудников подразделений транспортной безопасности по выявлению ВВ. В практике обеспечения транспортной безопасности наибольшее распространение получили рентгеновские интроскопы, которые позволяют оператору получать с использованием специального программного обеспечения графическую подсказку на область в багаже, которая подозрительна на наличие ВВ, или на емкости с жидкостью, оставляя окончательное решение за оператором. Это приводит к зависимости качества досмотра от опыта и квалификации оператора.

Одновременно с этим необходимо отметить, что в процессе эксплуатации обнаружительные параметры рентгеновских установок ухудшаются из-за снижения эмиссии катода и вырождения анода рентгеновских трубок, снижения интенсивности свечения сцинтилляторов и светочувствительности фотоприемников, ухудшения характеристик мониторов и разъюстировки приемно-передающего тракта. Поэтому остается крайне актуаль-

ной задача поддержания рентгеновских установок в работоспособном состоянии.

В соответствии с требованиями п. 41 Федеральных авиационных правил «Требования авиационной безопасности к аэропортам», утвержденных приказом Минтранса России № 142 от 28 ноября 2005 г., администрация аэропорта организует проведение ежедневных проверок (настроек) технических средств досмотра, в том числе рентгеновского оборудования (РО): рентгенотелевизионных интроскопов (РТИ) и компьютерных томографов, применяемых при производстве досмотра ручной клади, багажа, грузов, почты и бортовых запасов.

Сертификат транспортной безопасности по ПП № 969 на РО подтверждает их соответствие требованиям, предъявляемым ФСБ РФ, для обеспечения приемлемого уровня обеспечения безопасности, в том числе по возможности выявления ВВ. Но в силу того, что в процессе эксплуатации характеристики РО ухудшаются, необходимо осуществлять настроечные и калибровочные мероприятия с применением специальных тест-объектов, которые бы обязательно включали и имитаторы ВВ. Без этого эффективность обязательной сертификации может быть нивелирована.

В настоящее время службы авиационной безопасности аэропортов при ежедневных проверках РО и подразделения транспортной безопасности объектов транспортной инфраструктуры при периодических проверках РО используют комплекты тест-объектов для рентгенотелевизионных интроскопов (ТРТИ), утвержденные 16.10.2001 г. Департаментом авиационной безопасности и специального обеспечения полетов Минтранса России.

ТРТИ образца 2001 г. морально устарили и не обеспечивают проверку жесто-

ченных требований к обнаружительным параметрам РО, в том числе проверку требований по постановлению Правительства № 969 от 26.09.2016 г. на возможность обнаружения взрывчатых веществ в количестве не менее 49 из 50-ти.

Описание разработанных имитаторов ВВ

Актуальность использования имитаторов ВВ обусловлена тем, что в настоящее время все поставляемые на объекты воздушного транспорта рентгеновские установки по требованиям Международной организации гражданской авиации (ИКАО) должны проходить ежедневную проверку по возможностям обнаружения ВВ. Она обычно осуществляется с применением опломбированных тест-объектов импортного производства, содержащих имитаторы ВВ [2]. Необходимо отметить, что в импортных тест-объектах используются образцы имитаторов, ориентированные под иностранные виды ВВ, которые отличаются тем, что могут использоваться в России для совершения диверсионно-террористических актов на объектах транспортной инфраструктуры. Поэтому применение импортных имита-

торов ВВ для настройки рентгеновской аппаратуры, используемой в России, является недопустимым с точки зрения обеспечения национальной безопасности.

Для решения этой задачи были разработаны рецептуры имитаторов ВВ, соответствующие по показателям физической и электронной плотности ряду реальных ВВ как производимых в нашей стране, так и за рубежом.

Вычисление значений эффективных атомных номеров имитаторов ВВ для оценки соответствия аналогичным параметрам имитируемых ВВ производится с использованием следующей формулы:

$$Z_{\text{эф}} = \left[\frac{\sum_{k=1}^p a_k \cdot A_k \cdot Z_k^4}{\sum_{k=1}^p a_k \cdot A_k \cdot Z_k} \right]^{1/3},$$

где p – количество химических элементов в материале; A_k – грамм-атомная масса k -го элемента; Z_k – атомный номер k -го элемента; a_k – доля k -х элементов в материале.

Для имитации ВВ, предназначенных к использованию в технических сред-



Изображение: www.cmhltd.com

Эффективный атомный номер и плотность реальных ВВ и композиций их имитирующих

Взрывчатое вещество	Эффективный атомный номер $Z_{эф}$		Плотность ρ , г/см ³	
	Реальное ВВ	Имитатор	Реальное ВВ	Имитатор
Тротил (ТНТ)	7,26	7,27	1,65	1,64
Гексоген/октоген	7,40	7,38	1,86	1,88
Тетрил	7,34	7,37	1,72	1,71
ТЭН	7,57	7,54	1,77	1,77
Пикриновая кислота	7,04	7,05	1,76	1,73
ТАТР (перекись ацетона)	7,19	7,19	1,2	1,2

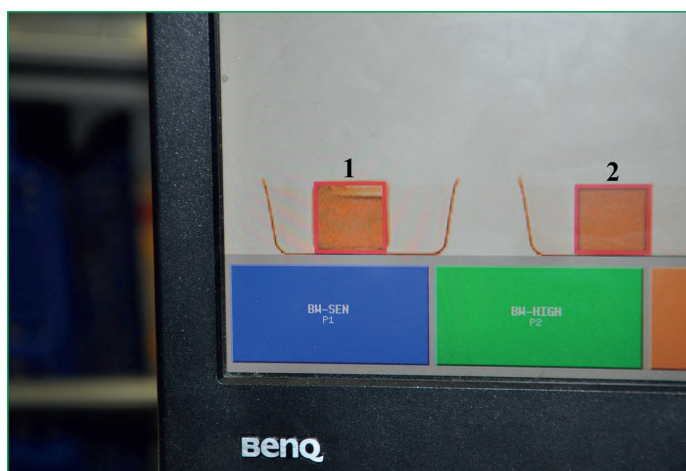


Рисунок. Выделение цветом (оранжевый) имитаторов ВВ

ствах обнаружения на основе методов рентгеноскопии, создан ряд рецептов, позволяющих воссоздать реальные ВВ, но в то же время абсолютно безопасные при использовании. В качестве исходных модельных компонентов использованы невзрывчатые, неедкие, неядовитые, нетоксичные, не вступающие во взаимодействие друг с другом вещества.

Исходя из приведенных в таблице типов ВВ, был произведен поиск возможных комбинаций из химически совместимых и устойчивых веществ, совокупность которых дает материал близкого элементного состава.

Как видно из данных таблицы, состав имитаторов по эффективному атомному номеру и плотности с хорошей точностью совпадает с данными для реальных ВВ.

На основе имитаторов взрывчатых веществ создаются изделия (пластики, эластичные, прессованные/литые шашки), максимально соответствующие реальным, которые используются в военной и промышленной сфере.

При инспектировании предлагаемых имитаторов ВВ на современных отечественных и зарубежных образцах РО с использованием специального программного обеспечения интроскопов (регистрация различий в электронной плотности инспектируемых веществ) происходит их графическое выделение (чаще всего цветом), дающее подсказку оператору о возможном наличии реального ВВ, соответствующего по характеристикам используемому имитатору (рисунок). При инспектировании имитаторов ВВ на рентгеновской томографической системе происходит их обнаружение в качестве ВВ, соответствующего по массе и форме используемому имитатору.

На основе предлагаемых имитаторов ВВ могут быть созданы макеты взрывных устройств различных видов, в том числе и замаскированные под обычные предме-

ты. В силу необходимости проверок работоспособности досмотровой техники, а также в соответствии с «Правилами проведения предполетного и послеполетного досмотров» выполнения «по совместным решениям руководителей службы авиационной безопасности и органа внутренних дел на транспорте совместных и самостоятельных проверок качества проведения досмотров с применением учебных тест-предметов», возможно ис-

пользовать для этих целей вышеуказанные имитаторы ВВ.

Вывод

Использование имитаторов ВВ на постоянной основе позволит реализовать мероприятия по обеспечению работоспособности рентгеновских установок и значительно повысить уровень транспортной безопасности.

Список литературы

1. Службы безопасности аэропортов США не прошли секретную проверку [Электронный ресурс]. URL: <https://rg.ru/2015/06/02/perelet-site-anons.html> (дата обращения: 02.06.2015).
2. Murty R.C. Effective atomic numbers of heterogeneous materials // Nature. 1965. Vol. 207. С. 398–399.

References

1. US airport security services did not go through a secret check [Electronic resource]. URL: <https://rg.ru/2015/06/02/perelet-site-anons.html> (date of application: 06.02.2015).
2. Murty R.C. Effective Atomic Numbers of Heterogeneous Materials // Nature. 1965. Vol. 207. P. 398–399.

Поступила в редакцию: 20.04.2022

Одобрена рецензентами: 25.06.2022

Принята к печати: 15.02.2023

Об авторах

Никита Юрьевич Илькухин* – кандидат технических наук, директор по науке, ООО «Элантех». 196006, г. Санкт-Петербург, ул. Заставская, д. 31, к. 2, литера В, помещение 5-Н, офис 35. Адрес для почтовых отправлений: 193232, г. Санкт-Петербург, а/я 54. E-mail: nikitailkuhin@mail.ru.

Nikita Yu. Ilkukhin* – PhD in Engineering sciences, director for science, LLC «Elangtek». 31, building 2, letter B, room 5-N, office 35, Zastavskaya str., St. Petersburg, 196006. Postal address: A/S 54, St. Petersburg, 193232. E-mail: Nikitailkuhin@mail.ru.

Сергей Михайлович Яковлев – ведущий инженер-технолог ФГУП «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог», сотрудник испытательной лаборатории.

Sergey M. Yakovlev – engineer-technologist, FSUE «Special Design and Technology Bureau «Technologist», employee of the testing laboratory.

Дарина Викторовна Бармашова – инженер-технолог 1-й категории ФГУП «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог».

Darina V. Barmashova – engineer-technologist of the 1st category FSUE «Special Design and Technology Bureau «Technologist».

Анатолий Сергеевич Козлов* – кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории ФГУП «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог», испытательная лаборатория. Адрес для почтовых отправлений: 192076, Санкт-Петербург, Советский пр., 33-а. E-mail: TOOL999@yandex.ru.

Anatoly S. Kozlov* – PhD in Engineering sciences, associate professor, head of the laboratory FSUE «Special Design and Technology Bureau «Technologist», testing laboratory. Postal address: 33-A, Sovetsky Ave., St. Petersburg, 192076. E-mail: TOOL999@yandex.ru.

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).



УДК 378

«ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ» – БАЗОВАЯ КАФЕДРА МФТИ

С.А. БОБКОВ, д.т.н., доц., А.А. ДЕГТЯРЕВ, к.ф.-м.н., С.А. УЛЬЯНОВ, И.В. ШАШКИН,
ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики»

Аннотация. Представлено краткое описание кафедры «Перспективные технологии для систем безопасности», созданной на базе ФГУП «ЦНИИХМ» и являющейся структурным подразделением Московского физико-технического института. Приведены основные сведения о составе, целях и задачах базовой кафедры, этапах ее формирования и планах развития.

Ключевые слова: ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ; БАЗОВАЯ КАФЕДРА; ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ.

Для цитирования: Бобков С.А., Дегтярев А.А., Ульянов С.А., Шашкин И.В. «Перспективные технологии для систем безопасности» – базовая кафедра МФТИ // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 1. С. 128–138.

«PROMISING TECHNOLOGIES FOR SECURITY SYSTEMS» – THE BASIC DEPARTMENT OF MFTI

S.A. BOBKOV, Grand PhD in Engineering, Assoc. Prof.,
A.A. DEGTYAREV, PhD in Phys. – Math., S.A. ULYANOV, I.V. SHASHKIN,
SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics»

Abstract. *This article represents the base department «Promising technologies for security systems» being a department of MIPT Phystech School of Aerospace Technology affiliated with Central Scientific Research Institute of Chemistry and Mechanics. Background characteristics of department structure, history, goals, purposes and prospective development.*

Keywords: HIGER EDUCATION; BASE DEPARTMENT; HUMAN RESOURCE DEVELOPMENT.

For citation: Bobkov S.A., Degtyarev A.A., Ulyanov S.A., Shashkin I.V. «Promising technologies for security systems» – the basic department of MFTI // Promising technologies for security systems. 2023. N 1. P. 128–138.

Исторический экскурс

Московский физико-технический институт (МФТИ) является одним из ведущих учебных заведений Российской Федерации, осуществляющих подготовку специалистов высшей квалификации в различных областях современной науки и техники. МФТИ обладает богатой историей [1]. Его основателями и сотрудниками в разное время являлись ученые с мировым именем, такие как академики П.Л. Капица, Л.Д. Ландау, Н.Н. Семенов, С.А. Христианович, Е.П. Велихов, О.М. Белоцерковский.

Первым ректором МФТИ в 1951 г. был назначен военный ученый кандидат технических наук И.Ф. Петров [2]. Существовавшая к тому времени в Советском Союзе система высшего образования в научно-технической области была главным образом нацелена на подготовку конструкторов, инженеров, технологов, а также ученых, специализировавшихся в области фундаментальных исследова-

ний. При этом в части подготовки специалистов по направлению прикладных наук государство испытывало острый дефицит.

Вышедшим из университетов выпускникам с фундаментальным, академическим образованием необходимо было еще несколько лет втягиваться в область прикладных разработок. Этот пробел в эпоху интенсивного развития ракетостроения и продвижения атомного проекта и предстояло устранить новому вузу с отличными от традиционных принципами обучения. В образовательную программу закладывалась университетская фундаментальная подготовка по естественным наукам и математике, усиленное изучение иностранных языков для свободного чтения технической литературы, а на старших курсах студенты привлекались к конкретной научной работе в НИИ, центрах и конструкторских бюро, где размещались новые кафедры, состоящие из ведущих ученых.



На фото: здание ФГУП «ЦНИИХМ»

Преподаватели и выпускники МФТИ отмечены высокими государственными наградами и премиями, а 10 человек удостоены Нобелевской премии [3]. Профессорско-преподавательский состав вуза возглавляют ведущие ученые России, в том числе более 80 академиков и членов-корреспондентов Российской академии наук и Российской академии ракетных и артиллерийских наук (РАРАН). В мае 2016 г. Московский физико-технический институт заслуженно вошел в ТОП-100 мирового рейтинга высших учебных заведений, основанный на оценке их репутации.

До сих пор в Московском физико-техническом институте используется оригинальная система подготовки специалистов, получившая широкую известность как «система физтех», в которой сочетаются и дополняют друг друга фундаментальное образование, инженерные дисциплины, научно-исследовательская работа студентов. Продолжается развитие системы базовых кафедр МФТИ с

ориентацией на тенденции в экономике, направленное на подготовку специалистов гражданской и оборонной промышленности для последующей работы на конкретном предприятии [4].

В интересах ФГУП «ЦНИИХМ»

Одна из базовых кафедр МФТИ сформировалась и на территории Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики» (ФГУП «ЦНИИХМ») сразу после того, как в 2005 г. ФГУП «ЦНИИХМ» было передано в ведомственное подчинение Федеральной службе по техническому и экспортному контролю. Руководство ФСТЭК России поставило перед институтом задачу разработки эффективных научно-технических решений в области вооружения и создания научно-технической базы для выпуска высокотехнологичной военной и специальной техники.

ФГУП «ЦНИИХМ» обеспечивает функционирование базовой кафедры ПТСБ на своей территории для подготовки высококвалифицированных специалистов с высшим образованием по основным направлениям деятельности института.

Решение этих задач было невозможным без коренной перестройки всей работы, в том числе подготовки высококвалифицированных кадров для ФГУП «ЦНИИХМ» и других организаций ФСТЭК России. В результате, на базе ФГУП «ЦНИИХМ» в 2005 г. на факультете аэрофизики и космических исследований была создана кафедра МФТИ «Автоматизированные биотехнические системы», возглавляемая заведующим кафедрой, Героем России, доктором технических наук, профессором С.И. Григоровым.

Помимо учебной деятельности, с момента образования кафедры и по настоящее время, МФТИ выполняет научно-исследовательские и опытно-конст-

рукторские работы в интересах предприятий ФСТЭК России. В этих целях в 2007 г. была создана совместная лаборатория прикладных нанотехнологий. Большинство студентов кафедры еще в процессе обучения участвуют в проводимых ФГУП «ЦНИИХМ» НИОКР и работают на предприятии, совмещая обучение в МФТИ с производственной практикой.

В связи с расширением спектра научных направлений подготовки специалистов для ФГУП «ЦНИИХМ» в ноябре 2016 г. кафедра «Автоматизированные биотехнические системы» приказом ректора МФТИ была переименована в кафедру «Перспективные технологии для систем безопасности» (ПТСБ) [5].



На фото: занятие студентов кафедры ПТСБ

В настоящее время базовая кафедра ПТСБ относится к физтех-школе аэрокосмических технологий (ФАКТ) МФТИ. Заведует кафедрой генеральный директор ФГУП «ЦНИИХМ» доктор технических наук, доцент, действительный член РАН Сергей Алексеевич Бобков (выпускник факультета аэрофизики и космических исследований МФТИ 2003 г.). Заместители заведующего кафедрой – Александр Александрович Дегтярев и Сергей Алексеевич Ульянов.

Главные направления и специализация

МФТИ на постоянной основе реализует учебные программы высшего образования бакалавриата – по направлениям 03.03.01 «Прикладные математика и физика», магистратуры – по 03.04.01 «Прикладные математика и физика», готовит научные кадры в аспирантуре по направлениям 01.06.01 «Математика и механика» и 24.06.01 «Авиационная и ракетно-космическая техника». Обучение осуществляется посредством сетевой формы с использованием ресурсов базовой организации. В соответствии с положением о базовой кафедре МФТИ и заключенным между МФТИ и ФГУП «ЦНИИХМ» договором ФГУП «ЦНИИХМ» предоставляет студентам и аспирантам МФТИ возможность использовать свои помещения и оборудование, создавая условия для погружения обучающихся в среду профессиональной деятельности с целью получения опыта и развития профессиональных компетенций.

Основные положения в части управления и организации образовательной деятельности кафедры ПТСБ определены в «Порядке взаимодействия ФГУП «ЦНИИХМ» и базовой кафедры». В состав кафедры входят руководители ФГУП «ЦНИИХМ», его научные сотрудники и ас-



На фото: С.А. Бобков, заведующий кафедрой ПТСБ МФТИ, генеральный директор ФГУП «ЦНИИХМ»

пиранты, а также ведущие специалисты различных отраслей, работающие в других научно-исследовательских учреждениях и на предприятиях смежных отраслей.

В соответствии с нормативными документами ФГУП «ЦНИИХМ» обеспечивает функционирование базовой кафедры на своей территории для подготовки высококвалифицированных специалистов с высшим образованием по направлениям деятельности ФГУП «ЦНИИХМ». В связи с этим решаются следующие задачи:

- создание необходимых условий студентам для успешного освоения образовательных программ, выбора оптимальных форм и методов обучения;

- организация и осуществление обучения на высоком учебно-методическом уровне;

- совершенствование качества обучения за счет использования результатов научно-исследовательских работ в образовательном процессе, внедрения современных прогрессивных методик и технологий;



На фото: чистая комната производственного помещения

формирование навыков профессиональной деятельности студентов с помощью наставников и высококвалифицированных специалистов-практиков для обучения, руководства научными исследованиями, практиками и выпускными квалификационными работами.

Учебные программы, объединяющие фундаментальное образование и уникальный опыт работы в прикладных проектах с передовыми технологиями, гарантируют выпускникам востребованность и профессиональный рост как в отечественных научно-производственных компаниях, так и в ведущих научных центрах страны по широкому спектру направлений:

перспективные ракетно-космические технологии;

разработки микро-, нано- и МЭМС-технологий для создания перспективных систем безопасности;

технологии микроэлектромеханических систем, разработки, производства и испытания измерительных и исполнительных микроустройств (интеллектуальные встроенные микросистемы) и приборов на базе нано-, микро- и МЭМС-технологий;

создание новых нано- и микроструктурированных материалов;

производство и испытания измерительных и исполнительных микроустройств на основе нано-, микро- и МЭМС-технологий для перспективных приборов и систем ракетно-космической техники и робототехнических комплексов;

разработка, производство и испытания перспективных источников энергии на основе нано- и микротехнологий;

разработка робототехнических комплексов морского и воздушного базирования.

Структура обучения на кафедре ПТСБ

С третьего курса студенты проходят производственную практику на базе научных лабораторий предприятия, по итогам которой ими оформляется отчет, а в отдельных случаях результаты докладываются на научных конференциях. В итоге к окончанию института отдельные студенты имеют уже по 5–6 публикаций в различных изданиях.

По инициативе кафедры ПТСБ в МФТИ организована работа специальной секции Всероссийской конференции, где молодые специалисты предприятий ФСТЭК и студенты выступают ежегодно с докладами, в которых обсуждаются актуальные научно-технические задачи в сфере высоких технологий с последующей публикацией статей в сборнике трудов конференции, входящем в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций.

Помимо общеинститутских курсов, студентам кафедры преподавателями, из числа работников ФГУП «ЦНИИХМ», читаются лекции и проводятся семинары по уникальным учебным программам, отражающим специфику предприятия. При подготовке к началу каждого учебного года, в соответствии с существующими требованиями, профессорско-преподавательским составом кафедры разрабатывается программа обучения, оформляются новые и корректируются существующие рабочие учебные программы и фонды оценочных средств для проведения промежуточной аттестации студентов, представляются в учебное управление МФТИ аннотации программ учебных дисциплин с указанием списка общепрофессиональных и профессиональных компетенций и индикаторы их достижения.

На протяжении всего обучения преподавателями кафедры ПТСБ МФТИ читаются следующие курсы:



На фото: проведение в МФТИ выездной сессии кафедры

численное моделирование случайных процессов;

технологии создания наноматериалов и физические методы их исследования;

прикладные аэродинамика и гидродинамика;

механика космического полета;

теория управления нелинейными системами;

численные методы оптимизации;

методы нечеткой логики, теория нейронных сетей и генетические алгоритмы;

специальные вопросы численного моделирования физических процессов.

По результатам пройденного материала выполняются лабораторные работы, по окончании семестров сдаются итоговые зачеты и экзамены. На основе выполненных работ студентам предоставляется возможность защиты бакалаврских работ и магистерских диссертаций.

Аспирантура для будущих ученых

ФГУП «ЦНИИХМ» обеспечивает подготовку научных и научно-педагогических кадров в собственной аспирантуре с очной и заочной формами обучения, располагает институтом соискательства, а также развивает социальные программы поддержки молодых специалистов, включая возможность трудоустройства, обеспечения жильем и т.п.

На предприятии функционирует научно-техническая библиотека, в фонде которой имеются печатные и электронные книги и периодические издания. Существует возможность получения литературы по межбиблиотечному абонементу в крупнейших научных библиотеках страны (РГБ, БЕН РАН и др.). Также имеется доступ к электронно-библиотечной системе «Лань», Национальной Электронной Библи-



На фото: представители кафедры ПТСБ с выпускниками



На фото: участники Всероссийской конференции МФТИ

отеке, отечественным и зарубежным научным электронным ресурсам, оборудованы интернет-классы, работает типография.

Имеется опыт эффективного дистанционного обучения с использованием онлайн-материалов и дистанционного чтения лекций преподавателями кафедры. Кроме того, разработка таких инструментов, как онлайн-тестирование, может применяться и при очной форме обучения для проверки усвоения материала.



На фото: студенты МФТИ
в загородном филиале ЦНИИХМ

На предприятии оборудованы специальные помещения для лекционных и практических занятий, кабинеты для самостоятельной подготовки, интернет-классы, работает читальный зал научно-технической библиотеки. При подготовке диссертаций свои научные исследования аспиранты осуществляют на обширной экспериментальной и научно-производственной базе института с ее современным оборудованием.

Строим карьеру вместе

Помимо отбора на полный цикл обучения в МФТИ, проводится работа по привлечению в ФГУП «ЦНИИХМ» с обучением на базовой кафедре студентов МФТИ, обучающихся на других кафедрах и факультетах МФТИ, а также завершающих обучение в других технических вузах РФ. Регулярно проводятся выездные

презентации для студентов младших курсов МФТИ с целью активного стимулирования их выбора ФГУП «ЦНИИХМ» в качестве приоритетной организации и поступления на кафедру ПТСБ, организуются выставочные мероприятия на территории МФТИ и других вузов Москвы («День Карьеры», «Карьерный форсаж», «День открытых дверей» и др.) с привлечением представителей управления по работе с персоналом и членов молодежного совета ФГУП «ЦНИИХМ».

Каждая выездная сессия сопровождается демонстрацией стенда с выставочной экспозицией и мультимедийными презентациями, распространением сувениров, дающих представление о направлениях деятельности ФГУП «ЦНИИХМ», и ответами на интересующие студентов вопросы.

В отдельных случаях молодые специалисты ФГУП «ЦНИИХМ», получившие высшее образование в различных вузах страны, имеют возможность повысить свою квалификацию и продолжить обучение в магистратуре МФТИ, не прекращая работать на прежнем месте. Уже имеется опыт успешного осуществления полноценного учебного процесса и сдачи экзаменационных сессий молодыми работниками ФГУП «ЦНИИХМ», ставшими студентами магистратуры МФТИ после того, как они принимают предложение руководства предприятия продолжить обучение в вузе и повысить свой научно-технический уровень без отрыва от производства.

Имеется опыт проведения ознакомительных мероприятий для студентов МФТИ с выездом на загородную базу отдыха в поселке Хатунь Московской области с демонстрацией образцов разрабатываемой продукции, примерами практического использования передовых научно-технических разработок и проведением спортивно-развлекательных мероприятий.

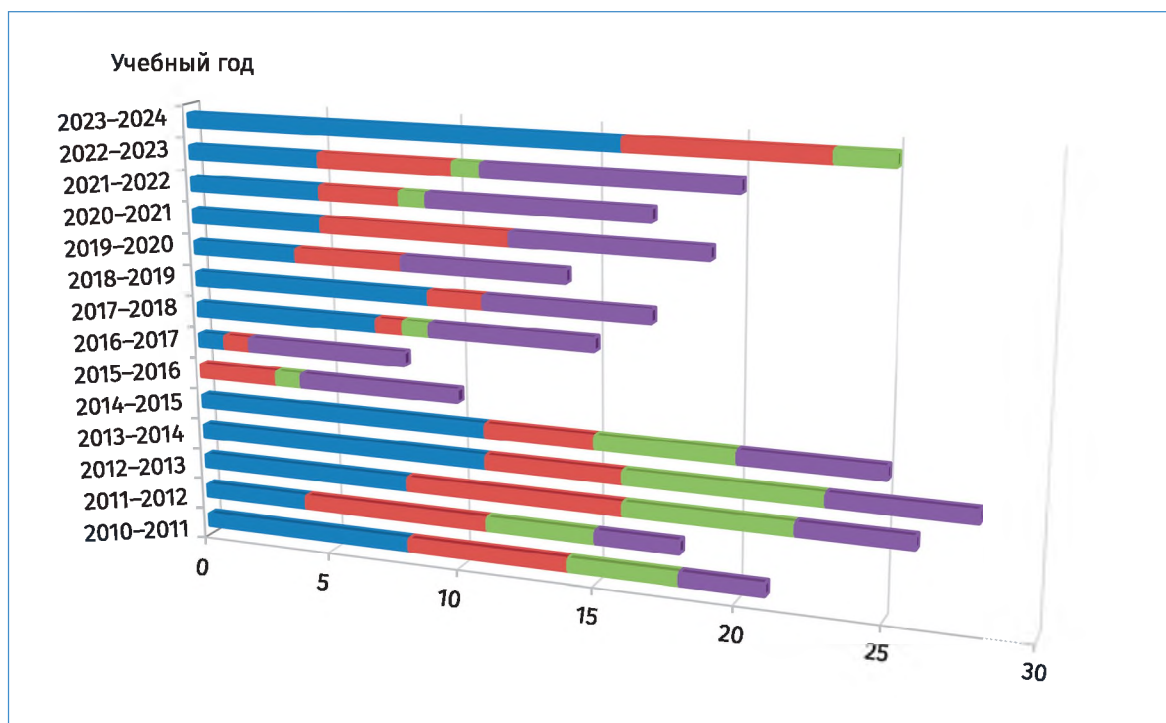


Рисунок. Состав обучающихся и выпускников кафедры:

■ – бакалавры; ■ – магистры; ■ – аспирантура; ■ – работающие в ЦНИИХМ выпускники

Деятельность кафедры в последние годы заметно активировалась, повысился уровень подготовки обучающихся, а также проявляемый студентами интерес к задачам, решаемым специалистами ФГУП «ЦНИИХМ» в сотрудничестве с коллективами смежных предприятий. Появляются новые формы взаимодействия научных работников предприятия с молодежью, возрастает ее вовлеченность в производственную, спортивную и культурную жизнь сплоченного коллектива с обширными потенциальными возможностями.

За последние несколько лет кафедра обучила десятки молодых специалистов (рисунок), часть из которых поддерживают отношения со своими научными руководителями, продолжая работать в смежных направлениях в других организациях. Выпускники, выбравшие продолжение своей карьеры в стенах базовой организации, как правило, занимают лиди-

рующие позиции в составе научных подразделений ФГУП «ЦНИИХМ», наполняя своей энергией ведущие направления исследовательской деятельности и задавая темп творческим процессам внедрения и использования новейших достижений.

Состав кафедры неуклонно расширяется, преподавателями становятся недавние выпускники МФТИ, связавшие свое карьерное продвижение с давней им толчок базовой организацией и осознавших, что повышение собственного интеллектуального уровня развития происходит эффективнее, когда делишься своим опытом с молодым поколением, заинтересовываешь его в творческом продвижении по пути создания собственных и освоения новейших достижений мировой науки для укрепления безопасности нашего государства в различных, порой совсем неожиданных, сферах технического развития.

Список литературы

1. Базовая кафедра Московского физико-технического института [Электронный ресурс] / Н.Н. Кудрявцев [и др.] // Технологии гражданской безопасности. 2004. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bazovaya-kafedra-moskovskogo-fiziko-tehnicheskogo-instituta> (дата обращения: 07.06.2023).
2. *Летуновский С.В., Соловьянов М.М.* Командовать легко, управлять трудно [Электронный ресурс] // ВИЖ. 2021. № 9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/komandovat-legko-upravlyat-trudno> (дата обращения: 07.06.2023).
3. Нобелевские лауреаты Физтеха [Электронный ресурс] // Наука и жизнь. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/27306/> МФТИ (дата обращения: 07.06.2023).
4. Наука [Электронный ресурс]. URL: https://science.fandom.com/ru/wiki/Базовые_кафедры_МФТИ (дата обращения: 07.06.2023).
5. Кафедра «Перспективные технологии для систем безопасности» [Электронный ресурс]. URL: <https://cniihm.ru/базовая-кафедра-мфти/?ysclid=lje922mdye472037371> (дата обращения: 07.06.2023).

References

1. Basic Department of the Moscow Institute of Physics and Technology [Electronic resource] / N.N. Kudryavtsev [et al.] // Civil security technologies. 2004. N 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bazovaya-kafedra-moskovskogo-fiziko-tehnicheskogo-instituta> (date of access: 06.07.2023).
2. *Letunovsky S.V., Solov'yanov M.M.* Commanding is easy, managing is difficult [Electronic resource] // VIZH. 2021. N 9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/komandovat-legko-upravlyat-trudno> (date of access: 06.07.2023).
3. Nobel Laureates of Phys Tech [Electronic resource] // Science and Life. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/27306/> MIPT (date of access: 06.07.2023).
4. Science [Electronic resource]. URL: https://science.fandom.com/ru/wiki/Basic_departments_MIPT (date of access: 06.07.2023).
5. Department of «Advanced Technologies for security systems» [Electronic resource]. URL: <https://cniihm.ru/basic-department-mfti/?ysclid=lje922mdye472037371> (date of access: 06.07.2023).

Поступила в редакцию: 20.04.2022

Одобрена рецензентами: 25.06.2022

Принята к печати: 15.02.2023

Об авторах

Сергей Алексеевич Бобков – доктор технических наук, доцент, действительный член РАН, генеральный директор ФГУП «ЦНИИХМ».

Sergei A. Bobkov – Grand PhD in Engineering sciences, Associate Professor, member of RARAN, general director of SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics».

Александр Александрович Дегтярев – кандидат физико-математических наук, заместитель генерального директора ФГУП «ЦНИИХМ» по инновационному развитию.

Alexander A. Degtyarev – PhD in physical and mathematical sciences, deputy general director of SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics» for innovative development.

Сергей Алексеевич Ульянов – сотрудник ФГУП «ЦНИИХМ».

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

Игорь Владимирович Шашкин* – сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИХМ». Адрес для почтовых отправок: 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А. E-mail: ptsb@cniihm.ru (в теме указать «Для Шашкина И.В.»).

Igor V. Shashkin* – employee of the 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 subject of letter, specify «For Shashkin I.V.»).

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

«ХАТУНЬ»: ТИХИЙ УГОЛОК ДЛЯ ОТДЫХА НА БЕРЕГУ РЕКИ

В исторических записях Хатунь значится, как исчезнувший город-крепость на левом берегу реки Лопасни, который был основан в XII в. Будучи оплотом Рязанского княжества, вплоть до XV в., город принадлежал серпуховским князьям, в частности, семье Ивана Калиты. В настоящее время Хатунь – село, на южной окраине которого расположено древнее городище «Городок» с остатками древних защитных сооружений, окруженных густыми лесами.

Впрочем, это не только историческое, но и достаточно популярное место для отдыха. Неслучайно в окрестностях Хатуни функционирует множество государственных и частных баз отдыха. Одна из них – с таким же названием – принадлежит ФГУП «ЦНИИХМ». База отдыха «Хатунь» с радостью встретит как работников предприятия, так и его гостей.

Здесь созданы все условия для полноценного релакса. Имеется лыжная трасса, бильярд, сауна, тренажерный зал. Чистейшая речка (Лопасня, впадающая в Оку) находится в пешей доступности и придает особое очарование этим местам. К услугам гостей широкий спектр возможностей по проведению конгрессно-выставочных, спортивных и музыкальных мероприятий, семинаров, совещаний, свадеб, банкетов.

Стоимость также вполне демократичная – 1800 руб./сутки с 3-разовым питанием.

На территории 16 га расположены двух- и трехэтажные спальные корпуса. Есть площадки для барбекю, игровая для детей, летний мини-зоопарк, купель, конференц-зал, каминный домик, парковка, охрана.

Номерной фонд: 1-комнатные в блоке (1 + 1 чел.); 1-комнатные (2 чел.); 2-комнатные (3–4 чел.). Во всех номерах есть санузел (душ + туалет + умывальник); смена белья в номере, уборка номера, Wi-Fi.



Как добраться

Проезд на автомобиле: по трассе М-4 «Дон», на 81-м км поворот на г. Чехов, г. Белгород, через два километра налево на Хатунь.

Общественным транспортом: с Павелецкого ж/д вокзала до станции Михнево, далее автобусом № 36 с. Хатунь.

Контакты: 8 (905) 547-19-97; 8 (909) 940-06-34; 8 (985) 039-00-19.

E-mail: filialhatun1@yandex.ru.

УДК 93/94, 351.865

ОПЫТ ЭВАКУАЦИИ И ЗАПУСКА ПРЕДПРИЯТИЙ ОБОРОННО- ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА В ГОДЫ ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЫ

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

Аннотация. Рассмотрены вопросы эвакуации промышленности и производственных мощностей оборонно-промышленного комплекса Советского Союза в начале Великой Отечественной войны – в 1941–1942 гг. Отмечены проблемы, с которыми столкнулось руководство страны при обеспечении боеприпасами частей Красной Армии, и раскрыты меры, предпринятые по скорейшему вводу оборонных предприятий, передислоцированных на Урал и в другие регионы страны. Рассказано о восстановлении и наращивании выпуска порохов различного назначения заводами Наркомата боеприпасов СССР. Приведены данные о восстановлении объемов выпуска существующих видов боеприпасов, их модернизации и создании новых во время боевых действий.

Ключевые слова: ЭВАКУАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ; СОВЕТСКАЯ ВОЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ; ВЕЛИКАЯ ОТЕЧЕСТВЕННАЯ ВОЙНА; БОЕПРИПАСЫ; НАРКОМАТ БОЕПРИПАСОВ; ПОРОХА; ПОРОХОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО.

Для цитирования: Гуськов В.А. Опыт эвакуации и запуска предприятий оборонно-промышленного комплекса в годы Великой Отечественной войны // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 1. С. 140–152.

EXPERIENCE OF EVACUATION AND FACILITY OF DIC ENTERPRISES DURING THE SECOND WORLD WAR

V.A. GUSKOV, PhD in Engineering,
SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics»

Abstract. In the article the author told about the issues of evacuation of industry and production capacities of the defense industry complex of the Soviet Union at the beginning of the Second World War – in 1941–1942 are considered. Highlighted issues by the country's leadership in providing ammunition to the Red Army units are noted, and the measures taken for the speedy commissioning of military enterprises relocated to the Urals and other regions of the country are disclosed. It means that the restoration and increase in the production of gunpowders for various purposes by the plants of the Ministry of ammunition of the USSR. There is an information about the restoration of the production volumes of the modernization of existing types of ammunition, their modernization and the creation of new ones, as well as their quantity released during the entire period of hostilities.

Keywords: EVACUATION OF INDUSTRY, SOVIET MILITARY INDUSTRY, THE GREAT PATRIOTIC WAR, AMMUNITION, GUNPOWDER, GUNPOWDER PRODUCTION.

For citation: Guskov V.A. Experience of evacuation and facility of dic enterprises during the second world war // Promising technologies for security systems. 2023. N 1. С. 140–152.

В сентябре 2023 г. исполняется 129 лет со дня образования ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики им. Д.И. Менделеева». Представленная ниже статья описывает одну их самых ярких страниц в истории института, связанную с эвакуацией советских промышленных предприятий и научных организаций на восток страны в годы Великой Отечественной войны.

...С началом боевых действий под угрозой захвата или уничтожения оказались основные экономически важные районы европейской части страны. Сложившаяся ситуация требовала исключительно решительных мер по перестройке экономики на военный лад, где ведущая роль принадлежала оборонным отраслям и, в частности, предприятиям, производившим боеприпасы [1].

ЦК ВКП(б) 24 июня 1941 г. принял решение о создании Совета по эвакуации, председателем которого был назначен Л.М. Каганович. Его заместителями стали А.Н. Косыгин, Н.М. Шверник и М.Г. Первухин. Позже в качестве первого заместителя к ним присоединился А.И. Микоян, а Н.М. Шверник стал председателем. Совет по эвакуации при СНК СССР официально действовал до 25 декабря 1941 г., фактически до окончания первого этапа эвакуации, а затем постановлением Государственного комитета обороны (ГКО) был расформирован, и все полномочия перешли вновь созданному Комитету по разгрузке, в обязанности которого прежде всего входило обеспечение «разгрузки транзитных и всяких иных застрявших надолго грузов на железных дорогах» [2, 3]. В состав Комитета вошли А.И. Микоян (председатель), А.Н. Косыгин, Л.М. Каганович, Н.А. Вознесенский и А.В. Хрулёв.

Эвакуация проводилась в два этапа: в 1941 г. – из Белоруссии, Украины, Прибалтики, Москвы и Ленинграда; в 1942 г. – из южных районов европейской части СССР.

В первую очередь была проведена организационная перестройка органов тыла Красной Армии, в соответствии с которой основная ответственность за вывоз промышленного оборудования и других материальных ценностей в восточные районы страны возлагалась на начальников тыла, фронтов и армий. При наркоматах и ведомствах были образованы бюро, комитеты, советы и комиссии по эвакуации с назначением уполномоченных для каждой группы предприятий [3]. Поскольку главная тяжесть эвакуационных мероприятий легла на железные дороги, то на крупные станции правительство направило представителей Совета по эвакуации, а позже – Комитета по разгрузке. Только на девяти железных дорогах центрального региона находилось до 30 уполномоченных по эвакуации. Наркомат путей сообщения (НКПС) ежедневно представлял в ГКО подробную справку о находящихся на железных дорогах составах с эвакогрузом. Позднее во все морские порты страны также были направлены заместители наркома Военно-морского флота (ВМФ) СССР и ответственные работники политуправления наркомата ВМФ.

Передислокация военной промышленности в режиме ручного управления

В Наркомате боеприпасов (НКБ) СССР под руководством П.Н. Горемыкина вопросом эвакуации занимались практически все ответственные лица центрального аппарата и главных управлений. В сжатые сроки были подготовлены конкретные предложения по перемещению предприятий из прифронтной зоны и размеще-

нию их в восточных районах страны. Эти предложения были рассмотрены Советом по эвакуации и внесены на утверждение в Политбюро ЦК ВКП(б) и ГКО, который был создан 30 июня 1941 г.

Несмотря на то что процедура прохождения таких решений была сложной, они тем не менее принимались быстро и без проволочек. Уже 11 июля 1941 г. вышло Постановление ГКО за № 99сс, по которому был утвержден план эвакуации промышленных предприятий, строго определены сроки для каждого предприятия и место нового размещения. НКПС предписывалось задание по выделению нужного количества вагонов для перевозки людей и грузов. Под руководством назначаемых НКБ уполномоченных, выезжавших на заводы, производились демонтаж и отправка промышленного оборудования, ценных материалов и людей.

По воспоминаниям М.И. Воротовова, в то время занимавшего должность главного инженера технического отдела Первого главного управления НКБ (впоследствии он стал заместителем директора ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИХМ»), его с соответствующими полномочиями направили для эвакуации завода № 20 из города Рубежное Ворошиловградской области на 114 Копейский машиностроительный завод под Челябинском (рис. 1). Эвакуация проводилась с таким расчетом, чтобы как можно дольше продолжать выпуск боеприпасов (БП) на прежнем

20 тыс.

вагонов было использовано для эвакуации грузов НКБ СССР в первый период ВОВ

месте дислокации предприятия и в то же время успеть вывезти оборудование и персонал. В первую очередь вывозились техническая документация, оснащение заготовительных цехов. Следом отправлялись металлорежущие станки, кузнечно-прессовое оборудование, оборудование для термической обработки, материалы, комплектующие и агрегаты. А сборочные цеха продолжали работать. Их оборудование отправлялось в самую последнюю очередь [4]. Для всех стало законом указание ГКО: «Выдавать продукцию до последней возможности!» В каждом конкретном случае сроки эвакуации определялись из складывающейся военной обстановки.

В исключительных случаях, когда вопросы эвакуации предприятий по производству БП касались особо важных объектов, на места выезжали первые лица НКБ. Так, в конце лета 1941 г. для организации эвакуации крупного порохового комбината прибыл заместитель наркома НКБ К.С. Гамов.

Согласно директиве от 2 сентября 1941 г., разосланной наркомом НКБ П.Н. Горемыкиным, каждый руководитель, ответственный за эвакуацию предприятия, должен был отчитываться с помощью телеграфных донесений о ходе эвакуации. Под особым контролем находились ресурсы, необходимые для возоб-



На фото: М.И. Воротов

новления производства на новых местах дислокации: станочный парк, большая часть энергетического и технологического оборудования, запасы металлов и других материальных ценностей. В этот период для эвакуации грузов в интересах НКБ СССР было использовано более 20 тыс. вагонов.

Таким образом, из прифронтовых областей и районов страны было эвакуировано 25 предприятий (рис. 2), произво-

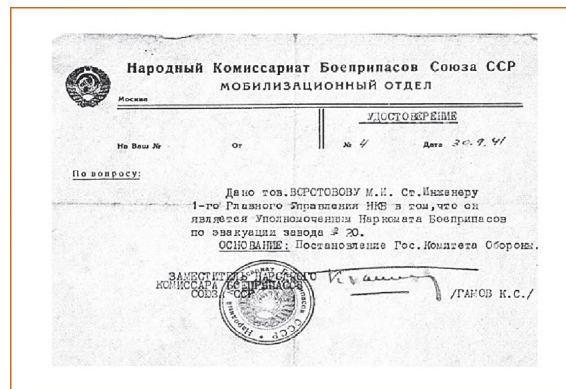
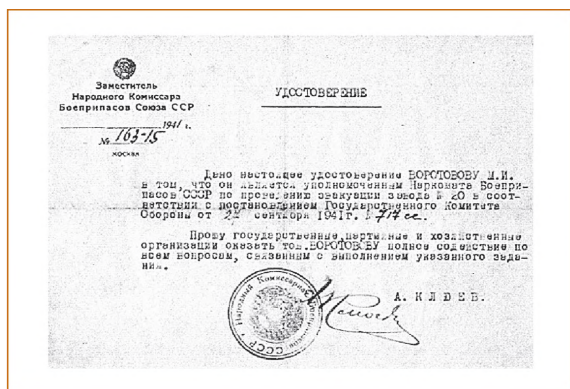


Рис. 1. Удостоверения М.И. Воротова по эвакуации завода № 20

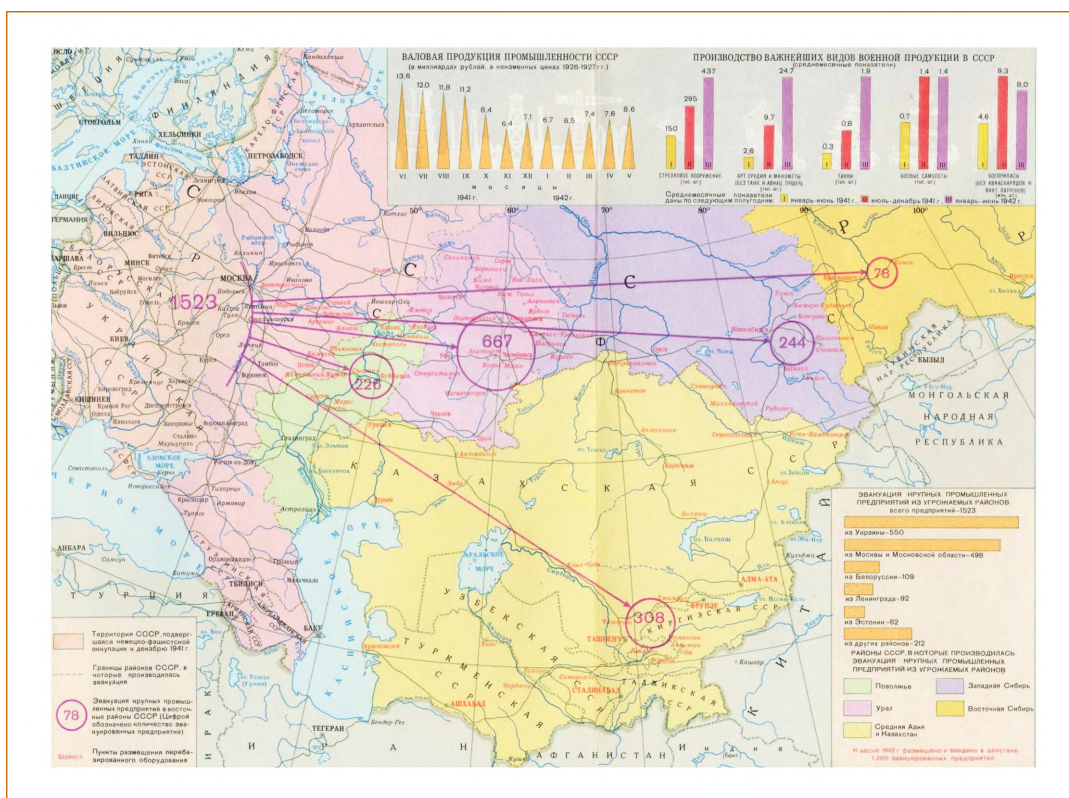


Рис. 2. Карта эвакуации промышленных предприятий во время Великой Отечественной войны 1941–1945 гг.

дивших корпуса снарядов, взрыватели, гильзы, авиационные выстрелы, пороха, капсюли, пиротехнические изделия, а также полигоны для испытаний артиллерийских боеприпасов и авиабомб. Среди них было пять заводов, изготавливавших корпуса артиллерийских снарядов для полевой и корабельной артиллерии, корпуса артиллерийских мин, реактивных снарядов, авиабомб и ручных гранат. Три эвакуированных завода производили корпуса снарядов и гильз для малокалиберных выстрелов, в том числе 20 и 23-мм авиационных патронов.

Помимо этого, Наркомат боеприпасов перевел на Урал и часть своих учреждений. В частности, в Челябинск на завод № 78 переехал Ленинградский филиал НИИ-24, а ленинградская контора Главнаба НКБ эвакуировалась в Свердловск [5].

Руководители же тех заводов, где должны были располагаться эвакуированные предприятия, заранее получали распоряжения по подготовке к приему и размещению оборудования и людей, о начале строительства упрощенных помещений.

Предприятия надо было перевезти, восстановить и запустить в эксплуатацию. С целью оптимизации решения столь сложной задачи предусматривалось использование ресурсов предприятий, существующих на Волге, в Западной Сибири и на Урале, а также ресурсов и предприятий, вывозимых в указанные районы в порядке эвакуации, учет как основных предприятий, так и смежных. Многие эвакуируемые предприятия вливались в родственные, имеющиеся на Урале, в Сибири, Поволжье и Средней Азии. Но значительную часть производственных

площадей строили заново. В июле 1941 г. были созданы особые строительно-монтажные части, отличающиеся мобильностью. Большинство заводов вступали в строй через 1,5–2 месяца после прибытия на новое место. В результате три четверти авиационных производств были восстановлены к концу 1941 г., а девять предприятий к этому времени уже работали на полную мощность.

Некоторые «промышленные гиганты» невозможно было разместить в каком-нибудь одном городе, и их пришлось децентрализовать. Например, часть Московского подшипникового завода была вывезена в Саратов, другая часть – в Куйбышев и третья – в Томск. Все это требовало решения ряда новых организационных проблем.

В 1941 г. в глубокий тыл было вывезено 1523 крупных предприятий, в том числе 1360 заводов и фабрик. Из них на Урал было отправлено 667, в Западную Сибирь – 244, в Восточную Сибирь – 78, в Среднюю Азию и Казахстан – 308, в Поволжье – 226 [6]. Согласно сводкам Народного комиссариата путей сообщения, из угрожаемых районов было вывезено 2593 промышленных предприятий, из них 1350 – в первые три месяца.

Были эвакуированы все танковые, авиационные заводы, заводы боеприпасов и вооружения, 150 – машиностроительных, 94 – металлургических, 40 – электротехнической промышленности. Во время второго периода эвакуации на восток вывезли 150 крупных предприятий, в том числе оборудование нефтепромыслов Майкопа и Грозного и запасы нефти. За период с июля 1941 по август 1942 г. в тыл были перевезены 2743 предприятия. Наибольшее их количество было эвакуировано с Украины (550), из Москвы и Московской области (498), из Белоруссии (109) и Ленинграда (92) [7].

Проблемы военных заводов, перемещенных вглубь страны

Хотя значительная часть советской тяжелой и особенно военной промышленности была успешно вывезена на восток за четыре–пять месяцев, это сопровождалось неизбежным снижением производства. Советский оборонно-промышленный комплекс (ОПК) на новом месте столкнулся с огромными трудностями. В силу ряда причин оборудование сопровождало только 40–50% персонала. На перемещенных предприятиях попросту не хватало рабочих рук.

2743 предприятия были перевезены в тыл с июля 1941 по август 1942 г.

На первых порах ощущалась также очень серьезная нехватка некоторых видов сырья. Это, прежде всего, касалось качественной стали для броневых листов, которая выплавлялась до войны в основном в Восточной Украине. В связи с этим многим предприятиям пришлось коренным образом перестраивать производственные процессы, что вызвало временное снижение производительности доменных и мартеновских печей.

Крайне не хватало молибдена и марганца. Большое количество марганца добывалось в районе Никополья, а теперь он был оккупирован фашистами. Пришлось строить новые марганцевые рудники на Урале и в Казахстане, где условия почвы и климата создавали невероятные трудности. Никопольские горняки, доставившие на восток рудничное оборудование, приступили с помощью местных рабочих к добыче марганцевой руды в одном от-

даленном районе Свердловской области, где незадолго перед войной было начато строительство марганцевого рудника [7, 8]. Позднее организацию выплавки ферромарганца на Кушвинском заводе в Кузбассе и в Магнитогорске союзники СССР назвали «*большой победой металлургов, равной по своему значению выигрышу крупного военного сражения*». Столь же замечательным примером человеческой стойкости было строительство молибденовых рудников в безводной степи близ озера Балхаш в Средней Азии.

С захватом немцами Донбасса Советский Союз потерял более 60% источников добычи угля, поэтому пришлось увеличивать добычу антрацита на Урале, в Кузбассе и в Караганде. В декабре 1941 г. было решено в ближайшие три месяца ввести в действие 44 новые шахты. Прилагались также отчаянные усилия для увеличения добычи алюминия, никеля, кобальта, цинка, нефти и т.д.

К концу октября 1941 г. не работал ни один из металлургических заводов юга. К этому времени из числа действовавших на 1 июня 1941 г. у СССР оставалось 38,4% доменных печей, 52,6% мартеновских печей, 38,6% электросталеплавильных печей, 52,2% прокатных станков. Выплавка металла составляла: чугуна – 32,9%; стали – 42,3%; прокат достигал лишь 42,5% по сравнению с июнем 1941 г. Не действовал ни один конвертер. В декабре 1941 г.

выплавка чугуна по сравнению с июнем уменьшилась более чем в четыре раза, выплавка стали и производство проката – более чем в три раза.

Потеря районов с развитой химической промышленностью привела к резкому снижению производства пороха и взрывчатых веществ. Остро ощущался недостаток ферросплавов, никеля и цветных металлов. Потребность промышленности боеприпасов в меди, олове и алюминии по сравнению с довоенным временем возросла в несколько раз. К середине декабря 1941 г. из 26 предприятий и цехов химической промышленности, эвакуированных в восточные районы, на место прибыло оборудование лишь восьми заводов. Из них было пущено в ход меньше половины. К началу 1942 г. производство пироксилинового пороха составляло всего 44% от расчетной мощности, практически полностью были потеряны мощности по производству нитроглицериновых баллиститных порохов. Лишь небольшое количество этого столь нужного сырья производилось на Государственном союзном заводе на базе Охтинского химкомбината и части эвакуированного завода № 6 НКБ СССР.

Задача по восстановлению производства порохов осложнялась перебоями в поставках основных видов сырья, частыми остановками из-за отсутствия топлива, недостатка транспортных средств для межцеховых перевозок, тары, запасных

Таблица

Производство порохов заводами НКБ СССР в период 1941–1945 гг.

Производство пороха в период ВОВ	Годы					Всего 1941–1945
	1941 (июль–декабрь)	1942	1943	1944	1945 (январь–май)	
Произведено пороха, т	43 024	67 698	112 770	126 890	49 402	399 784
В том числе:						
пироксилиновых порохов	39 818	54 670	79 832	80 160	28 283	282 763
баллиститных порохов	3 206	13 028	32 938	46 730	21 119	117 021



На фото: сотрудница одного из эвакуированных предприятий на производстве боеприпасов

частей к машинам и агрегатам, многие из которых работали в агрессивных средах.

Фактически пришлось заново создавать отрасль пороховой промышленности – производство баллиститных порохов и зарядов из них. Выпуск этих порохов за годы войны увеличился в 7,5 раза и составил 30% в общем выпуске порохов по сравнению с 9% накануне войны (см. таблица).

В июне 1943 г. было начато производство серной кислоты (олеума), а с июля того же года была организована сборка артиллерийских и минометных зарядов, пламегасителей и воспламенителей из пироксилина и кордитных порохов, поставляемых из США и Англии.

Основой такого быстрого восстановления производственных мощностей промышленности пироксилиновых и баллиститных порохов, по оценке первого историографа боеприпасной отрасли И.И. Вернидуба, явилось в первую очередь то, что «учеными-пороховиками в предвоенные годы был создан фундаментальный научный задел и прогрессивные типовые проек-

тные решения, которые позволили быстро и обоснованно проектировать и строить пороховые цеха и заводы, осваивать новые производства, а также вести отработку и организовывать массовый выпуск надежных зарядов ко всем видам ствольной и ракетной артиллерии и к минометным системам».

Восстановление объемов выпуска боеприпасов на востоке СССР

С августа по ноябрь 1941 г. выбыло из строя 303 предприятия, изготовлявших БП. Увеличилась диспропорция между числом произведенных орудий и числом выстрелов на один ствол. Во втором полугодии 1941 г. фронт расходовал главным образом боеприпасы, накопленные еще в мирное время.

Ситуация усугублялась еще и тем, что основные мобилизационные запасы были переданы накануне войны центральными управлениями тыла приграничным военным округам. Вот что вспоминает генерал армии А.В. Хрулёв, бывший в

годы войны начальником Тыла Красной Армии: *«За год до войны в правительстве рассматривался вопрос о районах сосредоточения основных мобилизационных запасов военного имущества на случай войны. Военные специалисты предложили разместить их за Волгой. Но этому решительно воспротивился тогдашний нарком госконтроля Л.З. Мехлис. Он упорно настаивал на том, что основные военные запасы нужно накапливать в западных пограничных районах, вблизи от вероятного противника. И в любом возражении против этого Мехлис усматривал чуть ли не вредительство».*

Мехлис и его сторонники исходили из того, что действия советских войск обязательно будут носить с самого начала только наступательный характер и при том непременно успешный, а раз это так, то и склады должны быть уже в мирное время как можно ближе продвинуты к войскам. Результат такого расчета был более чем плачевен. За первые шесть месяцев войны запасы боеприпасов были почти полностью исчерпаны, а количество вновь произведенных составляло лишь 50–60%

от запланированного. Во многом именно этим обстоятельством объясняется неудача контрнаступления Красной Армии под Москвой в начале 1942 г.

Вот что по этому поводу пишет в своих воспоминаниях маршал Г.К. Жуков: *«Особенно плохо обстояло дело с боеприпасами. Так, из запланированных на первую декаду января боеприпасов нашему Западному фронту было предоставлено: 82-мм мин – 1%; артиллерийских выстрелов – 20–30%. А в целом за январь 50-мм мин – 2,7%, 120-мм – 36%, 82-мм – 55%, артиллерийских выстрелов – 44%. Февральский план совсем не выполнялся. Из запланированных 316 вагонов на первую декаду не было получено ни одного. Из-за отсутствия боеприпасов для реактивной артиллерии ее пришлось частично отводить в тыл.*

Вероятно, трудно поверить, что нам приходилось устанавливать норму расхода ... боеприпасов – 1–2 выстрела на орудие в сутки. И это, заметьте, в период наступления! В донесении Западного фронта на имя Верховного Главнокомандующего от 14 февраля 1942 г. говорилось: «Как показал



На фото: Красноярский комбайновый завод

опыт боев, недостаток снарядов не дает возможности проводить артиллерийское наступление. В результате система огня противника не уничтожается, и наши части несут очень большие потери, не добившись надлежащего успеха».

Между тем в конце 1941-го – начале 1942-го г. один за другим начали вступать в строй эвакуированные заводы. Если в 1941 г. к производству боеприпасов было привлечено 382 предприятия 34 наркоматов, то в 1942 г. – 1108, а в 1943-м – 1300 [9]. По свидетельству руководителя НКБ СССР П.Н. Горемыкина, за годы войны к производству боеприпасов было привлечено более 3 тыс. предприятий. Среди них были как промышленные гиганты, так и мелкие артели промкооперации, производственные мастерские высших и средних учебных заведений, училища системы государственных трудовых резервов, предприятия наркоматов сельского и лесного хозяйств, морского и речного флота, рыбной промышленности, связи, коммунального хозяйства, просвещения, производственные комбинаты Комитетов по делам искусств и кинематографии и многие другие. В стране к производству боеприпасов были привлечены все отрасли народного хозяйства. Координировалась деятельность всех производственных коллективов отделом боеприпасов Госплана, НКБ и созданными во всех гражданских наркоматах и ведомствах военными отделами. В результате уже в 1942 г. промышленность СССР выпустила БП на 1% больше, чем промышленность фашистской Германии.

При этом шла постоянная работа по модернизации существующих БП и созданию новых. Ученые и конструкторы НИИ-24, ГСКБ-47, НИИ-6, ЦКБ-22 уже в начале войны в короткие сроки разработали, а коллективы корпусных, взрывательных и снаряжательных заводов организовали выпуск новых противотанковых БП – под-

СПРАВКА

В апреле 1938 г. в лесном массиве вблизи Чебоксар началось строительство завода по производству боеприпасов под номером 320 (ныне АО «ЧПО им. В.И. Чапаева»). С началом Великой Отечественной войны планы были пересмотрены для немедленного пуска первой очереди и уже 15 октября 1941 г. коллектив предприятия выдал необходимую фронту продукцию. Наркоматом боеприпасов была определена проектная мощность завода и основная номенклатура: зажигательные и осветительные бомбы, дымовые шапки, трассеры.

Для того чтобы успешно решать поставленные задачи, одним рабочим специальностей было недостаточно, требовались грамотные, специально обученные квалифицированные инженеры, а также представители науки. С этой целью при заводе № 320 был создан филиал № 4 Научно-исследовательского института № 6 (ныне ЦНИИХМ), а для практического налаживания производства боеприпасов, обучения молодых инженерно-технических работников здесь находилось особое технологическое бюро НКВД. Именно они внесли решающий вклад в освоение производства и выход завода на проектную мощность.

калиберных и кумулятивных, бронебойных артиллерийских снарядов, кумулятивных противотанковых авиабомб, ручных противотанковых фугасных и кумулятивных гранат, новых противотанковых инженерных мин заграждения и т.д. За это ведущие научно-исследовательские и конструкторские организации промышленности боеприпасов были награждены орденами СССР: орденом Ленина было награждено ГСКБ-47, орденом Трудового Красного Знамени – НИИ-6 и НИИ-24.

Вот лишь один пример самоотверженной работы такого известного и старейшего предприятия ОПК, как НИИ-6, а ныне ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики». Передислокация подразделений НИИ-6 пришлась на самый пик эвакуационных мероприятий. Основные подразделения института 22 октября



*На фото: Чебоксары. Филиал № 1 НИИ-6 (май 1943 г.).
Начальник филиала Н.Ф. Ус (в центре), его заместитель И.И. Вернидуб (второй слева)
и сотрудники обсуждают план эвакуации*

1941 г. во главе с директором А.П. Закощиковым были отправлены в Кемерово на комбинаты № 319 и 392 (производство ВВ). В Чебоксары на завод № 320 26 октября 1941 г. выехали сотрудники пиротехнических лабораторий НИИ-6, которые создали там свой филиал № 1 по разработке пиротехнических и зажигательных составов и средств. Это подразделение успешно работало с ноября 1941 по май 1943 г., когда его сотрудники и оборудование были реэвакуированы в Москву.

Оставшиеся производственные и непроизводственные помещения, инвентарь и другие товароматериальные ценности от эвакуированного НИИ-6 были переданы снаряжательному заводу № 575 НКБ СССР.

Завод был организован в июле 1941 г. на базе расположенной неподалеку фаб-

рики сухой штукатурки. Здесь была оставлена оперативная группа НИИ-6 под руководством М.З. Полевикова. В ее обязанности входило выполнение срочных заданий по организации производства боеприпасов на московских предприятиях, поддержка связи с фронтом и оставленными в Москве оперативными группами НКБ, Главного артиллерийского управления и другими управлениями Наркомата обороны СССР, Госплана СССР и др. Кроме того, в обязанности группы входила проработка собственными силами и решение неотложных вопросов, сбор, обработка и донесение до руководства института и его филиалов информации о запросах и нуждах фронта. Причем состав группы постоянно пополнялся за счет сотрудников, возвращавшихся из эваку-

ации. В 1942 г. она была преобразована в Московский филиал НИИ-6.

Осенью 1941 г. в цехах опытных мастерских НИИ-6 по инициативе А.П. Закощикова было организовано производство боеприпасов. Это направление работы являлось настолько важным, что в ноябре 1941 г. оно было выделено из состава завода № 575 в самостоятельное предприятие – Государственный союзный завод НИИ № 6 НКБ СССР. Было создано несколько новых направлений: производство зарядов к 37 и 50-мм минометам, гремуче-ртутных капсюлей-детонаторов и капсюлей-воспламенителей для РГД-33. В дни обороны Москвы завод НИИ № 6 был единственным в стране, который выпускал заряды для легендарных «Катюш». В начале 1942 г. Государственный завод НИИ № 6 был передан в ведение 3-го Главного управления НКБ СССР и в дальнейшем специализировался как пороховой. Ему было присвоено название «Государственный союзный завод № 562 НКБ СССР» (руководитель А.П. Закощиков).

В годы войны НИИ-6 удалось сохранить научно-технический и технологический потенциал в области взрывчатых веществ, порохов и пиротехнических составов. Особое место среди работ этого сложного периода занимают разработки института в области минометных порохов и технологии их массового производства. Именно они явились ключевыми в решении проблем обеспечения войск минометным вооружением, одним из наиболее массовых при ведении наземных боевых операций (автор рецептуры минометных порохов Б.П. Фомин).

Спектр работ института в этот период был необычайно разнообразен. Годовой план содержал более 200 проблем по различным направлениям химии боеприпасов. Значительная часть их была успешно решена. Перечень важнейших

работ, переданных промышленности и заказчику за годы войны, содержал более 217 наименований, а количество новых видов боеприпасов, сданных для снабжения войск, превышало 100.

НИИ-6 в конце 1941 г. стал образцом для других производителей БП. Ввод новых предприятий и эвакуированных заводов происходил на основе проектной документации, использующей технологии НИИ-6. Технической документацией НИИ-6 пользовались все НИИ и КБ Наркомата боеприпасов СССР, а также предприятия других наркоматов.

Выводы

Благодаря оперативной эвакуации предприятий военной промышленности вглубь территории СССР была не только сохранена научно-производственная база оборонного комплекса страны, но и получены темпы роста выпускаемой продукции, поразившие смелое воображение. По данным И.И. Вернидуба, «за годы Великой Отечественной войны 1941–1945 гг. советская промышленность ВВ и снаряжения обеспечила выпуск 333,3 млн шт. снарядов для полевой и корабельной артиллерий, 342,8 млн шт. артиллерийских мин, около 14,5 млн шт. реактивных снарядов, около 200 млн шт. малокалиберных авиационных снарядов, около 200 млн шт. ручных противотанковых и противопехотных гранат, 37,2 млн шт. авиационных бомб общим весом свыше 700 тыс. т, более 66,7 млн шт. инженерных мин заграждения, 40 тыс. шт. морских мин и боевых зарядных отделений торпед, 161,3 тыс. шт. глубинных бомб. Советская артиллерия получила от снарядательной промышленности 775,6 млн артиллерийских снарядов и мин». Это было результатом воистину величайшего героизма и стойкости «передовой линии тыла».

Список литературы

1. *Калинин М.И.* Работа Советов в условиях войны. В кн.: Статьи и речи (1941–1946). М., 1975.
2. *Генкин Д.* Историки: Уже осенью 1941 года враг понял, что проиграет войну // Комсомольская правда от 22 июня 2016 г.
3. *Куманев Г.А.* Война и эвакуация в СССР в 1941–1942 годах // Новая и новейшая история. 2006. № 6.
4. Эшелоны идут на Восток: Из истории перебазирования производительных сил СССР в 1941–1942 гг.: сб. статей и воспоминаний / Институт истории; отв. ред. Ю.А. Поляков [и др.]. М.: Наука, 1966.
5. *Курлаев В.Е.* Заводы наркомата боеприпасов на Урале как объект исследования / Институт истории и археологии УрО РАН Россия. Екатеринбург.
6. *Косыгин А.Н.* В едином строю защитников Отечества. М., 1980.
7. Советский тыл в Великой Отечественной войне / Институт истории СССР АН СССР; под общ. ред. акад. П.Н. Поспелова. М.: Мысль, 1974.
8. Советский тыл в первый период Великой Отечественной войны / В.Т. Анисков [и др.] / Институт истории СССР; отв. ред. Г.А. Куманев. М.: Наука, 1988.
9. https://structure.mol.ru/files/VOV/tom7/VOV_Vol7_119-144_Chap3.pdf (дата обращения: 18.03.2023).

References

1. *Kalinin M.I.* Rabota Sovetov v usloviyah vojny. V kn.: Stati i rechi (1941 – 1946). M., 1975.
2. *Genkin D.* Istoriki: Uzhe osen'yu 1941 goda vrag ponyal, chto proigraet vojnu // Komsomol'skaya pravda ot 22 iyunya 2016 g.
3. *Kumanev G.A.* Vojna i evakuaciya v SSSR v 1941–1942 godah // Novaya i novejšhaya istoriya. 2006. N 6.
4. Eshelony idut na Vostok: Iz istorii perebazirovaniya proizvoditel'nyh sil SSSR v 1941–1942 gg.: Sbornik statej i vospominanij / In-t istorii; отв. red. YU.A. Polyakov [et al.]. M.: Nauka, 1966.
5. *Kurlaev V.E.* Zavody narkomata boepripasov na Urale kak ob"ekt issledovaniya / Institut istorii i arheologii UrO RAN Rossiya. Ekaterinburg.
6. *Kosygin A.N.* V edinom stroyu zashchitnikov Otechestva. M., 1980.
7. Sovetskij tyl v Velikoj Otechestvennoj vojne / In-t istorii SSSR AN SSSR; pod obshch. red. akad. P.N. Pospelova. M.: Mysl', 1974.
8. Sovetskij tyl v pervyj period Velikoj Otechestvennoj vojny / V.T. Aniskov [et al.] / In-t istorii SSSR; Otv. red. G.A. Kumanev. M.: Nauka, 1988.
9. https://structure.mol.ru/files/VOV/tom7/VOV_Vol7_119-144_Chap3.pdf (data obrashheniya: 18.03.2023).

Поступила в редакцию: 20.04.2022

Одобрена рецензентами: 25.06.2022

Принята к печати: 15.02.2023

Об авторах

Вячеслав Александрович Гуськов* – кандидат технических наук, сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики». Область научных интересов – разработка, опытное и серийное производство боеприпасов и специальной военной техники, их составных частей и элементов. Адрес для почтовых отправлений: 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А. E-mail: orgsertifica@cniihm.ru.

Vaycheslav A. Guskov* – PhD in Engineering sciences, employee of the SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics». Research interests – development, experimental and serial production of ammunition and special military equipment, their components and elements. Postal address: 16A Nagatinskaya str., Moscow, 115487. E-mail: orgsertifica@cniihm.ru.

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).