



ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ

ISSN:
2949-4575

ДЛЯ
СИСТЕМ

№ 2 (02)

ОКТАБРЬ–ДЕКАБРЬ

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
(академик) РАН

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. Рюткина, 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
(акад.) РАН (*председатель редсовета*)
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 (акад.) 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 (акад.) РАН
И.Н. Торгун, д-р техн. наук, проф.,
действ. член (акад.) РАН
С.Ю. Улыбышев, д-р техн. наук
А.А. Фасоля, д-р пед. наук, канд. техн. наук, проф.
(*секретарь редсовета*)

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 04.12.2023 г.

Формат 60×90/8 Усл. печ. л. 19,25
Бумага мелованная Тираж 150 экз.
Печать цифровая Заказ № 313

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

СОДЕРЖАНИЕ

От редакции

Интеллект машины с прицелом на безопасность человека 3

Машинное обучение

Порождающие модели как средство искусственной аугментации
тренировочного набора гидроакустических данных 4
И.А. Смирнов, Н.В. Судаков

Контроль состояния литий-ионных источников тока
после длительного хранения 14
А.Г. Попов, Н.А. Мозговой, С.А. Ульянов

Наностройства и микросистемы

Оптимизация параметров шунтирующих структур анизотропных
магниторезистивных датчиков 22
*А.С. Котельников, А.А. Баранов, А.Б. Грабов, Д.Ю. Обижаев,
С.А. Жукова, С.А. Ульянов*

Информационная безопасность

Несанкционированный доступ к промышленной инфраструктуре:
инциденты и решения 32
И.В. Егоров, П.А. Щавелев

Технологии двойного назначения

Ударно-волновая резка: безопасные спасательные работы под водой 44
С.И. Дорошенко, А.С. Иванов, В.А. Малых, П.А. Романенков, А.В. Скрипка, В.В. Яхеев

Радиолокация и радионавигация

Оценка скорости сопровождения низкоорбитальных космических
аппаратов наземными антеннами 62
Е.П. Колесников, М.Н. Кутин, И.В. Червяков

Техносферная устойчивость

Защитные системы детонационной автоматики в токамаках 82
*М.В. Манзук, Д.И. Алексеев, А.М. Кудрявцева, Ю.Н. Латманнизова,
В.В. Харченко, С.И. Кривошеев, С.Г. Магазинов, С.М. Микляев*

Оценка ожидаемых показателей детектирования
 α -, β -радионуклидов в водной среде 96
С.П. Никитаев, С.А. Чернов, М.Б. Казакова

Методы и средства защиты

Инженерно-аналитическое моделирование систем
безопасного хранения взрывчатых материалов 116
В.А. Залозный, Я.И. Запорожченко

Приборы контроля

Внедрение установок нейтронного анализа для усиления системы
транспортной безопасности 130
Н.Ю. Илькухин, С.М. Яковлев, Д.В. Бармашова, А.С. Козлов

Образование

Подготовка кадров высшей квалификации
в аспирантуре ФГУП «ЦНИИХМ» 138
С.В. Пахоменкова

История

У истоков климатического оружия 148
А.Х. Аджиев



ISSN:
2949-4575

PERSPECTIVES ON TECHNOLOGY FOR SECURITY SYSTEMS

№ 2 (02)

OCTOBER–DECEMBER

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 (Academician) of RARAN

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 (Acad.) 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 (Acad.) of RARAN
S.M. Muzhichuk, Grand PhD in Engineering, Prof.
S.P. Nikitaev, Grand PhD in Engineering, Prof.
I.B. Petrov, Grand PhD of Physics and Mathematics,
Corresponding Member, RAN
A.V. Rodin, Grand PhD of Physics and Mathematics
V.V. Sazonov, Grand PhD of Physics and Mathematics,
Assoc. Prof.
M.V. Sakharov, Grand PhD in Engineering, Prof.
S.S. Simakov, Grand PhD of Physics and Mathematics,
Assoc. Prof.
S.V. Sokolov, Grand PhD of Physics and Mathematics
N.N. Sysoev, Grand PhD of Physics and Mathematics, Prof.,
Member (Acad.) of RARAN
I.N. Torgun, Grand PhD in Engineering,
Member (Acad.) 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:

ПИ № ФЦ77-83949 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 04.12.2023 r.

Format 60×90/8
Paper coated
Digital printing

Conditional printed sheets 19,25
Circulation of 150 copies
Order № 313

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

CONTENT

From edition

Machine intelligence with an eye to human safety 3

Machine learning

Generative models as a means of artificial augmentation
of the training set of hydroacoustic data 4

I.A. Smirnov, N.V. Sudakov

Monitoring the condition of lithium-ion current sources
after long-term storage 14

A.G. Popov, N.A. Mozgovoy, S.A. Ulyanov

Nanodevices and microsystems

The shunting structure parameters optimization for anisotropic
magnetoresistive sensors 22

*A.S. Kotel'nikov, A.A. Baranov, A.B. Grabov, D.YU. Obizhaev,
S.A. Zhukova, S.A. Ylyanov*

Information security

Information security incidents in industry: challenges and solutions 32

I.V. Egorov, P.A. Shchavelev

Dual-use technologies

Shock wave cutting: safe underwater rescue operations 44

*S.I. Doroshenko, A.S. Ivanov, V.A. Malykh, P.A. Romanenkov,
A.V. Skripka, V.V. Yaheev*

Radar and radio navigation

Estimation of the speed of tracking low-orbit spacecraft
by ground-based antennas 62

E.P. Kolesnikov, M.N. Kupin, I.V. Chervyakov

Technosphere stability

Protective systems of detonation automation in tokamaks 82

*M.V. Manzuk, D.I. Alekseev, A.M. Kudriavtseva, Y.N. Latmanizova, V.V. Kharchenko,
S.I. Krivosheev, S.G. Magazinov, S.M. Miklyaev*

Estimation of expected indicators of detection
of α -, β -radionuclides in the aquatic environment 96

S.P. Nikitaev, S.A. Chernov, M.B. Kazakova

Methods and means of protection

Engineering and analytical modeling of systems for the safe storage
of explosive materials 116

V.A. Zaloznyy, YA.I. Zaporozhchenko

Monitoring devices

Introduction of neutron analysis units to strengthen
the transport security system 130

N.Yu. Ilkukhin, C.M. Yakovlev, D.V. Barmashova, A.S. Kozlov

Education

Training of highly qualified personnel in the postgraduate course
of FSUE «CRICM» 138

S.V. Pakhomenkova

History

At the origins of climate weapons 148

A.Kh. Adzhiev

ИНТЕЛЛЕКТ МАШИНЫ С ПРИЦЕЛОМ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ЧЕЛОВЕКА

Прежде чем представить основные темы очередного выпуска журнала «Перспективные технологии для систем безопасности» (ПТСБ), хотелось бы вспомнить одну интересную мысль. Однажды профессор Вашингтонского университета, ведущий эксперт по машинному обучению Педро Домингос заметил, что пока люди беспокоятся о том, как бы компьютеры, став «умными», не захватили мир, машины, будучи «глупыми», уже это сделали.

Действительно, сегодня нет ни одной сферы деятельности, в которой тем или иным способом не использовали бы искусственный интеллект (ИИ). Обучение машин стало повседневной практикой как в научных, так и практических целях. Неслучайно, свежий номер ПТСБ открывает статья «Порождающие модели как средство искусственной аугментации тренировочного набора гидроакустических данных». В ней наши авторы рассматривают новый подход к реализации алгоритма машинного зрения, позволяющего выделять объекты на гидролокационных изображениях, а также распознавать заданный тип объекта на основе сверточной нейронной сети.

Однако, каким бы ни был продвинутым ИИ, угрожать человечеству он едва ли способен (во всяком случае пока), тогда как люди, вооруженные современными компьютерными технологиями, часто становятся источником опасности. Вездесущие кибермошенники наносят весьма ощутимый ущерб не только отдельным людям, но и целым предприятиям и даже государствам. Как бороться с информационными угрозами рассказывается в статье «Несанкционированный доступ к промышленной инфраструктуре: инциденты и решения». В ней представлена статистика сетевых взломов за последние пять лет, а также предложены различные решения для защиты производственных систем от кибератак.

Пресловутый человеческий фактор распространяется не только на информационную среду, но в первую очередь на окружающее нас пространство. Загрязнение природы продуктами жизнедеятельности сегодня – проблема номер один во всем мире. Многие ученые умы сосредоточены на том, как обезопасить воздух. Между тем человек на 70...80% состоит из воды, а ее чистота оставляет желать лучшего – в прямом и переносном смысле.

Наиболее серьезным является радиационное загрязнение питьевых источников. Потребность в разработке методов и устройств, предназначенных для эффективного контроля за потребляемой жидкостью, ее проверки на содержание излучающих частиц, по-прежнему остается актуальной. Об этом – в теоретическом исследовании «Оценка ожидаемых показателей детектирования α , β -радионуклидов в водной среде».

Тема техносферной безопасности отражена в статье о защитных системах детонационной автоматики в современных токамаках. О средствах и методах сохранения жизни и здоровья людей рассказывается в материалах, раскрывающих технологию безопасного размещения взрывчатых веществ на производстве, описывающих внедрение установок нейтронного анализа на транспорте, применение ударно-волновой резки при спасательных работах под водой и т.д.

Словом, мы собрали в новом выпуске журнала научно-практические статьи, тематика которых наверняка заинтересует научное сообщество и всех, кто увлечен изучением передовых технологий в сфере безопасности.

УДК 629.58

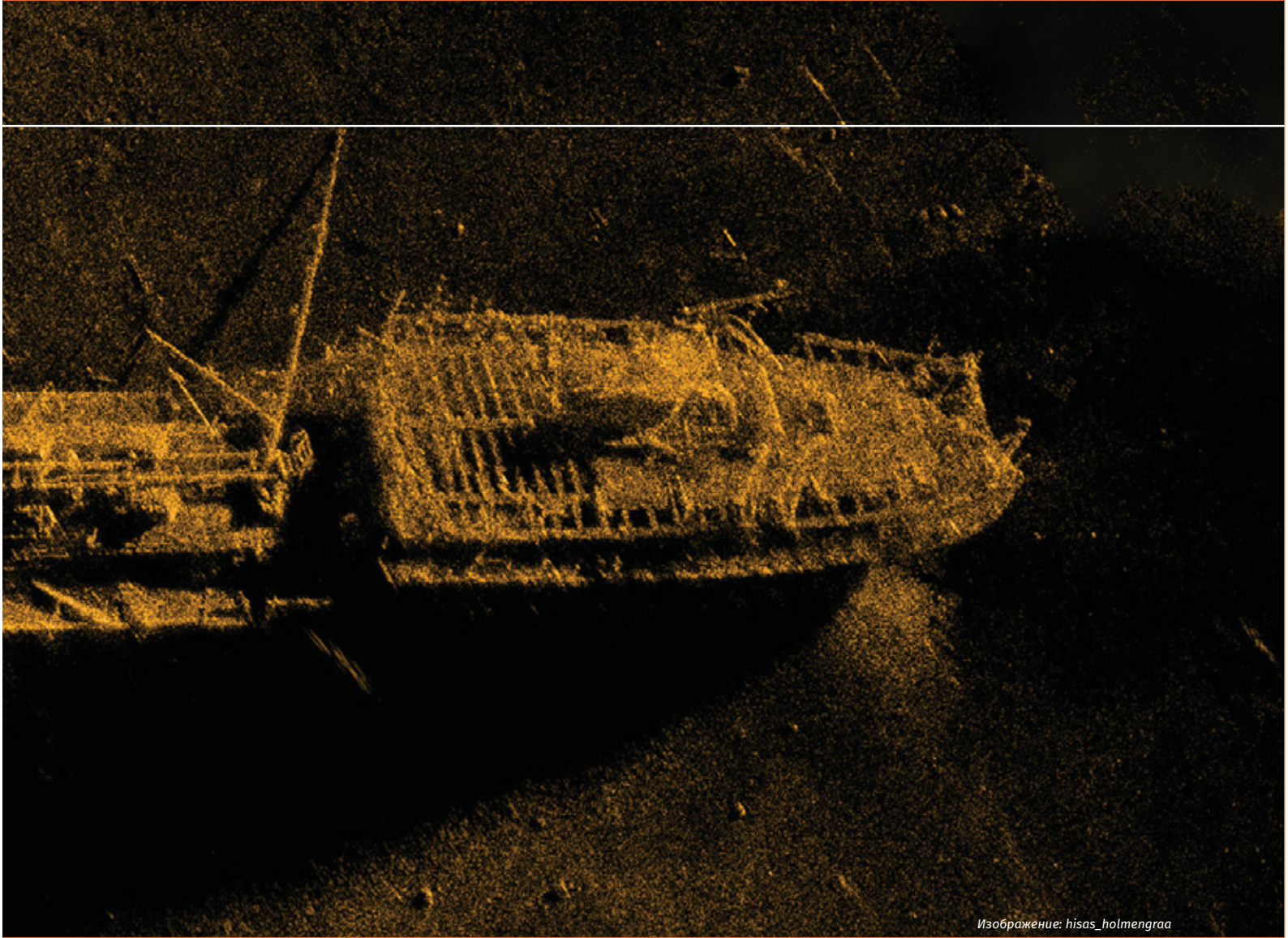
ПОРОЖДАЮЩИЕ МОДЕЛИ КАК СРЕДСТВО ИСКУССТВЕННОЙ АУГМЕНТАЦИИ ТРЕНИРОВОЧНОГО НАБОРА ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

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

Аннотация. Рассмотрено применение порождающих моделей для искусственного увеличения объема набора гидроакустических данных. Представлены основные способы их формирования и приумножения с помощью генеративно-состязательной нейронной сети. Описаны принципы и схема работы фреймворка машинного обучения GAN, приведен алгоритм работы дискриминатора и генератора, получен набор синтезированных данных гидролокатора бокового обзора.

Ключевые слова: ПОРОЖДАЮЩИЕ МОДЕЛИ; ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ; ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ; ДИСКРИМИНАТОР; ГЕНЕРАТОР; ОБУЧАЮЩАЯ ВЫБОРКА.

Для цитирования: Смирнов И.А., Судаков Н.В. Порождающие модели как средство искусственной аугментации тренировочного набора гидроакустических данных // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 2. С. 4–12.



Изображение: hisas_holmengraa

GENERATIVE MODELS AS A MEANS OF ARTIFICIAL AUGMENTATION OF THE TRAINING SET OF HYDROACOUSTIC DATA

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

Abstract. *The application of generating models for artificial increase of the volume of a set of hydroacoustic data is considered. The main ways of their formation and multiplication using a generative-adversarial neural network are presented. The principles and scheme of the GAN machine learning framework are described, the algorithm of the discriminator and generator is given, a set of synthesized side-view sonar data is obtained.*

Keywords: GENERATING MODELS; GENERATIVE ADVERSARIAL NEURAL NETWORK; HYDROACOUSTIC DATA; DISCRIMINATOR; GENERATOR; TRAINING SAMPLE.

For citation: Smirnov I.A., Sudakov N.V. Generative models as a means of artificial augmentation of the training set of hydroacoustic data. *Perspektivnye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti* [Promising technologies for security systems], 2023, N 2, pp. 4–12 (In Russ.).

Введение

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) являются наиболее перспективными робототехническими средствами для выполнения научно-исследовательских задач в широком диапазоне, а именно:

- обследование и мониторинг акваторий, поиск затонувших объектов;

- получение гидрофизических, геологических, экологических данных для исследования шельфовых зон;

- получение данных о рельефе дна, состоянии грунтов;

- осмотр подводных линий связи, трубопроводов, кабелей;

- диагностика технического состояния объектов подводной инфраструктуры.

Качество и успешность выполнения перечисленных автономных миссий определяется точностью навигации АНПА в водном пространстве с учетом быстроменяющейся обстановки, наличия оперативных и тактических ограничений, отсутствия априорной информации о фоноцелевом окружении и возможности получения корректирующих данных в режиме реального времени.

Информационное взаимодействие АНПА с внешней средой осуществляется с использованием гидроакустических средств, таких как гидролокаторы [1]. Большинство современных АНПА имеют на борту гидролокаторы бокового (ГБО) и переднего обзоров (ГПО) как средства визуализации подводной обстановки. Данные, получаемые с акустических устройств, представляют собой изображения рельефа дна/окружения с расположенными на нем объектами или препятствиями (рис. 1).

Для ряда навигационных задач необходимо распознавать образы на изображениях в автоматическом режиме. Это возможно с использованием машинного

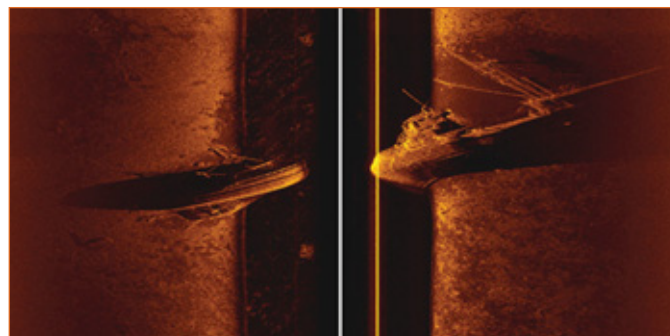


Рис. 1. Изображение, полученное гидролокатором бокового обзора

зрения – области машинного обучения, выполняющей функции поиска и классификации типов или групп объектов на фото- или видеоряде.

Подход к реализации алгоритма машинного зрения, позволяющего выделять объекты на гидролокационных изображениях, а также распознавать заданный тип объекта на основе сверточной нейронной сети с переносом обучения, представлен в работе [2].

Однако следует отметить, что качество и точность классификации объектов, получаемых на выходе нейронной сети, напрямую зависят от обучающего набора данных. Для тренировки нейронной сети необходим большой объем разнородных гидроакустических данных, отражающих как различные гидрологические и геодезические условия в акваториях работы АНПА, так и совокупность признаков искомого объекта (размеры, ориентация, совместное и/или сепаратное расположение). При отсутствии необходимого объема обучающей выборки существуют алгоритмы его искусственного увеличения или аугментации [3].

Исходные изображения в рамках аугментации могут зеркально отражаться, искажаться, поворачиваться, на них может добавляться шум и меняться тон. Такой способ позволит незначительно

увеличить выборку. Актуальным направлением в части решения задачи искусственного дополнения выборки большим количеством аналогичных данных, созданных из уже имеющихся, являются порождающие модели.

Целью работы является искусственное увеличение объема (аугментации) обучающего набора гидроакустических данных с применением порождающих моделей.

**Решение задачи
искусственной аугментации
гидроакустических данных**

На сегодняшний день широкое распространение получили региональные глубокие сверточные нейронные сети, ориентированные на решение задачи поиска объектов и их одновременную классификацию [4]. Однако прямое использование таких методов порождения новых объектов не приведет к желаемым результатам: на хорошо обученном классификаторе с извлечением последних полносвязных слоев и поиском входов, которые вносят наибольший вклад в активацию нейрона, возможно создать генератор рукописных цифр (по аналогии с набором MNIST), однако для генерирования более сложных изображений (в том числе получаемых с гидролокаторов) это не представляется возможным.

Необходимо выделить два типа моделей: дискриминативные (разделяющие) и генеративные (порождающие).

Дискриминативные модели обучают функцию, которая отображает вход x в некоторую метку класса y . В вероятностных терминах это значит, что они обучают условное распределение:

$$p(y|x) = \frac{p(x,y)}{p(x)},$$

где $p(x,y) = p(x)p(y)$; $p(x) = dF/dx$ – плотность распределения.

Генеративные (порождающие) модели обучают совместное распределение данных $p(x,y)$. Это можно использовать для того, чтобы получить $p(y|x)$:

$$p(y|x) = \frac{p(x,y)}{p(x)} \propto p(x,y).$$

Но совместное распределение дает больше информации, его можно использовать, например, для порождения новых данных.

Важное различие состоит в том, что дискриминативные модели решают только задачи обучения с учителем, а порождающие модели могут пытаться делать это и без него, когда меток нет, и необходимо смоделировать распределение данных $p(x)$. Именно поэтому во многих практических задачах часто применяются именно порождающие модели [5].

Основная цель порождающей модели состоит в максимизации функции правдоподобия: для набора данных $D = \{x_i\}_{i=1}^N$

максимизировать $\prod_{i=1}^N p(x_i; \theta)$ по параметрам модели, то есть осуществлять поиск:

$$\theta^* = \arg \max_{\theta} \sum_{i=1}^N \log p(x_i; \theta).$$

С другой стороны, максимизация правдоподобия эквивалентна минимизации расстояния Кульбака–Лейблера между распределением p , которое получается из нашей модели, и распределением \hat{p}_{data} – эмпирическим распределением данных. Последнее сосредоточено в точках из на-

бора данных и равномерно распределено по ним следующим образом:

$$\begin{aligned}
 KL(\hat{P}_{data}(x), p(x; \theta)) &= \\
 &= \int \hat{P}_{data}(x) \log p(x; \theta) dx = \\
 &= \sum_{i=1}^N \hat{P}_{data}(x_i) \log p(x_i; \theta),
 \end{aligned}$$

где KL – относительная энтропия, или расстояния Кульбака–Лейблера, разница между истинным (P) и приближенным (Q) вероятностными распределениями. В общем виде:

$$PL(P || Q) = \int \log \frac{dP}{dQ} dP.$$

Подход к созданию сложного распределения $p(x; \theta)$ состоит в реализации простого распределения $p(z)$ и применении к нему сложного преобразования, которое будет содержать в себе всю сложность требующихся многообразий. Обычно в качестве $p(z)$ можно взять обычное нор-

мальное распределение. Задача состоит в обучении биективной функции $f: X \rightarrow Z$ таким образом, чтобы распределение данных на X превращалось в простое распределение на Z . Тогда, чтобы сгенерировать новую точку из распределения, похожего на p_{data} , достаточно будет породить точку из гауссиана, а затем применить обратную функцию $f^{-1}: Z \rightarrow X$. Обучить такую функцию можно максимизируя правдоподобие с помощью формулы замены переменных [6]:

$$p_x(x) = p_z(f(x)) \left| \det \left(\frac{\partial f(x)}{\partial x} \right) \right|^{-1},$$

где $\partial f(x)/\partial x$ – матрица частных производных (якобиан) функции.

Основной критерий, по которому различаются все порождающие модели, состоит в том – представляют ли они плотность $p(x, y)$ в явном виде; иначе говоря, есть ли возможность определить $p(x, y)$ как функцию от x и y или модель – это «чер-

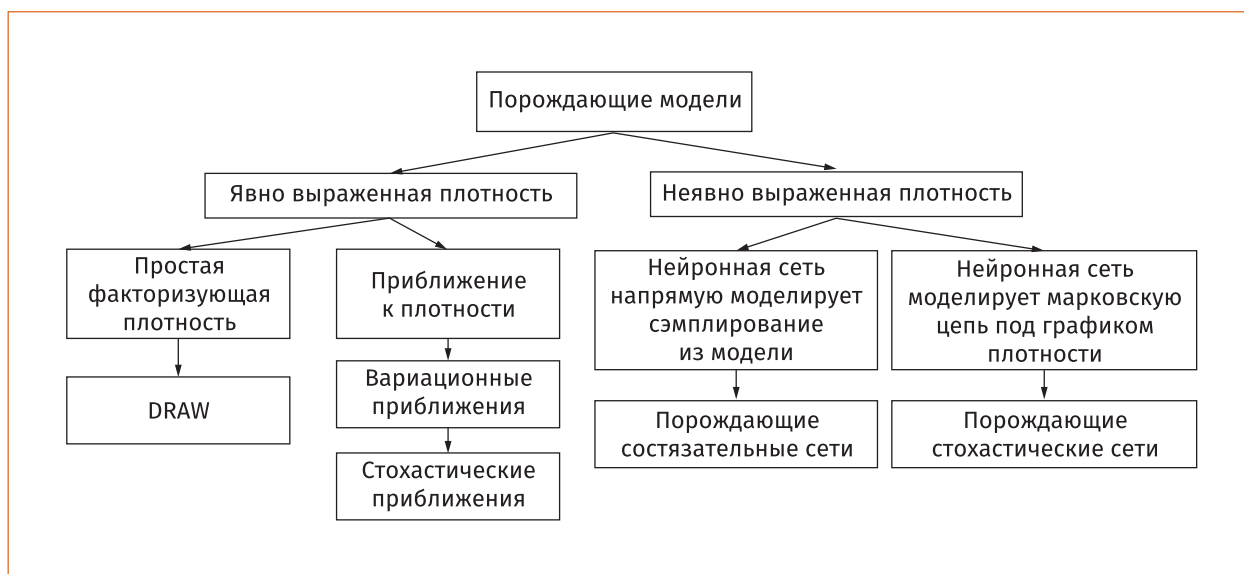


Рис. 2. Классификация порождающих моделей

ный ящик», который может генерировать новые примеры x, y , но определить плотность не представляется возможным. Классификация порождающих моделей представлена на рис. 2.

Каждый из подходов имеет свои достоинства и недостатки. В частности, вариационные автокодеры (VAE) позволяют не только осуществить обучение, но и эффективно выполнить байесовский вывод в сложных вероятностных графических моделях со скрытыми переменными, однако результат, предложенный этими моделями, оказывается размытым. Наибольшую четкость изображений удается получить с помощью генеративно-состязательных (порождающих состязательных, GAN) сетей.

Генеративно-состязательная сеть состоит из двух искусственных нейронных сетей: генератора, который порождает объекты в пространстве данных, и дискриминатора, который учится отличать порожденные генератором объекты от настоящих примеров из выборки. Таким образом, модель GAN состоит из двух частей с противоположными задачами:

доказать, что генератор подал «искусственное» изображение, научившись надежно отличать порожденные генератором примеры от настоящих; иначе говоря, дискриминатор решает самую обычную задачу бинарной классификации: по заданному примеру, выглядящему как элемент пространства данных, решить, был ли он «настоящим» или был порожден генератором (**цель дискриминатора (D)**);

«обмануть» дискриминатор, т.е. уменьшить разность между распределением данных p_{data} и p_{gen} , которое порождает генератор (**цель генератора (G)**).

Формально генератор записывается следующим образом:

$$G = G(z; \theta_g) : Z \rightarrow X,$$

где Z – пространство скрытых (латентных) факторов, на котором задано априорное распределение $p_z(z)$.

Дискриминатор записывается как:

$$D = D(x; \theta_d) : X \rightarrow [0, 1].$$

Дискриминатор отображает объекты из пространства данных в отрезок $[0, 1]$, который интерпретируется как вероятность того, что пример был действительно «настоящий», из p_{data} , а не сгенерированный из p_{gen} . Задача дискриминатора состоит в том, чтобы на обучающей выборке выдавать максимальный результат, а на порожденных генератором примерах – минимальный.

Целевая функция для дискриминатора – ожидаемый ответ на примерах из p_{data} – максимальный, на примерах из p_{gen} – минимальный:

$$E_{x \sim p_{data}}(x)[\log D(x)] + E_{x \sim p_{gen}}(x)[\log(1 - D(x))],$$

где $p_{gen}(x)$ – порождаемое генератором распределение $p_{gen}(x) = G_{z \sim p_z}(z)$.

С другой стороны, генератор должен научиться «обходить» дискриминатор, то есть минимизировать по p_{gen} величину:

$$E_{x \sim p_{gen}}(x)[1 - \log D(x)] + E_{z \sim p_z}(z)[\log(1 - D(G(z)))].$$

Объединяя две функции в одну, получаем решение алгоритма минимакс:

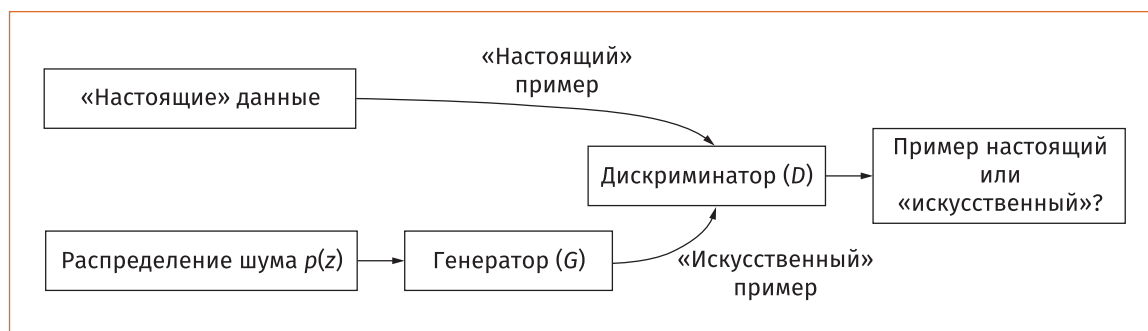


Рис. 3. Алгоритм работы порождающей состязательной сети

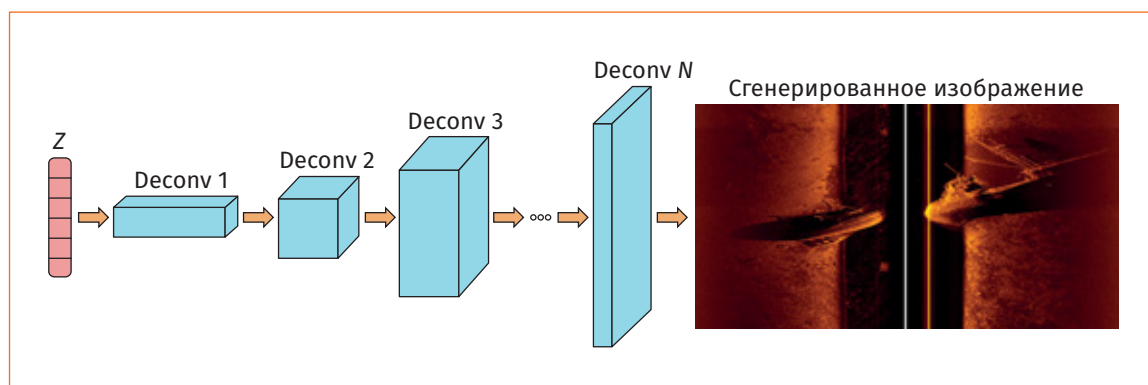


Рис. 4. Деконволюционная архитектура модели генератора изображений

$$\min_G \max_D V(D, G);$$

$$V(D, G) = E_{x \sim p_{data}(x)} [\log D(x)] + E_{z \sim p_z(z)} [\log(1 - D(G(z)))].$$

Схематически алгоритм работы представлен на рис. 3.

В качестве архитектуры для классификации изображений многослойная сверточная сеть является эталонным выбором из-за локального характера структуры изображения (близкие пиксели коррелируют, далекие – нет) [7].

В работе [8] была представлена архитектура dcGAN (глубокая сверточная генеративно-состязательная сеть), где в качестве генератора авторы предложили применять многослойную деконволюционную («разверточную») сеть (рис. 4).

Для генерации изображений использовалась модель dcGAN в виде ее открытой реализации в библиотеке tensorflow. Согласно работе [7], для более стабильной сходимости процесса обучения сети необходимо использовать:

- конволюционные (сверточные) и деконволюционные (разверточные) слои с пропусками вместо операций пулинга;
- батч-нормализацию как в дискриминаторе, так и в генераторе;
- в качестве нелинейной функции активации после сверточного слоя в модели генератора функцию ReLU на всех слоях, кроме выходного [7], а также гиперболический тангенс на выходе.

Примеры реальных и искусственных изображений гидролокатора бокового обзора представлены на рис. 5 и 6, соответственно.



Рис. 5. Реальные изображения с гидролокатора бокового обзора

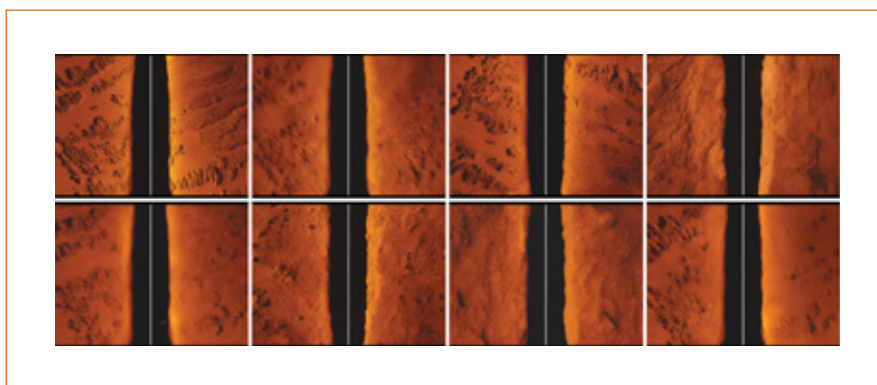


Рис. 6. Сгенерированные изображения

Результаты визуального сравнения реальных и сгенерированных изображений, представленных на рис. 5 и 6, позволяют утверждать, что синтетические изображения выглядят достаточно реалистично, разнообразно и многие из них визуально неотличимы от реальных. Для оценки степени правдоподобия синтезированных изображений, а также подтверждения субъективного предположения о реалистичности сгенерированных данных, в перспективе планируется редуцировать пространство LBP-признаков (Local Binary Patterns – дескрипторов изображения) в эквивалентное двухмерное представление с помощью метода t-SNE (позволит оценить близость расположения реальных и синтезированных изображений, а также наличие стохастического рассеяния).

Выводы

В статье рассмотрены перспективные направления работ АНПА и выявлены пути их реализации. Предложен метод решения задачи искусственной аугментации гидроакустических данных, получаемых с гидролокатора бокового обзора, с использованием порождающих состязательных сетей. Реализован и протестирован алгоритм генеративно-состязательной нейронной сети, позволяющий синтезировать большой объем разнородных уникальных гидроакустических данных, которые впоследствии могут быть использованы как обучающий набор для широкого спектра классификаторов.

Полученные результаты тестирования сгенерированных изображений свидетельствуют о высокой достоверности и реалистичности данных.

Список литературы

1. Group Navigation and Control for Marine Autonomous Robotic Complex Based on Hydroacoustic Communication / A. Scherbatyuk [et. al.] // Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016. P. 1388–1393.
2. Метод автоматической классификации подводных потенциально опасных объектов / В.В. Артюхин [и др.] // Технологии гражданской безопасности. 2019. Т. 16, № 1(59).
3. *Forsyth D.A.* Computer Vision: A Modern Approach, 2nd Edition / David A. Forsyth, Jean Ponce – 2nd Edition – Pearson, 2011. 792 p.
4. *Girshick R., Darrell J., Malik T.* Region-Based Convolutional Networks for Accurate Object Detection and Segmentation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2015. N 38.
5. *Goodfellow I.J.* NIPS 2016 Tutorial: Generative Adversarial Networks // arXiv.org. 2017. URL: <http://arxiv.org/abs/1701.00160> (accessed: 02.06.2023).
6. *Николенко С., Кадурин А., Архангельская Е.* Глубокое обучение. СПб.: Питер, 2018. 480 с.
7. *LeCun Y.* Gradient-based learning applied to document recognition // Proc. of the IEEE. 1998. Vol. 86(11). P. 2278–2324.
8. *Radford A., Metz L., Chintala S.* Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks // arXiv.org. 2016. URL: <https://arxiv.org/pdf/1511.06434> (accessed: 10.06.2023).

References

1. Group Navigation and Control for Marine Autonomous Robotic Complex Based on Hydroacoustic Communication / A. Scherbatyuk [et. al.] // Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016. P. 1388–1393.
2. The method of automatic classification of underwater potentially hazardous objects. V.V. Artiukhin and etc. *Tekhnologii grazhdanskoi bezopasnosti* [Civil Security Technologies]. 2019, Vol.16, N 1 (59). (In Russ.).
3. *Forsyth D.A.* Computer Vision: A Modern Approach, 2nd Edition / David A. Forsyth, Jean Ponce – 2nd Edition – Pearson, 2011. 792 p.
4. *Girshick R., Darrell J., Malik T.* Region-Based Convolutional Networks for Accurate Object Detection and Segmentation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2015, N 38.
5. *Goodfellow I.J.* NIPS 2016 Tutorial: Generative Adversarial Networks // arXiv.org. 2017. URL: <http://arxiv.org/abs/1701.00160> (accessed: 02.06.2023).
6. *Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangel'skaia E.* *Glubokoe obuchenie* [Deep Learning], St. Petersburg, Peter Publ., 2018, 480 p. (In Russ.).
7. *LeCun Y.* Gradient-based learning applied to document recognition // Proc. of the IEEE. 1998. Vol. 86(11). P. 2278–2324.
8. *Radford A., Metz L., Chintala S.* Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks // arXiv.org. 2016. URL: <https://arxiv.org/pdf/1511.06434> (accessed: 10.06.2023).

Поступила в редакцию: 22.05.2023

Одобрена рецензентами: 25.06.2023

Принята к печати: 04.12.2023

Об авторах

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

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

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

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

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

РОССИЯ СОЗДАЕТ КОМПЬЮТЕР, ИМИТИРУЮЩИЙ РАБОТУ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО МОЗГА

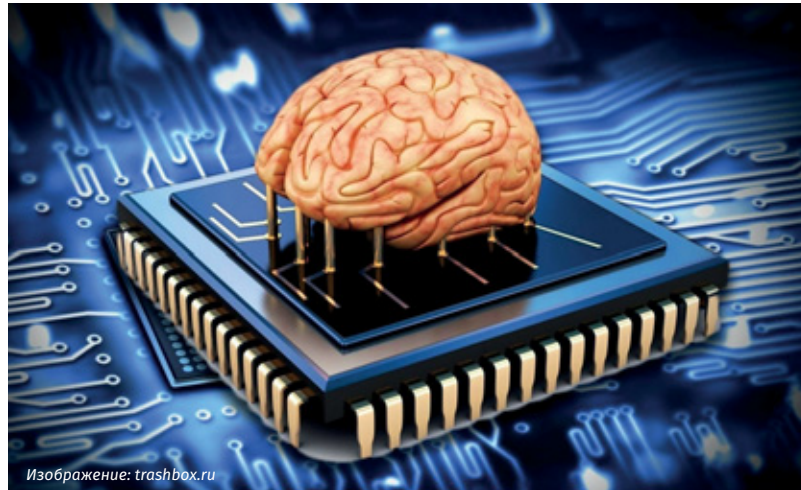
Специалисты Национального исследовательского центра (НИЦ) «Курчатовский институт» работают над созданием нейроморфного компьютера. Подобные аппараты, имитирующие работу человеческого мозга, в будущем могут произвести технологическую революцию.

Устройство нейроморфного компьютера основано на принципах действия человеческого мозга. Он моделирует работу нейронов и их ответвлений, которые отвечают за передачу и восприятие информации. Связи между нейронами образуются за счет синапсов – специальных контактов, по которым транслируются электрические сигналы.

Одна из задач нейроморфных устройств – ускорить обучение сверточных нейронных сетей для распознавания изображений. Ожидается, что нейроморфные чипы найдут применение в робототехнике, медицине, мобильных устройствах, IoT-гаджетах, а также дата-центрах.

Первые попытки создать искусственные нейроны предпринимались еще в 1960-х гг. прошлого века Тэдом Хоффом и профессором из Стэнфорда Бернардом Уидроу. Они создали одноуровневую нейросеть на основе мемисторов – электрохимических резисторов с функцией памяти. В настоящее время над созданием нейрочипов работают в IBM, Intel и некоторые другие ИТ-компании и университеты. Кстати, инженеры из Манчестерского вуза не так давно представили архитектуру SpiNNaker, способную эмулировать работу ста миллионов нейронов. Потребляет такая установка 100 кВт. На сегодняшний день машина используется для симуляции процессов, происходящих в мышином мозге.

Отечественные специалисты могут превзойти своих зарубежных коллег, поскольку в России уже разработаны собственные нейроморфные процессоры. Первой отечественной моделью стал «Алтай» – результат совместной работы «Лаборатории Касперского» и компании «Мотив нейроморфные технологии». Отечественная разработка способна обрабатывать 67 млрд действий в секунду или до 2200 кадров в секунду при использовании для обработки изображений. Тестирование показало, что нейроморфный процессор «Алтай» потребляет почти в тысячу раз меньше энергии, чем широко применяемые сегодня традиционные графические ускорители (GPU). На сегодняшний день это один из самых энергоэффективных процессоров в мире.



Изображение: trashbox.ru

Источники: ria.ru, habr.com, trashbox.ru

УДК 53.09

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ЛИТИЙ-ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ

MONITORING THE CONDITION OF LITHIUM-ION CURRENT SOURCES AFTER LONG-TERM STORAGE

А.Г. ПОПОВ,
ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»

Н.А. МОЗГОВОЙ, к.т.н., С.А. УЛЬЯНОВ,
ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики»

Аннотация. Предлагается новый алгоритм решения задачи экспресс-диагностики и классификации источников тока для сборки в аккумуляторные батареи с использованием методов машинного обучения. Для его валидации проведены измерения комплексного сопротивления коммерческих литий-ионных аккумуляторов. Особое внимание уделяется влиянию длительного хранения на элементы питания и воздействию на них метода спектроскопии электрохимического импеданса.

Ключевые слова: ЛИТИЙ-ИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА; КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ИСТОЧНИКОВ ТОКА; СОРТИРОВКА; КЛАСТЕРИЗАЦИЯ; МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ.

Для цитирования: Попов А.Г., Мозговой Н.А., Ульянов С.А. Контроль состояния литий-ионных источников тока после длительного хранения // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 2. С. 14–21.

A.G. POPOV,

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)

N.A. MOZGOVOY, PhD in Engineering, S.A. ULYANOV,

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

Abstract. A new algorithm for solving the problem of express diagnostics and classification of current sources for assembly into batteries using machine learning methods is proposed. To validate it, measurements of the complex resistance of commercial lithium-ion batteries were carried out. Special attention is paid to the effect of long-term storage on batteries and the effect of electrochemical impedance spectroscopy on them.

Keywords: LITHIUM-ION POWER SOURCES; CONTROL OF POWER SOURCES; BATTERY SORTING; CLUSTERING; MACHINE LEARNING.

For citation: Popov A.G., Mozgovoy N.A., Ulyanov S.A. Monitoring the condition of lithium-ion current sources after long-term storage. *Perspektivnyye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti* [Promising technologies for security systems], 2023, N 2, pp. 14–21 (In Russ.).

Изображение: фотобанк ЛОРИ

Введение

Современные перезаряжаемые химические источники тока (ХИТ) на основе лития отличаются высокой плотностью энергии, длительным сроком службы и надежностью. Для достижения требуемых характеристик по емкости, мощности и напряжению в конечных устройствах одиночные источники тока собирают в батареи, объединяя аккумуляторы в параллельные и последовательные соединения [1]. С увеличением спроса на литиевые ХИТ этот процесс сборки все чаще проводится массово, на производстве. Пример внешнего вида батареи аккумуляторов и отдельного аккумулятора приведен на рис. 1.

При этом у многих серийных литий-ионных источников питания, собранных из нескольких аккумуляторов, даже при наличии управляющих схем проявляется такая проблема, как разбалансировка.

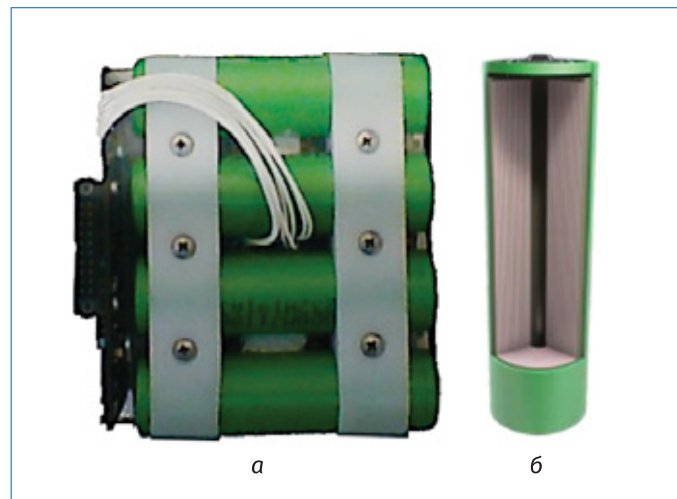


Рис. 1. Литий-ионные аккумуляторы:
а – батарея типа 18650; б – внутреннее устройство отдельного литий-ионного аккумулятора типа 18650

Она приводит к переразряду и недостаточному заряду элементов, ведет к потерям энергии и, впоследствии, отказам оборудования. Поэтому при разработке

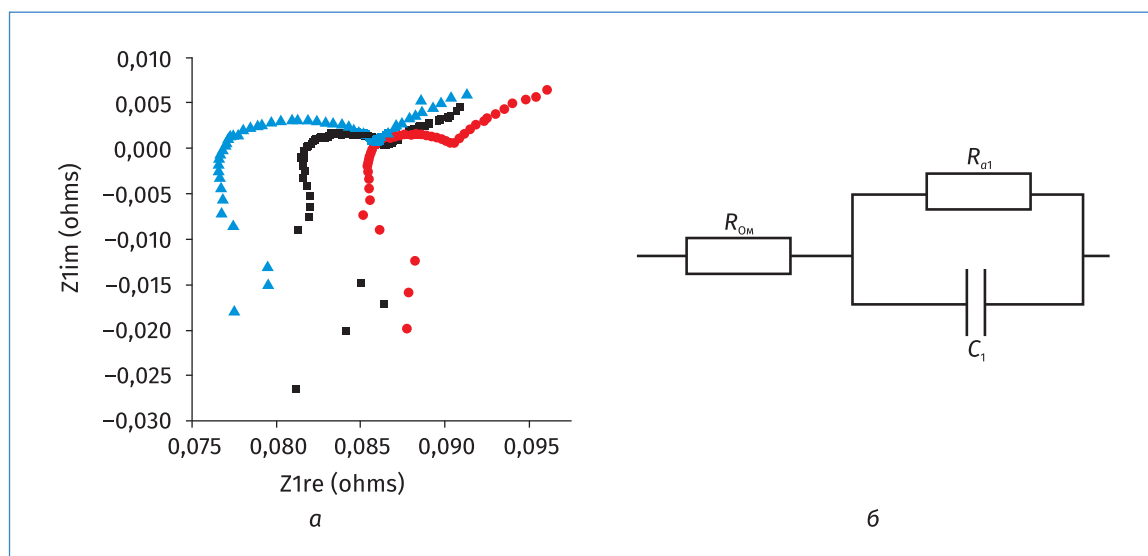


Рис. 2. Разбалансировка и деградация батареи: а – график зависимости мнимой части комплексного сопротивления от действительной для трех заряженных аккумуляторов номинальной емкостью 12 А·ч (черным цветом обозначен импеданс элемента с измеренной максимальной емкостью, равной 61% от номинальной, красным и синим – элементов с максимальными емкостями 67% и 51% от номинальных, соответственно); б – эквивалентная цепь замещения (цепь Рэндлса), используемая для описания комплексного сопротивления источника тока (R_{om} – омическое сопротивление ХИТ, параллельное соединение R_{ol} и C_1 – поляризационное)

батарей питания особое внимание следует уделять задаче подбора аккумуляторов с заданными характеристиками, классификации и группировке имеющихся образцов для повышения качества сборки источников питания [2]. Тем более важен этот этап при разработке батарей непосредственно в месте производства аккумуляторов. Специфика данной задачи заключается в работе с образцами с разбросом характеристик.

Даже при соблюдении заявленных производителем условий хранения и проведении регламентных работ (поддержание требуемого заряда во время хранения) внутренние характеристики источников тока могут значительно отличаться в рамках одной партии, изменяясь на протяжении времени. В хранящемся длительное время источнике тока неизбежно пройдут деградационные процессы и процессы саморазряда, снижающие его емкость [2].

Безопасное использование ХИТ после длительного хранения требует учета возможных изменений в их параметрах.

Как можно увидеть на рис. 2, при разбалансировке и деградации батареи у входящих в ее состав аккумуляторов отличаются не только омические R_{om} , но и поляризационные части внутреннего сопротивления.

Между тем рутинно используемые для оценки зарядового состояния элемента методы экспресс-контроля источников тока не позволяют провести точные измерения этих параметров одновременно, что делает целесообразным применение спектроскопии электрохимического импеданса – метода, позволяющего при помощи измерения отклика элемента на сигнал переменного тока или напряжения получить диагностические данные без изменения зарядового состояния ХИТ [3, 4].

Проведение измерений

Для решения поставленной задачи следует оптимизировать предложенный ранее универсальный метод [5], использующийся в настоящее время для исследования элементов в ходе циклов заряда–разряда, для экспресс-контроля состояния ХИТ после длительного хранения. Данный метод позволяет на основе комплексного сопротивления ХИТ оценить мощность, текущую и максимальную емкость элемента и провести первичную сортировку образцов.

Измерения импеданса и максимальной и текущей емкости элементов для дальнейшей классификации и сортировки проводились для двух типов ХИТ: для литий-полимерных аккумуляторов емкостью 12 А·ч и для литиевых аккумуляторов типа 18650 емкостью 3,5 А·ч (изображены на рис. 1, б).

Исследования импеданса проводились при помощи потенциостата-гальваностата Parstat-4000. Использовался режим измерений по переменному току:

в выбранном диапазоне частот на элемент подавался набор сигналов синусоидального тока с амплитудой не более 3% от номинальной емкости элемента и измерялся отклик его переменного напряжения. Сам исследуемый аккумулятор при этом был помещен в защитный экранированный бокс, установленный на антивибрационной платформе. Исходя из особенностей исследуемых объектов был выбран диапазон частот от 1000 до 0,1 Гц.

Заряд и разряд вместе с определением зарядового состояния и максимальной емкости элементов проводился при помощи специализированного устройства заряда–разряда УЗРИ 18А.

Результаты

Измерения импеданса источников тока, находившихся в режиме длительного хранения, обнаружили значимое изменение формы зависимости внутреннего сопротивления элемента от частоты в отклик на подаваемый сигнал в первые цик-

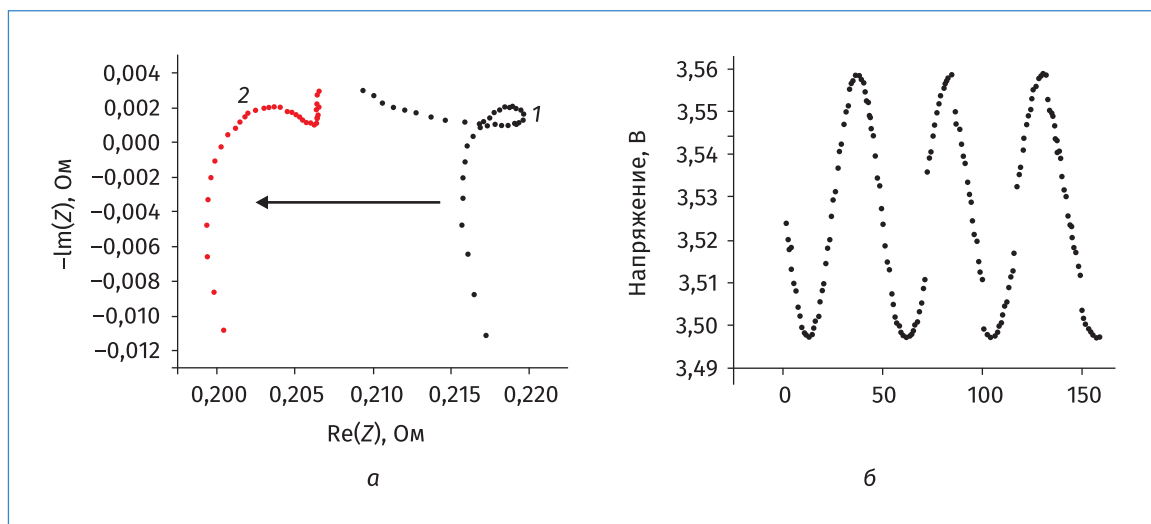


Рис. 3. Проведенные измерения импеданса аккумулятора: а – графики зависимости мнимой части комплексного сопротивления от действительной для аккумулятора номинальной емкостью 3500 мА·ч после длительного хранения для первого (1) и второго измерений (2); б – фрагмент графика напряжения аккумулятора номинальной емкостью 3500 мА·ч во время измерения импеданса при помощи переменного тока 0,1 А

лы измерений. Пример такого изменения в ответ на синусоидальный сигнал тока малой амплитуды приведен на рис. 3.

Это поведение значимо отличается от поведения элементов в ходе эксплуатации и позволяет понять некоторые процессы, стоящие за феноменом «тренировки» – наблюдаемым некоторыми пользователями улучшением характеристик новых литий-ионных аккумуляторов после первых циклов заряд–разряд. Поскольку данное изменение сохраняет среднее значение сопротивления элемента, то в случае измерений в ходе эксплуатации данный эффект был бы скрыт изменением импеданса при разряде–заряде. Учет этого эффекта позволяет предсказать как влияние условий хранения на образец, так и его ожидаемые характеристики во

время эксплуатации, проводя первичное категорирование элементов по числу синусоидальных пакетов волн, необходимых для достижения стабильного комплексного сопротивления элемента.

В таком случае измерения импеданса источника тока должны повторяться, пока разница между его комплексными сопротивлениями в ходе последовательных измерений не станет незначительной. Для формализации этого процесса предложено выбрать такую метрику, как косинусное расстояние L_{\cos} между результатами последовательного измерения импеданса элемента. Косинусное расстояние L_{\cos} как:

$$L_{\cos} = \frac{\sum_{i=1}^N Z'_i \cdot Z''_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N Z'^2_i \cdot \sum_{i=1}^N Z''^2_i}},$$

где Z'_i и Z''_i – комплексное сопротивление элемента во время первого и второго измерений на частоте f_i ; N – число измеряемых точек. Оценка порогового значения L_{\cos}^{crit} в таком случае также производится по формуле при помощи двух предварительно проведенных измерений импеданса аккумулятора выбранного типа в режиме нормальной эксплуатации.

Результаты итоговых измерений внутреннего сопротивления аккумуляторов емкостью 3,5 А·ч приведены на рис. 4. После достижения устойчивого значения измеряемого комплексного сопротивления (рис. 4, б) проводилось категорирование литий-ионных аккумуляторов по трем группам (рис. 4, в). Для решения данной задачи авторы обратились к методам машинного обучения. В среде разработки Matlab нами была реализована автоматическая кластеризация данных с

Измерения импеданса источника тока должны повторяться, пока разница между его комплексными сопротивлениями в ходе последовательных измерений не станет незначительной.

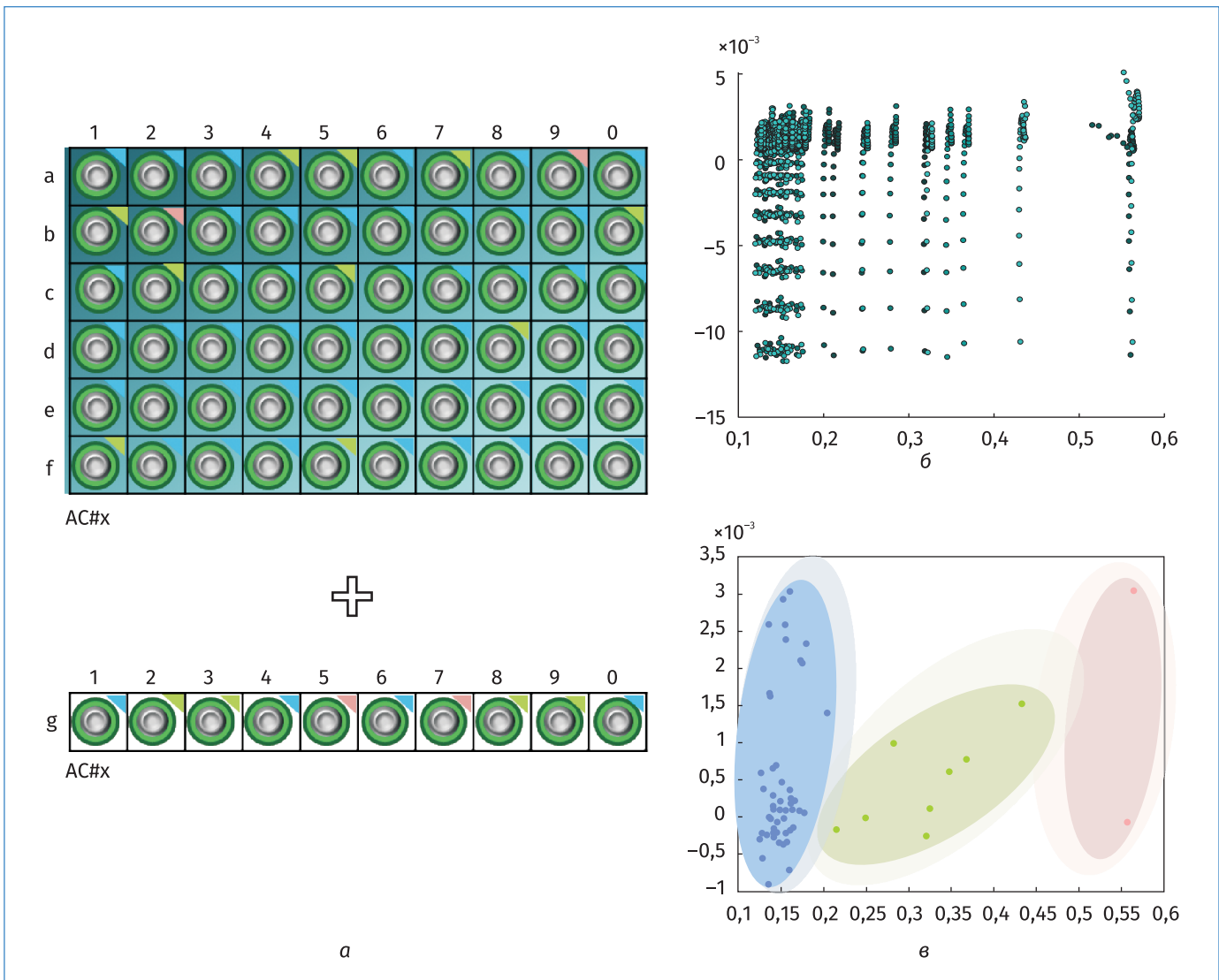


Рис. 4. Исследование импеданса и категорирование литий-ионных аккумуляторов 18650 LG емкостью 3500 мА·ч: а – пронумерованный массив исследованных образцов аккумуляторов; б – графики зависимости мнимой части комплексного сопротивления аккумуляторов от действительной; в – результаты кластеризации данных образцов по фазе и модулю импеданса. Интенсивность цвета фона ячейки [б] связывает номер образца (а) с графиком его импеданса (б), цвет уголка в таблице – с кластером, к которому был отнесен элемент (в) при помощи модели гауссового смешения

возможностью обновления с добавлением новых точек. Из множества существующих методов кластеризации в связи со статистической природой задачи был выбран метод гауссова смешения. Данный алгоритм оценивает для каждой точки вероятность принадлежать к одной из выделяемых групп и в соответствии с этими

значениями разбивает входное множество на заданное число подмножеств.

После накопления данных об импедансе данного типа аккумуляторов и выделения областей в пространстве фаза-модуль для отнесения отдельных элементов к тому или иному кластеру, предложенный метод был проверен на

выбранных из той же партии ХИТ валидационных элементах. В результате удалось успешно отнести каждый элемент из набора из 10 аккумуляторов AC1g, ..., AC0g к одной из трех категорий в зависимости от их попадания в один из выделенных кластеров. В свою очередь, анализ зарядового состояния валидационного набора элементов подтвердил существование корреляции между импедансом, категорией аккумулятора и его емкостью.

Полученный результат позволяет использовать предложенный метод для быстрой сортировки больших партий аккумуляторов, в том числе находившихся на длительном хранении. Измерение импеданса и расчет категории аккумулятора по предложенному алгоритму занимает не более 200 с, что намного меньше времени, затрачиваемого на полный заряд-разряд элемента для точного определения его емкости другими методами. Благодаря сборке батарей из аккумуляторов из одной категории возможно добиться большей долговечности и безопасности.

Выводы

Были получены новые экспериментальные данные по частотной зависи-

мости импеданса литиевых ХИТ емкости 12000 и 3500 мА·ч, измеренные с помощью потенциостата PARSTAT-4000. Были оценены корреляции параметров импеданса с условиями хранения образцов и их внутренними характеристиками. Обнаруженные закономерности позволили многократно снизить время, необходимое для оценки работоспособности выбранных элементов перед их сборкой в батарее и установкой в изделия (по сравнению с проведением анализа с использованием мультиметров и зарядно-разрядных устройств).

Полученные данные позволили создать новый алгоритм подбора аккумуляторов для сборки источников питания, использующий методы кластеризации (на основе гауссовой смеси) и автоматической классификации на основе данных о комплексном сопротивлении элементов. Реализация предложенного алгоритма возможна в составе аппаратно-программного комплекса, предложенного авторами в работе [7]. Кроме того, было оценено влияние спектроскопии электрохимического импеданса на исследуемые объекты после их длительного хранения и предложено объяснение феномену «тренировки» литий-ионных аккумуляторов.

Список литературы

1. State of energy estimation for a series-connected lithium-ion battery pack based on an adaptive weighted strategy / X. Li [et. al.] // *Energy*. 2021. 214, 118858. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118858>.
2. Mohammada A., Chang J-R., Chang T-T. Machine Learning Algorithm for Sorting of Battery Packs at Smart Manufacturing Industries // *Advanced Production and Industrial Engineering*. 2022. doi:10.3233/ATDE220716.
3. Degradation diagnostics for lithium ion cells / C.R. Birkl [et. al.] // *Journal of Power Sources*. 2017. Vol. 341. P. 373–386.
4. Application of electrochemical impedance spectroscopy to commercial Li-ion cells: A review / N. Meddings [et. al.] // *Journal of Power Sources*. 2020. Vol. 480, 228742, ISSN 0378-7753.
5. Modeling and Applications of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) for Lithium-ion Batteries / W. Choi [et. al.] // *Journal of Electrochemical Science and Technology*. 2020. Vol. 11(1). P. 1–13.
6. Спектроскопия электрохимического импеданса литиевых источников тока / А.Г. Попов [и др.] // *Труды МФТИ*. 2022. Т. 14, № 1. С. 78–87.
7. Разработка методов испытаний состояния заряда химических источников тока в контролируемых условиях: тр. 64-й Всерос. науч. конф. МФТИ «Аэрокосмические технологии» / Г.Н. Суцены [и др.]. Москва – Долгопрудный – Жуковский: МФТИ, 2021. 355 с.

References

1. State of energy estimation for a series-connected lithium-ion battery pack based on an adaptive weighted strategy / X. Li [et. al.] // *Energy*, 2021, 214, 118858. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118858>.
2. *Mohammada A., Chang J-R., Chang T.-T.* Machine Learning Algorithm for Sorting of Battery Packs at Smart Manufacturing Industries // *Advanced Production and Industrial Engineering*, 2022, doi:10.3233/ATDE220716.
3. Degradation diagnostics for lithium ion cells / C.R. Birkl [et. al.] // *Journal of Power Sources*, 2017, Vol. 341, pp. 373–386.
4. Application of electrochemical impedance spectroscopy to commercial Li-ion cells: A review / N. Meddings [et. al.] // *Journal of Power Sources*. 2020. Vol. 480, 228742, ISSN 0378-7753.
5. Modeling and Applications of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) for Lithium-ion Batteries / W. Choi [et. al.] // *Journal of Electrochemical Science and Technology*. 2020. Vol. 11(1). P. 1–13.
6. *Spektroskopiia elektrokhimicheskogo impedansa litievykh istochnikov toka* [Spectroscopy of electrochemical impedance of lithium current sources], A.G. Popov [i dr.], *Trudy MFTI*, 2022, Vol. 14, N 1, pp. 78–87. (In Russ.).
7. *Razrabotka metodov ispytaniia sostoiianiia zariada khimicheskikh istochnikov toka v kontroliruemykh usloviiah*» [Development of methods for testing the state of charge of chemical current sources under controlled conditions]: tr. 64-i Vseros. nauch. konf. MFTI. «Aerokosmicheskie tekhnologii», 29 noiabria – 03 dekabria 2021 g., G.N. Sushchenia [i dr.], Moscow–Dolgoprudny–Zhukovsky, MFTI Publ., 2021, 355 p. (In Russ.).

Поступила в редакцию: 20.07.2023

Одобрена рецензентами: 25.07.2023

Принята к печати: 04.12.2023

Об авторах

Александр Григорьевич Попов* – аспирант, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет). Адрес для почтовых отправлений: 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9. E-mail: bieron1997@mail.ru.

Alexander G. Popov* – postgraduate student, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University). Postal address: 9, Institutsky lane, Dolgoprudny, Moscow region 141701. E-mail: bieron1997@mail.ru.

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

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

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

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

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

УДК 538.975

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ШУНТИРУЮЩИХ СТРУКТУР АНИЗОТРОПНЫХ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКОВ

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

Аннотация. Рассмотрен способ определения оптимальных геометрических параметров шунтирующих структур тонкопленочных анизотропных преобразователей магнитного поля с использованием метода конечных элементов. Выполнены вариативные численные расчеты для магниторезистивных полосок шириной от 20 до 85 мкм. Найдены оптимальные соотношения геометрических параметров шунтирующих структур, обеспечивающие наибольшую эффективность преобразования магнитного поля.

Ключевые слова: АНИЗОТРОПНЫЙ; МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЙ; ШУНТИРОВАНИЕ; ШУНТИРУЮЩИЕ ПОЛОСКИ; МАГНИТОМЕТР; МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ; ФЕРРОМАГНИТНАЯ СТРУКТУРА; НАПЫЛЕНИЕ.

Для цитирования: Котельников А.С. Оптимизация параметров шунтирующих структур анизотропных магниторезистивных датчиков / А.А. Баранов, А.Б. Грабов, Д.Ю. Обижаев, С.А. Жукова, С.А. Ульянов // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 2. С. 22–30.





THE SHUNTING STRUCTURE PARAMETERS OPTIMIZATION FOR ANISOTROPIC MAGNETORESISTIVE SENSORS

A.S. KOTEL'NIKOV, A.A. BARANOV, PhD in Engineering, A.B. GRABOV, D.YU. OBIZHAEV, PhD in Engineering, S.A. ZHUKOVA, PhD in Engineering, S.A. YLYANOV, ISSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics»

Abstract. *The method of thin-films anisotropic magnetic field transducers shunting structure's geometric parameters definition by using of finite element's method is consider. Quantitative variative considerations for magnetoresistive stripes with width between 20 and 85 mkm are executed by the finite element's method. The optimum ratios of geometrical parameters of the shunting structures providing the greatest efficiency of transformation of magnetic field are found.*

Keywords: ANISOTROPIC; MAGNETORESISTIVE; SHUNTING; SHUNTING STRIPS; MAGNETOMETER; MAGNETICALLY SENSITIVE SENSORS; FERROMAGNETIC STRUCTURE; SPUTTERING.

For citation: Kotel'nikov A.S., Baranov A.A., Grabov A.B., Obizhaev D.Yu., Zhukova S.A., Ylyanov S.A. The shunting structure parameters optimization for anisotropic magnetoresistive sensors. *Perspektivnye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti* [Promising technologies for security systems], 2023, N 2, pp. 22–30 (In Russ.).

Введение

Для перспективных навигационных систем весьма актуальна задача повышения чувствительности и миниатюризации датчиковых устройств [1, 2]. Многообещающий и перспективный путь ее решения видится в применении

Анизотропные магниторезисторы – полосковые структуры из магнитомягкого ферромагнетика на основе пермаллоя, в которых под действием магнитного поля происходит изменение сопротивления.

микросистемных магниторезистивных структур как чувствительных элементов магнитометрической аппаратуры. Они могут использоваться вместо крупногабаритных намоточных катушек феррозондов, стеклянных оптических ячеек протонных магнитометров и т.п. [3].

Анизотропные магниторезисторы (АМР) представляют собой полосковые структуры из магнитомягкого ферромагнетика на основе пермаллоя $Ni_{0,81}Fe_{0,19}$, в которых под действием приложенного магнитного поля (МП) происходит изменение сопротивления.

Чувствительный элемент – это, по сути, кремниевый кристалл с тонкопле-

ночной микроструктурой из четырех полосковых АМР, включенных по мостовой схеме Уитстона. На кристалле интегрирована планарная и тонкопленочная катушка подмагничивания. Измерение одной компоненты МП обеспечивается в результате формирования выходного сигнала при фиксировании сопротивления АМР мостовой схемы, пропорционального величине внешнего МП, вдоль оси чувствительности.

Особенностью работы АМР-датчиков является необходимость линеаризации зависимости сопротивления от МП путем перенаправления протекания тока под углом $\alpha = 45^\circ$ к вектору напряженности внешнего МП [4]. Наиболее распространены два способа обеспечения линеаризации передаточной характеристики магнитометра: формирование топологии АМР-полосок типа «елочка» [4] и создание на магниторезисторах шунтирующих структур типа «полосок барбера» [3]. Эти шунтирующие полоски (ШП) должны отвечать следующим требованиям:

расположение под углом 45° к оси АМР (тем самым линии протекания тока выстраиваются параллельно друг другу и ортогонально линии среза шунта);

проводимость σ_b в 10...50 раз выше проводимости АМР σ_{mr} .

На основании предварительных исследований было установлено, что магниторезистивное отношение (величина АМР-эффекта) $\Delta R/R$ – определяющий параметр для чувствительности, разрешающей способности и отношения «сигнал-шум» магнитного датчика. Ранее методом магнетронного осаждения в МП напря-

Заземление подложки на держателе пластины в чистой комнате



женностью 400 Э были получены низкоомные пленки $Ni_{81}Fe_{19}$ с поверхностным сопротивлением $\rho_s = 2,0 \dots 2,5 \text{ Ом/}\mu\text{}$ и высоким магниторезистивным отношением $\Delta R/R = 6,5 \dots 7,0\%$ [5]. При конструировании же топологии АМР-датчика следует определить оптимальные геометрические параметры магниторезисторов и ШП для пленок с номинальным поверхностным сопротивлением $\rho_s = 2,0 \text{ Ом/}\mu\text{}$.

Поскольку для формирования АМР используются низкоомные пленки $Ni_{80}Fe_{20}$, дополнительное шунтирование может привести к неконтролируемому снижению сопротивления мостовой схемы. Поэтому было решено провести расчеты параметров ШП. При использовании смещения шунтированием возникает задача оптимизации геометрии ШП, которая состоит в обеспечении величины $\alpha = 45^\circ$ на наибольшей площади магниторезистора при условии сохранения его максимального поверхностного сопротивления ρ_s .

В свое время попытка аналитически рассчитать оптимальную геометрию ШП предпринималась Tumanski, Stabrowski [3], но подробностей своей модели они не раскрывают. В данной статье описаны результаты работы модели шунтирования полоски пермаллоя, пригодной для выполнения практических расчетов геометрических параметров магниторезистивных датчиков.

Описание модели

Расчет выполнялся в программном пакете конечно-элементного моделирования ANSYS. Геометрия моделируемого объекта: прямоугольная полоска шириной w из $Ni_{80}Fe_{20}$, со сформированными на ней под углом 45° прямоугольными ШП из Al шириной – b , высотой – h на расстоянии – a (рис. 1).

Модель параметризована по w , a , b , h . Характеристики модели приведены

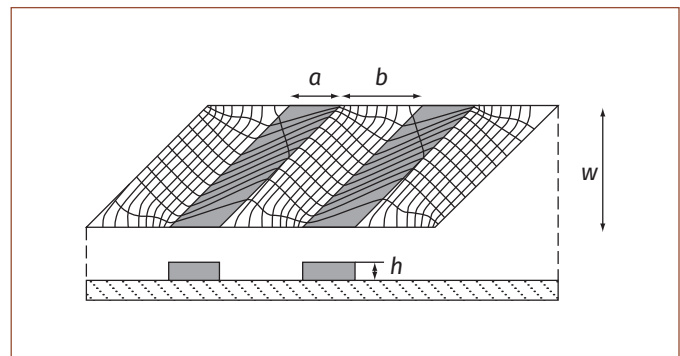


Рис. 1. Модель протекания тока в магниторезисторе с шунтирующими полосками [3]: w – ширина полоски из $Ni_{81}Fe_{20}$; b – ширина полоски из Al; h – высота полоски из Al; a – ширина участка полоски из $Ni_{81}Fe_{20}$, не закрытого Al

в таблице. Расчеты выполнялись вариативным методом. Всего было рассчитано 288 вариантов параметров модели, из которых для дальнейшего анализа отобрано 10 наиболее оптимальных. В качестве критерия качества шунтирования принят минимум отклонения вектора протекания тока от 45° на серединной линии расстояния a . Для 10 оптимальных вариантов были построены диаграммы распределения линий протекания тока по поверхности магниторезисторов. Оптимальные варианты геометрических параметров магниторезистивных и шунтирующих полосок приведены в таблице. Диаграммы распределения линий протекания тока показаны на рис. 2.

Анализ математической модели

По результатам анализа модели шунтирования были сделаны следующие выводы:

1. Наименьшее отклонение направления вектора тока на $a/2$ от 45° наблюдается при наибольшем отношении a/b .

2. Наибольший фактор заполнения площади АМР при $a = \text{const}$ и $b = \text{const}$ наблюдается при максимальном аспектном отношении h/b .

Оптимальные расчетные варианты геометрических параметров магниторезистивных и шунтирующих полосок (обозначения параметров даны на рис. 1)

Оптимизированный вариант	Номер варианта	w, мкм	a, мкм	b, мкм	h, мкм	a/w	Позиция на рис. 2
1	3	22	10	5	2,5	0,455	а, б
2	99	53	10	5	2,5	0,189	в
3	207	82	20	5	2,5	0,244	ж
4	104	53	10	9	1,5	0,189	г
5	108	53	10	11	2,5	0,189	д, е
6	198	82	10	7	2,5	0,122	з
7	107	53	10	11	1,5	0,189	–
8	195	82	10	5	2,5	0,122	к
9	206	82	20	5	1,5	0,244	л
10	197	82	10	7	1,5	0,122	–

По результатам моделирования наибольшая однородность токовых линий находится в диапазоне $0,25 < w/a < 0,5$.

3. Наименьшее сопротивление АМР – при $a/w \rightarrow 1$.

4. По модели Tumanski, Stabrowski [3] оптимальное отношение w/a лежит в диапазоне от 0,5 до 1,5 и в точке $\approx 1,0$ имеется максимум. По результатам нашего моделирования, наибольшая однородность токовых линий, соответствующая максимуму чувствительности АМР, находится в диапазоне $0,25 < w/a < 0,5$.

Описание эксперимента

На первом этапе на подложках Si КДБ (100) методом PECVD формировался диэлектрический слой Si_3N_4 толщиной ≈ 200 нм. Далее на поверхность Si_3N_4 магнетронным напылением наносилась трехслойная тонкопленочная ани-

зотропная ферромагнитная структура $Ti-Ni_{80}Fe_{20}-Ti$ (25 нм – 35 нм – 25 нм). Для обеспечения условий анизотропии пленок в процессе роста подложкодержатель был дополнен магнитной системой из двух параллельных магнитов, сконструированных с учетом их тепловой развязки с кварцевым нагревателем, размещенным там же на подложкодержателе. Магнетронное напыление велось при $t = 280$ °С и в однородном МП напряженностью 420 Гс.

На напыленной пленке $Ti-Ni_{80}Fe_{20}-Ti$ измерялась величина АМР эффекта $\Delta R/R$. Измерение $\Delta R/R$ проводилось неразрушающим шестизондовым методом [5]. По результатам измерений пластины была построена диаграмма зависимости АМР-эффекта от угла поворота θ . Шаг поворота – 10°. Результаты измерений $\Delta R/R$ приведены на рис. 3.

Далее на пленке фотолитографией был сформирован топологический рисунок АМР-сенсора геомагнитного поля. В данной топологии на поверхности магниторезистивных полосок с шириной

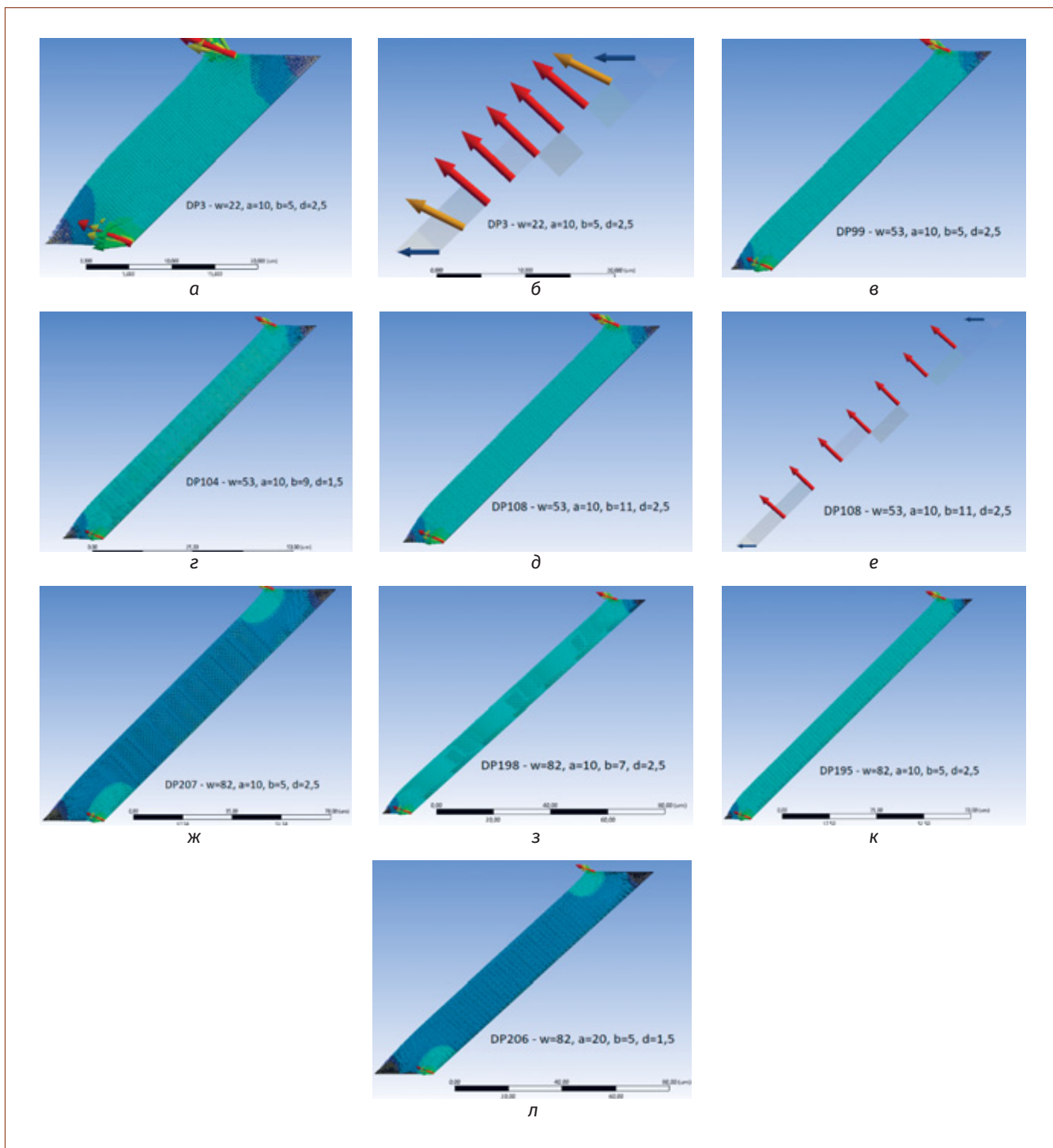


Рис. 2. Диаграммы распределения токовых линий для различных вариантов геометрий

$w = 53$ мкм методом ЖХТ (жидкостно-го химического травления) сформированы шунтирующие структуры в виде

полосок из Al с шириной $a = 10$ мкм, $b = 11$ мкм и толщиной $h = 1,0$ мкм. Данные параметры соответствуют вариан-

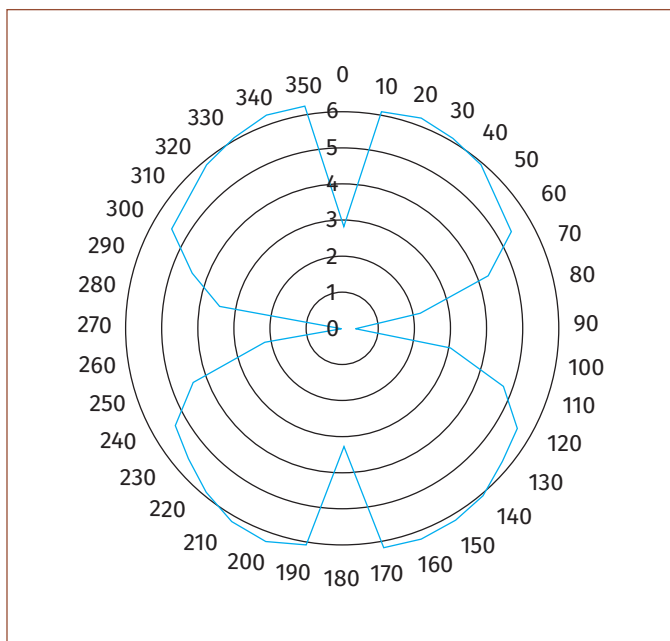


Рис. 3. Диаграмма $\Delta R/R = f(\theta)$ для структуры $Ti-Ni_{80}Fe_{20}-Ti$ (25 нм – 35 нм – 25 нм)

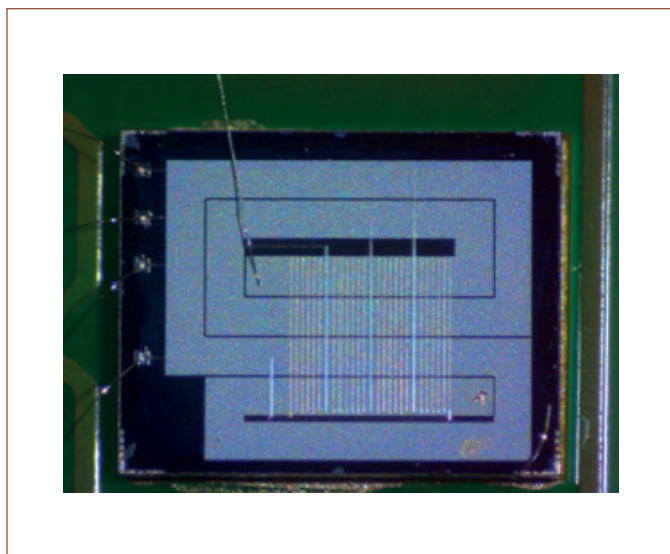


Рис. 4. Микрофотография общего вида топологии кристалла АМР-преобразователя магнитного поля

ту № DP108 из таблицы. Над мостовой схемой формируется планарная катушка перематгничивания «Set-Reset» из Al. Общий вид топологии АМР-сенсора приведен на рис. 4.

Результаты и обсуждение

На рис. 5 приведен вид области соединения АМР-полосок с Al толщиной >1,00 мкм при увеличении 400X. Адгезия Al по разделительному слою Ti характеризуется единообразием. Геометрическая форма шунтирующих полосок при их формировании методом ЖХТ сохраняется в широком диапазоне толщин Al. Однако при повышенном увеличении становятся заметны подтравы Al, как это показано на рис. 6.

Измерение электрических характеристик АМР-сенсоров уверенно демонстрирует линейность передаточной характеристики в диапазоне $\pm 0,3$ мТл (рис. 7). Крутизна этой передаточной характеристики существенно возросла по сравнению с АМР-сенсорами с неоптимизированной геометрией ШП и достигла величины 2,14 мВ/В·Э при неизменных параметрах самих магниторезисторов.

Следовательно, наличие несовершенства геометрической формы ШП, показанных на рис. 6, не привело к существенному снижению эффекта от оптимизированного расположения линий протекания тока, достигаемого при оптимизации геометрической формы шунтов. Поэтому

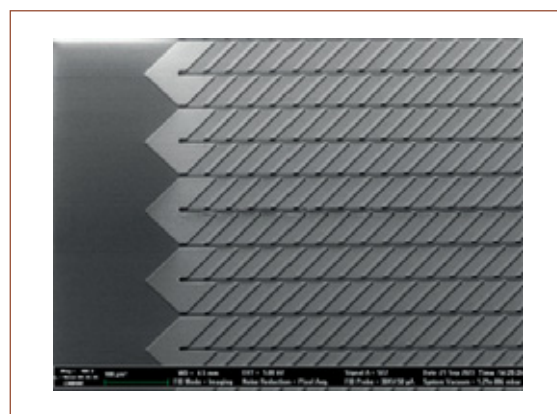


Рис. 5. СЭМ-изображение (сканирующим электронным микроскопом) фрагмента поверхности изготовленного кристалла АМР-преобразователя

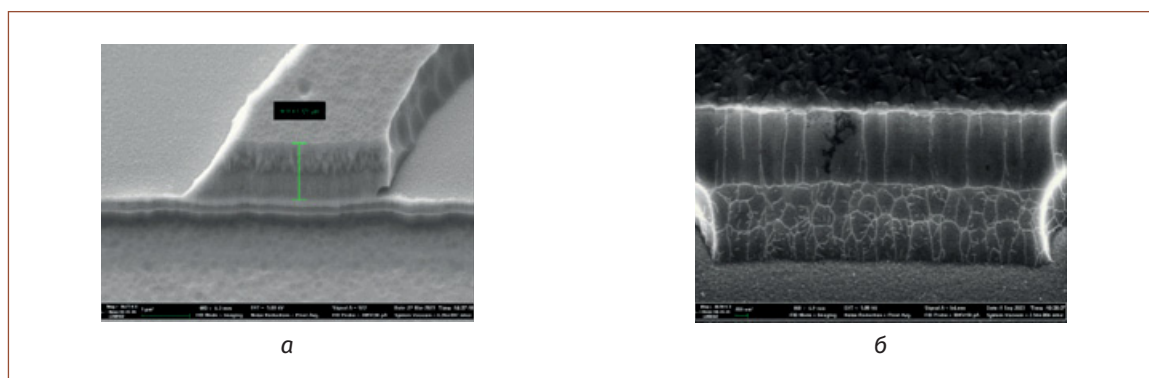


Рис. 6. СЭМ-изображения шунтирующей полоски: а – при увеличении 30000X; б – при увеличении 50000X

возможно применение одностадийного процесса ЖХТ алюминия со стоп-слоем титана, что существенно должно упростить технологию формирования шунтов.

Вывод

Проведенный эксперимент и выполненные вариативные численные расчеты для магниторезистивных полосок шириной от 20 до 85 мкм позволили определить оптимальные геометрические параметры шунтирующих структур тонкопленочных анизотропных преобразователей МП. Найдены оптимальные соотношения геометрических параметров шунтирующих структур, обеспечивающие наибольшую эффективность преобразования магнитного поля АМР-датчиков.

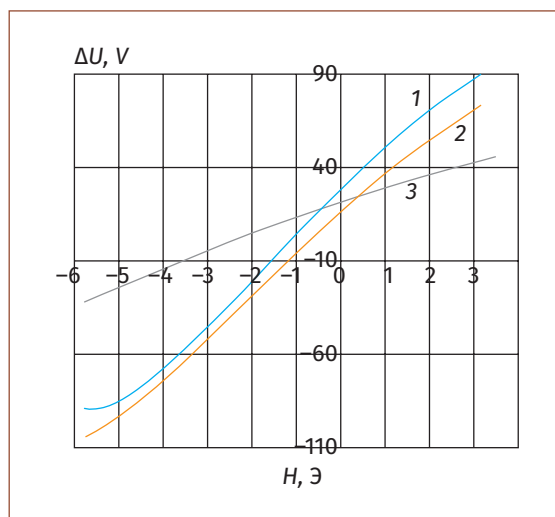


Рис. 7. Передаточные функции кристаллов АМР-преобразователей с оптимизированными ШП (1) и (2). Для сравнения приведена передаточная функция АМР-преобразователя с подобной топологией магниторезисторов с неоптимизированной геометрией шунтов (3) [6]

Список литературы

1. Джанджагава Г.И., Августов Л.И. Навигация по геополям. Научно-методические материалы. М.: Научтехлит, 2018. 296 с.
2. Минлигареев В.Т. Геофизическое обеспечение перспективных автономных магнитометрических навигационных систем / Т.В. Сазонова, Д.А. Арутюнян, В.В. Трегубов, Е.Н. Хотенко // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28, № 4 (111). С. 95–105.
3. Tumanski S. Thin-Film magnetoresistive sensors [англ. яз.] s.l.: Institute of Physics Pub., 2001. 441 p.
4. Ажаева Л.А. АМР-сенсор индукции магнитного поля Земли на основе тонких пленок сплава $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ / А.Б. Грабов, В.И. Суханов, Б.В. Тимофеев // Датчики и системы. 2020. № 1(234). С. 35–41.
5. Грабов А.Б. Исследование процессов токопереноса в тонкопленочных магниторезистивных структурах $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020. Т. 7, № 1. С. 95–103.

6. Баранов А.А. Двухосевой однокристалльный АМР-преобразователь магнитного поля / А.Б. Грабов, Д.Ю. Обижаев, С.А. Жукова // Известия вузов. Электроника. 2023. Т. 28, № 4. С. 500–508. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-500-508>.

References

1. Janjagawa G.I., Avgustov L.I. *Navigaciya po geopolyam. Nauchno-metodicheskie materialy* [Navigation by Geofields. Scientific-Research materials]. Moscow: NauchTechLit Publ., 2018, 296 p. (In Russ.).
2. Minligareev V.T., Sazonova T.V., Arutyunyan D.A., Tregubov V.V., Khotenko E.N. The geophysical providing of perspective autonomous magnetometric navigation systems. *Giroskopiya i navigaciya* [Gyroscopy and Navigation], 2020, V. 28, N 4 (111), pp. 95–105. (In Russ.).
3. Tumanski S. Thin-Film magnetoresistive sensors [англ. яз.] s.l.: Institute of Physics Pub., 2001, 441 p.
4. Azhayeva L.A., Grabov A.B., Sukhanov V.I., Timofeev B.V. Development of AMR sensor for Earth magnetic field induction based on thin films $Ni_{0.76}Fe_{0.18}Co_{0.06}$ alloy. *Datchiki i sistemy* [Sensors & Actuators], 2020, N 1 (234), pp. 35–41. (In Russ.).
5. Grabov A.B. Study of current transfer processes in thin film magnetoresistive structures $Ni_{0.76}Fe_{0.18}Co_{0.06}$. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionny`e sistemy* [Rocket-space device engineering and information systems], 2020, V. 7, N 1, pp. 95–103. (In Russ.).
6. Baranov A.A., Grabov A.B., Obizhaev D.Yu., Zhukova S.A. Two-axis single-chip AMR-transducer of magnetic field. *Izvestiya vuzov. E`lektronika* [Proceedings of Universitetes. Electronics], 2023, V. 28, N 4, P. 500–508, <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-500-508>. (In Russ.).

Поступила в редакцию: 27.11.2023

Одобрена рецензентами: 28.11.2023

Принята к печати: 04.12.2023

Об авторах

Александр Сергеевич Котельников – сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики».

Alexander S. Kotelnikov – employee of SSC RF FSUE «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics».

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

Alexander A. Baranov – PhD in Engineering sciences, employee of SSC RF FSUE «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics».

Алексей Борисович Грабов – сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики».

Alexey B. Grabov – employee of SSC RF FSUE «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics».

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

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

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

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

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

Sergey A. Ulyanov – employee of SSC RF FSUE «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics».

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ФГУП «ЦНИИХМ»

К вашим услугам штат высококвалифицированных специалистов, имеющих опыт работы в области физико-химических исследований и проведения лабораторных анализов.

Лаборатория оснащена современным оборудованием для проведения качественных и количественных исследований широкой номенклатуры соединений, их физико-химических свойств:

- качественный и количественный химический и элементный анализ органических и неорганических веществ;
- измерение площади удельной поверхности, среднего размера пор, дисперсных параметров суспензий, эмульсий и порошкообразных материалов;
- измерение коэффициентов пропускания и оптической плотности в УФ- и видимой области спектра;
- измерение показателей преломления, плотности, pH, электропроводимости жидких сред;
- измерение микротвердости металлических образцов по шкале Виккерса.

Испытательная лаборатория ФГУП «ЦНИИХМ» аккредитована в Системе добровольной аккредитации «Военный регистр». Аттестат аккредитации № ВР АА.7.44.0045–2023.

По вопросам сотрудничества обращаться:
тел.: 8(499) 611-80-74; e-mail: il@cniihm.ru

УДК 004.056.53

НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫЙ ДОСТУП К ПРОМЫШЛЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ: ИНЦИДЕНТЫ И РЕШЕНИЯ

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

Аннотация. В настоящей статье рассмотрены наиболее распространенные случаи, связанные с информационной безопасностью в промышленности, представлены статистика динамики инцидентов за последние пять лет и их последствия, а также предложены различные решения для защиты производственных систем от кибератак.

Ключевые слова: ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ; КИБЕРАТАКИ; ИНЦИДЕНТЫ; КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ; ВРЕДОНОСНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ; УЯЗВИМОСТИ; СОЦИАЛЬНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ.

Для цитирования: Егоров И.В., Щавелев П.А. Несанкционированный доступ к промышленной инфраструктуре: инциденты и решения // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 2. С. 32–43.

INFORMATION SECURITY INCIDENTS IN INDUSTRY: CHALLENGES AND SOLUTIONS

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

Abstract. This article examines the most common cases related to information security in industry, presents statistics on the dynamics of incidents over the past five years and their consequences, and offers various solutions to protect production systems from cyber attacks.

Keywords: INFORMATION SECURITY; CYBER ATTACKS; INCIDENTS; CYBERSECURITY; MALICIOUS SOFTWARE; VULNERABILITIES; SOCIAL ENGINEERING.

For citation: Egorov I.V., Shchavelev P.A. Information security incidents in industry: challenges and solutions. *Perspektivnye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti* [Promising technologies for security systems], 2023, N 2, pp. 32–43 (In Russ.).

Введение

С развитием цифровизации и сети Интернет промышленные системы становятся все более подключенными и уязвимыми перед киберугрозами. В результате предприятия сталкиваются с растущим числом инцидентов информационной направленности, которые могут иметь серьезные последствия для их операций, безопасности и репутации. В частности, к нарушению рабочих циклов и систем управления, а также к утечке сведений конфиденциального характера.

В этой связи защита промышленных объектов от кибератак является актуальной задачей обеспечения информационной безопасности, заключающейся в постоянном совершенствовании инструментальных методов и средств защиты для предотвращения различных инцидентов.

Информационная безопасность (ИБ) – это набор процедур и инструментов, которые обеспечивают всестороннюю защиту сведений конфиденциального характера от неправильного использования, несанкционированного доступа, искажения или уничтожения [1]. В России по состоянию на 2023 г. действует ряд нормативно-правовых документов [2–5], представляющих собой систему официальных взглядов на обеспечение национальной безопасности в информационной сфере; за рубежом применяются требования, выставленные серией международных стандартов ISO/IEC 27000.

В соответствии с российским законодательством инцидентом считается отказ или повреждение технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, отклонение от установленного режима технологического процесса [4]. Инцидентом ИБ полагают появление одного (нескольких) нежелательных или неожиданных событий, с которыми связана значительная вероятность комп-

рометации бизнес-операций и создание неидентифицированных угроз [6].

Некоторые из наиболее распространенных инцидентов ИБ в промышленности включают:

фишинг-атаки – атаки, которые происходят путем отправки фальшивых электронных писем (сообщений) или создания поддельных веб-сайтов с целью получения доступа к учетным данным сотрудников или заражения системы вредоносным программным обеспечением (ПО), таким как вирусы, троянские программы или шпионское ПО;

социальная инженерия (в контексте ИБ) – психологическое манипулирование людьми с целью совершения определенных действий, разглашения сведений конфиденциального характера и получения несанкционированного доступа к системам управления промышленными объектами;

кибератаки на системы управления производственными процессами – атаки, которые могут привести к нарушению работы оборудования или даже к аварийным ситуациям на производстве;

внутренние угрозы – несанкционированные действия или ошибки со стороны сотрудников, которые представляют серьезную угрозу для ИБ в промышленности;

кибератаки на критическую инфраструктуру – специально направленные действия по нарушению работы промышленных объектов, приводящие к серьезным последствиям для безопасности людей, экономики и окружающей среды.

Решением для предотвращения вышеперечисленных видов атак могут быть следующие мероприятия:

обучение сотрудников правилам безопасности, осведомленность о тактиках фишинга и социальной инженерии, а также использование фильтров спама и антивирусного ПО;

регулярное обновление ПО, усиление аутентификации и управления доступом, использование сильных паролей и механизмов шифрования, а также мониторинг сетевой активности;

реализация политики безопасности, установление строгих правил доступа и мониторинг действий сотрудников;

разработка и реализация комплексных систем безопасности, включающих многоуровневую защиту, мониторинг и обнаружение инцидентов, а также сотрудничество с экспертами в области кибербезопасности.

Случаи несанкционированного доступа к информации

Несмотря на то, что предприятия из различных отраслей промышленности продолжают увеличивать бюджеты на кибербезопасность и внедряют решения ИБ различных классов, в том числе для защиты технологических систем, ситуация в отрасли меняется, но не быстрыми темпами.

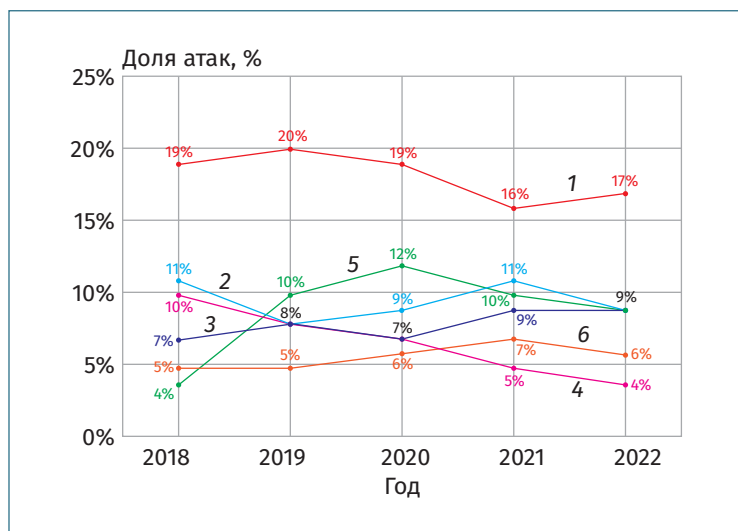


Рис. 1. Доля атак на промышленные организации (от общего числа атак на организации) [8]: 1 – государственные учреждения; 2 – медицинские учреждения; 3 – наука и образование; 4 – финансовые организации; 5 – промышленность; 6 – IT-компании

В период с 2018 по 2022 г. массовое распространение в мире получили методы несанкционированного доступа к информации или системам хранения информации без использования технических средств, в том числе методы социальной инженерии.

Представленные далее статистические данные основаны на многочисленных расследованиях и открытых данных как российских, так и зарубежных авторитетных источников [7–19] (использованы только данные об успешных кибератаках).

Резкий скачок количества инцидентов в промышленных организациях в 2019 г. (рис. 1) случился из-за масштабного всплеска активности шифровальщиков (вредоносное ПО для кодировки и экс-фильтрации данных с целью дальнейшего вымогательства злоумышленниками).

Промышленность привлекает злоумышленников своей потенциальной уязвимостью и возможностью нанесения ей репутационного ущерба, поэтому в 2020 г. эта сфера была у хакеров второй по популярности после государственной (рис. 1).

«Пандемийные» годы принесли новые вызовы промышленности: из-за массового перехода сотрудников на удаленную работу традиционно закрытые внутренние системы оказались доступны извне, если были недостаточно защищены (рис. 2). В 2020–2022 гг. стабильно высокий уровень напряженности сохранялся из-за активности шифровальщиков и противостояния в киберпространстве на фоне обострения геополитической обстановки.

Наиболее популярным каналом социальной инженерии в промышленном секторе стала электронная почта (рис. 3), с по-

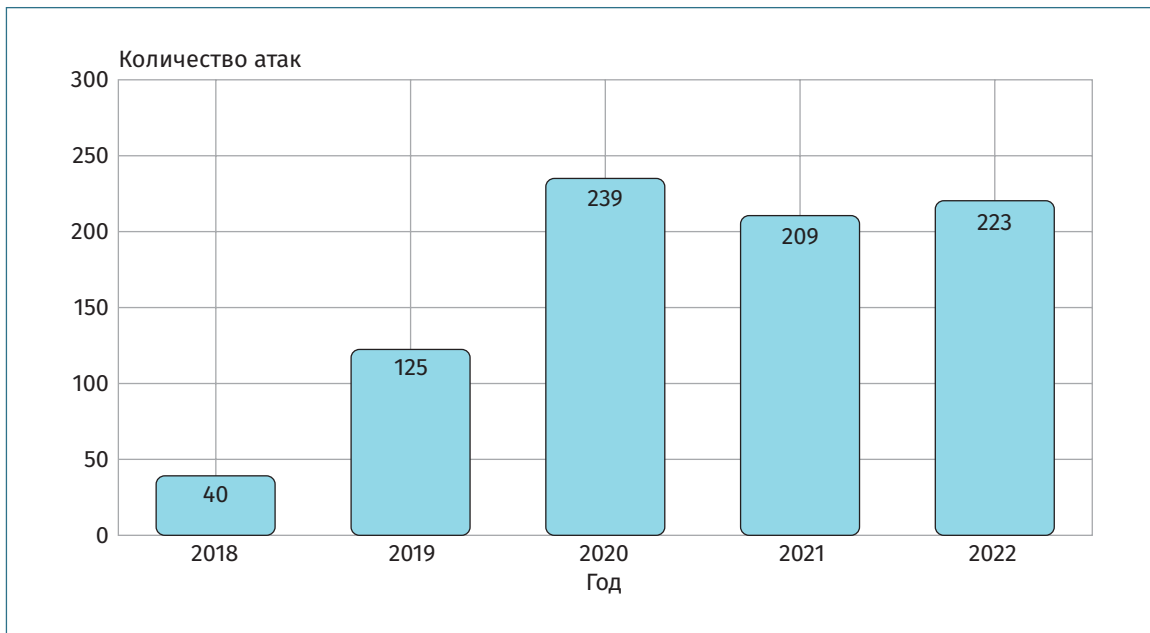


Рис. 2. Динамика инцидентов (количество по годам) [8]

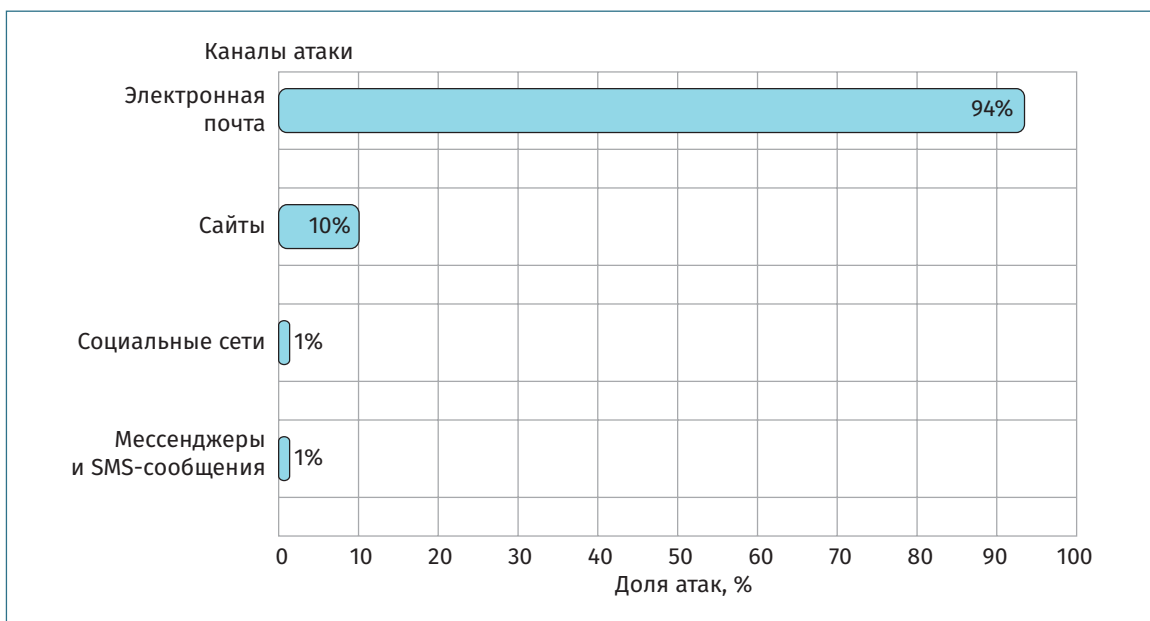


Рис. 3. Каналы социальной инженерии, используемые злоумышленниками в атаках на промышленность [8]

В период с 2018 по 2022 г. массовое распространение в мире получили методы несанкционированного доступа к информации или системам хранения информации без использования технических средств, в том числе методы социальной инженерии.

56%

успешных атак привели к утечкам значительного объема информации.

мощью которой злоумышленники доставляли вредоносное ПО, маскируя его под различные документы, и рассылали письма с вредоносными ссылками, при переходе по которым загружалось вредоносное ПО или открывались созданные с целью обмана и получения данных фишинговые сайты [8, 10].

Общая тенденция переключения злоумышленников на похищение сведений конфиденциального характера не обошла стороной и промышленный сектор, где 56% успешных атак привели к утечкам значительного объема информации. Наиболее распространенными типами украденных данных стали сведения, со-

держающие коммерческую тайну, и персональные данные. В 45% случаев атаки привели к нарушению основной деятельности промышленных организаций: из-за атак шифровальщиков становилась недоступной их инфраструктура (рис. 4).

Утечка сведений конфиденциального характера включает различные типы украденных данных (рис. 5): коммерческая тайна (39%), персональные данные (27%), переписка (8%) и др.

Промышленность построена на инновациях, и технологии оказывают на нее значительное влияние. В недавнем прошлом автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) использовали свою физическую изоляцию как метод защиты от кибератак. Теперь он не работает, так как многие промышленные компании превратились в цифровые предприятия, использующие IoT и SmartXXX (в том числе, системы управления техническим обслуживанием и цифровые двойники), машинное обучение, искусственный интеллект, робото-

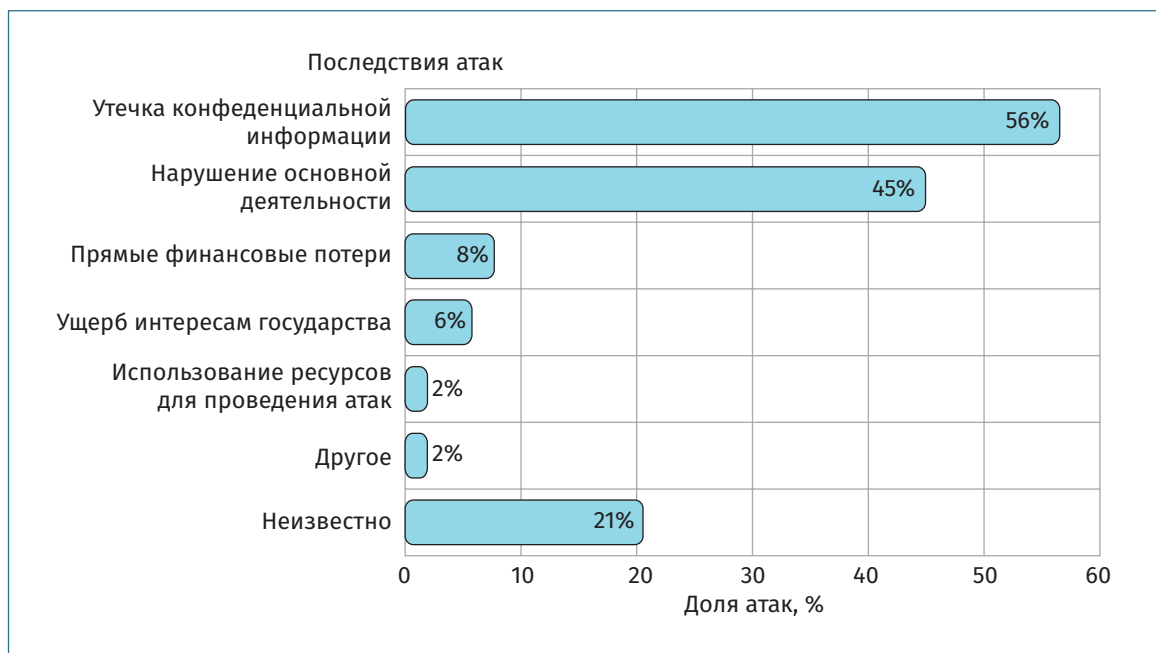


Рис. 4. Последствия атак на промышленные организации (доля атак) [8]

технику и дополнительную реальность, что существенно увеличивает количество атак. Об этом можно судить по мировой статистике атак (рис. 6) на компьютеризированные системы управления техническим обслуживанием (CMMS, от англ. Computerized Maintenance Management System) [7–9].

Частые инциденты в различных отраслях промышленности свидетельствуют о том, что предприятия этой отрасли являются мишенью для хакеров, поэтому в 2022 г. каждая десятая успешная атака на организации приходилась на промышленные предприятия. Киберугрозам подвержены не только АСУ ТП, но и информационные системы, отвечающие за взаимодействие с деловыми партнерами и поставщиками, системы планирования ресурсов предприятия (ERP или Enterprise resource planning), системы проектного управления (PM или Project Management) и управления взаимоотношениями с кли-

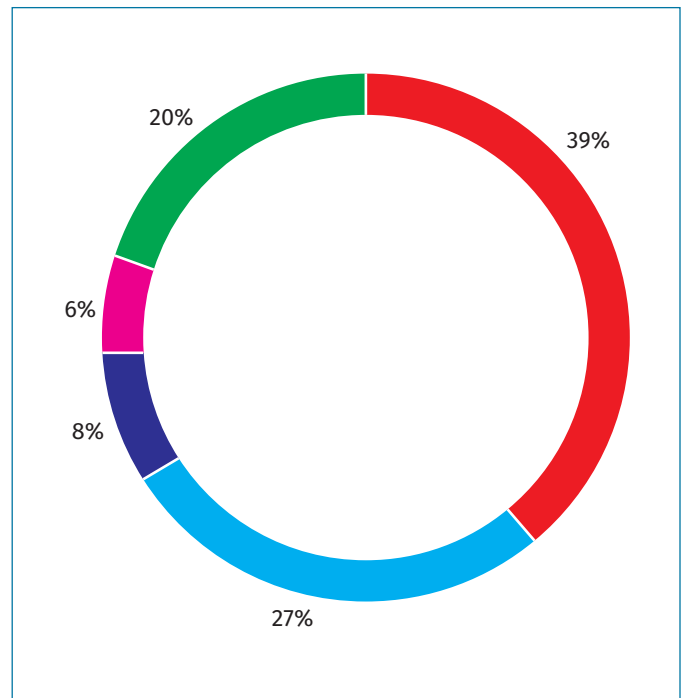


Рис. 5. Типы украденных данных при утечке сведений конфиденциального характера [8]:

- – коммерческая тайна; ■ – персональные данные;
- – переписка; ■ – учетные данные;
- – другая информация



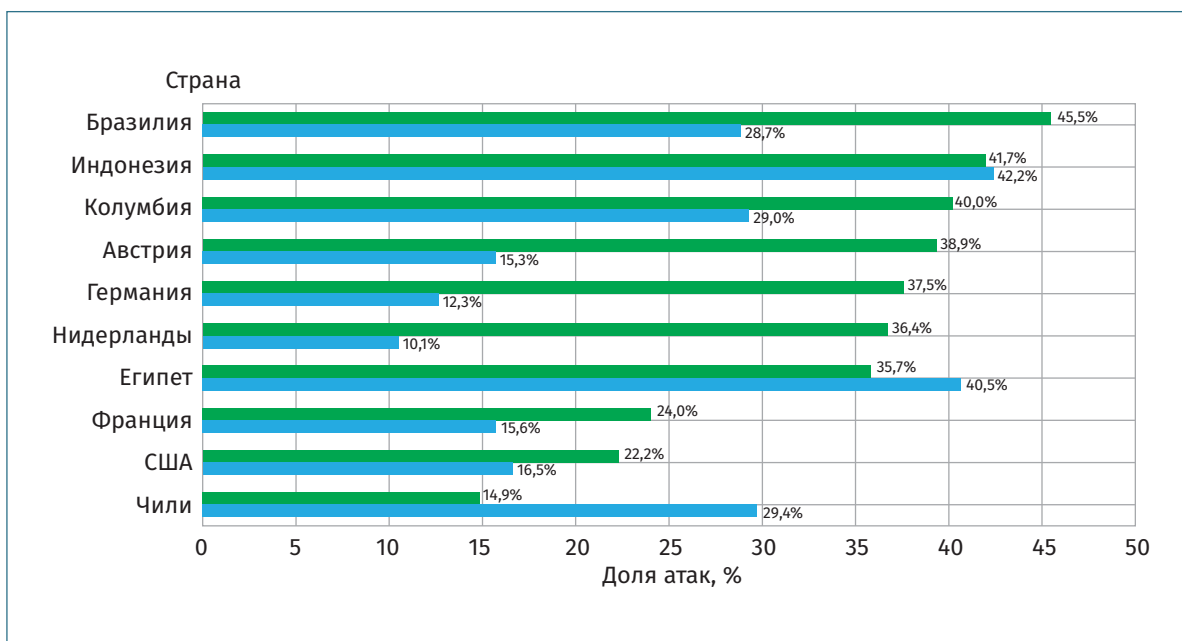


Рис. 6. Статистика атак на CMMS различных стран в первом полугодии 2022 г. [9]:

■ — CMMS; ■ — все АСУ

ентами (CRM или Customer relationship management). Мотивы нападения хакеров включают кражу интеллектуальной собственности, коммерческой тайны и секретов производства, промышленный саботаж, вымогательство и повреждение информационных систем [7].

Число доступов к инфраструктуре промышленных предприятий, выставленных в 2022 г. на продажу в даркнете (от англ. DarkNet – сегмент Интернета, который скрыт от широкого круга пользователей), выросло более чем на 40%. Доступы составляют 75% всех объявлений, относящихся к промышленности, а их стоимость обычно колеблется от 500 до 5000 долларов США (рис. 7).

Активнее всего в 2022 г. в атаку шли группировки вымогателей в первую очередь LockBit, BlackCat, Cl0p и Conti, хактивисты, а также АРТ-группировки (от англ. Advanced persistent threat, постоянная серьезная угроза) типа Space Pirates, АРТ31 и ChamelGang [11]. АРТ – термин кибер-

безопасности, означающий противника, обладающего современным уровнем специальных знаний и значительными ресурсами, которые позволяют ему создавать угрозу опасных кибератак.

Инциденты ИБ в промышленности являются серьезной проблемой, которая может иметь значительные последствия для экономики компаний и безопасности государств во всем мире. Россия не является исключением, где в последние годы также происходят значительные инциденты. Их общее количество у нас по сравнению с 2021 г. увеличилось на 21%. Главными тенденциями стали: увеличение числа инцидентов, связанных с веб-ресурсами; появление программ-вирусов, стирающих данные при заражении устройства («вайперы»); усиление межотраслевых последствий атак на ИТ-компании и ряд других [12].

По данным Национального координационного центра по компьютерным инцидентам и по состоянию на май 2023 г.

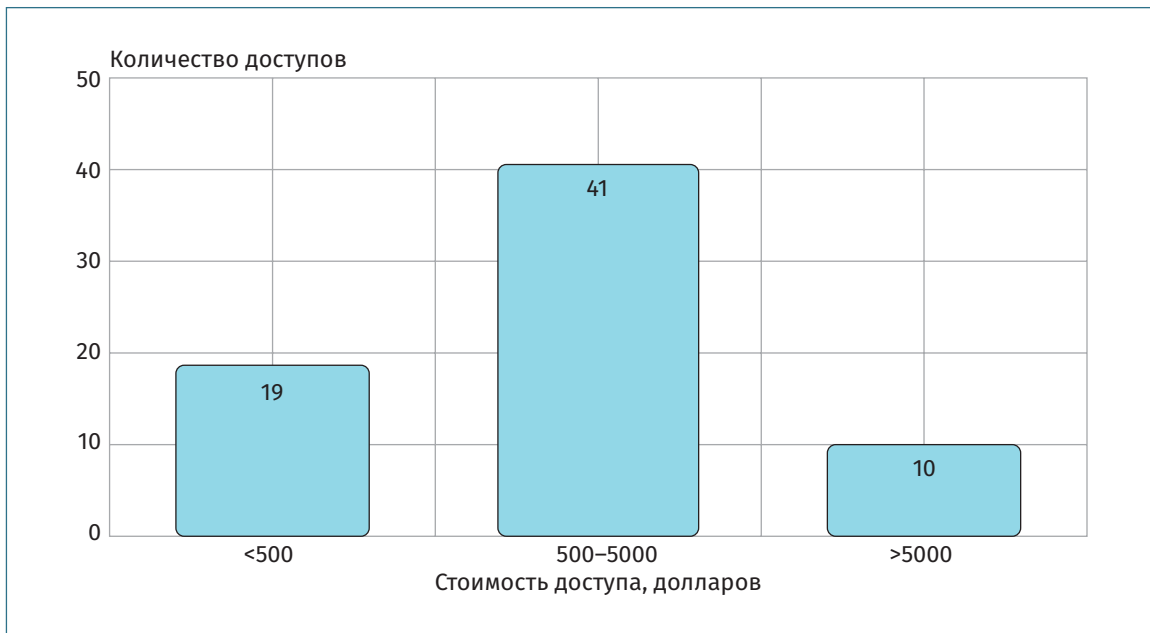


Рис. 7. Количество доступов в даркнете по отношению к их цене [8]

ежедневно на информационные российские ресурсы фиксируется более 170 комплексных компьютерных атак. На фоне проведения специальной военной операции в сети Интернет развернута беспрецедентная по своим масштабам борьба против Российской Федерации. Четко скоординированные кибератаки проводятся из различных точек земного шара, но их эпицентр в основном прослеживается из США, стран НАТО и Украины [12].

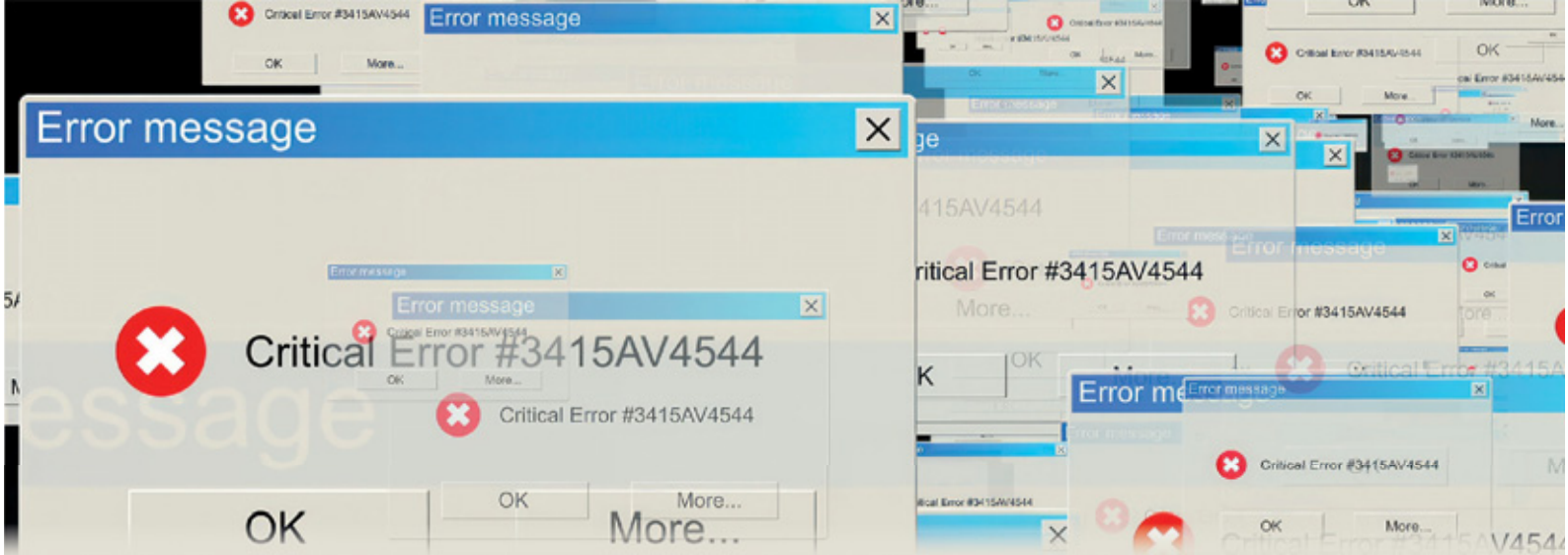
По сравнению с предыдущими годами скорость совершения кибератак в мире сократилась. Раньше этапы нападения могли растянуться на месяцы, теперь хакерам требуется в среднем от четырех до семи дней. Объясняется это распространением в даркнете простых в использовании вредоносных ПО [13].

Ключевыми целями кибератак в первой половине 2023 г. стали шифрование инфраструктуры для получения денежного вознаграждения (38% инцидентов), хактивизм (38%), т.е. использование незаконными способами компьютеров и компью-

Активнее всего в 2022 г. в атаку шли группировки вымогателей в первую очередь LockBit, BlackCat, Cl0p и Conti, хактивисты, а также APT-группировки типа Space Pirates, APT31 и ChamelGang.

терных сетей для продвижения политических идей, свободы слова, защиты прав человека и обеспечения свободы информации, а также взлом инфраструктуры с целью кибершпионажа (20%). Большинство инцидентов (72%) были совершены через доступные в Интернете уязвимости, такие как ProxyLogon (критическая уязвимость в Microsoft Exchange Server) [13].

В первом квартале 2023 г. подвергся кибератаке ведущий российский производитель оборудования и разработчик ПО для автоматизации торговли и логистики



«Атол», вследствие чего около 5% клиентов и партнеров айтишников получили спам-сообщения, а ряд сайтов компании были недоступны короткий период времени. Кроме того, в открытый доступ попала клиентская база данных и архив объемом 9 Гб [14].

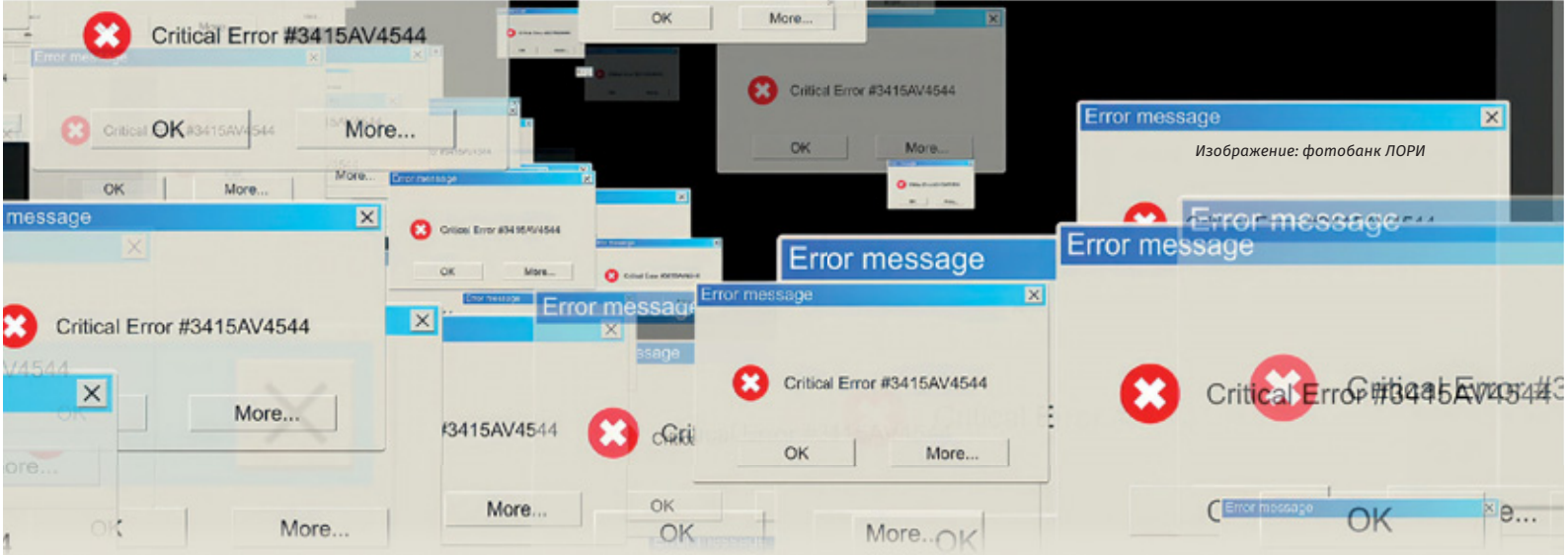
Самой желанной целью киберпреступников в России по-прежнему остаются энергетические компании. Количество DDoS-атак в этом секторе растет, но значительного эффекта они, к счастью, не достигают [15].

Одним из ярких примеров инцидентов за рубежом в первом квартале 2023 г. стал несанкционированный доступ к одному из серверов Асег. Об этом стало известно после того, как злоумышленник выставил базу данных компании на один из хакерских форумов в даркнете [16].

Во втором квартале 2023 г. подверглась кибератаке облачная платформа AZ Tower, японской компании Purpose. Платформа является одной из ведущих в сфере управления энергетическими ресурсами страны и предоставляет услуги для более 1100 компаний Японии. AZ Tower была атакована программой-вымогателем Trigona, целью которой было нарушить работу платформы и нанести ущерб бизнесу. В результате кибератаки платформа не работала 10 дней, что привело к потерям в нескольких секторах экономики Японии, особенно в производстве сжиженного нефтяного газа [17].

Часто специалисты по кибербезопасности предупреждают атаки преступников, выявляя уязвимости и исправляя их. Так, эксперты Positive Technologies во втором квартале 2023 г. обнаружили семь уязвимостей утилит для программируемых логических контроллеров (ПЛК) компании Mitsubishi Electric, которые используются в водном хозяйстве для автоматизации инженерных систем зданий, в судостроительстве, в производстве продуктов питания и других сферах. Основная часть найденных уязвимостей связана с механизмами предотвращения нелегального доступа к программам в проектах в среде GX Works3 и исполнении программ в ПЛК [18].

В третьем квартале 2023 г. российские компании начали массово получать электронные письма с вложениями, зараженными вирусом «White Snake», с целью кражи логинов и паролей пользователей, а также получения доступа к микрофонам и веб-камерам на компьютерах. Фишинговые письма на электронные адреса компаний рассылались от имени Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). В них содержались два файла: в одном – документ с уведомлением о якобы посещении получателем экстремистских ресурсов, распространяющих информацию от имени иноагентов, во втором – якобы доказательства перехода на подобные ресурсы. От получателей требовали дать поясне-



ние, чтобы избежать административного и уголовного преследования. В действительности второй файл содержал ссылку на вредоносное ПО [19].

Рассмотренные примеры инцидентов ИБ в промышленности как в России, так и за рубежом подчеркивают важность принятия мер по обеспечению кибербезопасности на производстве. Таким образом, в 2023 г. к промышленности приковано внимание не только со стороны злоумышленников, значительно повысивших скорость за счет применения простых в использовании вредоносных ПО, но и регуляторов, которые выявляют уязвимости ИБ.

Выводы

1. ИБ в промышленности является сложной и многогранной проблемой как в России, так и за рубежом. Применение комплексного подхода и реализация соответствующих мер безопасности могут значительно снизить риски инцидентов ИБ на промышленных предприятиях.

2. Важно помнить о влиянии человеческого фактора на успешность кибератак и необходимости проводить мероприятия для повышения осведомленности в сфере кибербезопасности. Фишинг-атаки и социальная инженерия представляют серьезную угрозу для безопасности и надежности промышленных систем, и могут быть направлены на различные секторы промышленности, включая энергетику, нефтегазовую, химическую промышленность и другие отрасли.

3. Для предотвращения кибератак необходимо проводить регулярные аудиты ИБ, обучать сотрудников правилам ИБ, использовать современные средства защиты информации, регулярно обновлять ПО, мониторить системы защиты на предмет возможных уязвимостей, а специалистам по кибербезопасности непрерывно совершенствоваться и массово внедрять различные системы ИБ, противодействующие возникновению инцидентов на объектах промышленности.

Список литературы

1. Общие сведения об информационной безопасности (InfoSec) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.microsoft.com/ru-ru/security/business/security-101/what-is-information-security-infosec/> (дата обращения: 02.05.2023).
2. Федеральный закон Российской Федерации от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» // Российская газета. 2006. 28 июля.
3. Федеральный закон Российской Федерации от 26 июля 2017 г. № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» // Российская газета. 2017. 31 июля.

4. Федеральный закон Российской Федерации от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ (ред. от 29 декабря 2022) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/11900785/?ysclid=lmqcxovr3859029652/> (дата обращения: 02.05.2023).
5. Указ Президента Российской Федерации от 5 декабря 2016 г. № 646. «Об утверждении Доктрины информационной безопасности Российской Федерации» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41460/> (дата обращения: 02.05.2023).
6. ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 18044-2007. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент инцидентов информационной безопасности. М.: Стандартинформ, 2009.
7. Промышленность [Электронный ресурс]. URL: <https://www.evraas.ru/industries/manufacturing/> (дата обращения: 26.04.2023).
8. Актуальные киберугрозы для промышленных организаций: итоги 2022 года [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/industrial-cybersecurity-threatscape-2022/> (дата обращения: 24.04.2023).
9. Киберугрозы для АСУ и промышленных предприятий в 2023 году [Электронный ресурс]. URL: <https://ics-cert.kaspersky.ru/publications/reports/2022/11/22/ics-cyberthreats-in-2023-what-to-expect/> (дата обращения: 15.05.2023).
10. Риски ИБ в промышленных компаниях [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/ics-risks-2021/> (дата обращения: 11.04.2023).
11. Российской промышленности объявили кибервойну [Электронный ресурс]. URL: <https://expert.ru/2023/02/28/rossiyskoj-promyshlennosti-obyavili-kibervoynu/> (дата обращения: 07.04.2023).
12. Число кибератак в России и в мире [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/> (дата обращения: 30.06.2023).
13. Блиц-хак [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5927911/> (дата обращения: 13.04.2023).
14. Производитель оборудования и ПО для автоматизации торговли «Атол» подтвердил факт взлома IT-сервисов компании [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/news/714028/> (дата обращения: 21.07.2023).
15. Названа «самая желанная цель» хакеров в российских объектах промышленности [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gazeta.ru/tech/news/2023/06/20/20704028.shtml/> (дата обращения: 21.07.2023).
16. Сервера Асер взломали: хакеры слили около 160 ГБ внутренних данных компании [Электронный ресурс]. URL: <https://www.securitylab.ru/news/536823.php/> (дата обращения: 16.05.2023).
17. Компания Purpose восстановила работу своей облачной платформы AZ Tower после недавней кибератаки [Электронный ресурс]. URL: <https://www.securitylab.ru/news/539245.php/> (дата обращения: 20.07.2023).
18. Уязвимости в инженерных утилитах Mitsubishi Electric могли быть опасны для технологического процесса [Электронный ресурс]. URL: <https://www.securitylab.ru/news/535426.php/> (дата обращения: 13.04.2023).
19. Российские компании атаковал вирус White Snake [Электронный ресурс]. URL: https://news.mail.ru/society/57242293/?frommail=1&utm_partner_id=440/ (дата обращения: 01.08.2023).

References

1. *Obshchie svedeniia ob informatsionnoi bezopasnosti (InfoSec)* [General information about information security (InfoSec)]. Available at: <https://www.microsoft.com/ru-ru/security/business/security-101/what-is-information-security-infosec/> (accessed: 02 May 2023). (In Russ.).
2. Federal Law of the Russian Federation dated July 27, 2006 No. 149-FZ «On information, information technologies and information protection». *Rossiiskaia gazeta* [Russian newspaper]. 2006, July 28. (In Russ.).
3. Federal Law of the Russian Federation of July 26, 2017 No. 187-FZ «On the security of critical information infrastructure of the Russian Federation». *Rossiiskaia gazeta* [Russian newspaper]. 2017, July 31. (In Russ.).
4. *Federal'nyi zakon ot Rossiiskoi Federatsii 21 iul'ia 1997 g. no 116-FZ (red. ot 29 dekabria 2022) «O promyshlennoi bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh obektov»* [Federal Law of the Russian Federation July 21, 1997 No. 116-FZ (as amended on December 29, 2022) «On the industrial safety of hazardous production facilities»]. Available at: <https://base.garant.ru/11900785/?ysclid=lmqcxovr3859029652/> (accessed: 02 May 2023). (In Russ.).
5. *Ukaz Prezidenta Rossiiskoi Federatsii ot 05 dekabria 2016 g. no 646. «Ob utverzhdenii Doktriny informatsionnoi bezopasnosti Rossiiskoi Federatsii»* [Decree of the President of the Russian Federation dated December 5, 2016 No. 646. «On approval of the Doctrine of Information Security of the Russian Federation»]. Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41460/> (accessed: 02 May 2023). (In Russ.).

6. GOST R ISO/IEC TO 18044-2007. Information technology. Methods and means of ensuring security. Information security incident management. Moscow, Standartinform Publ., 2009. M.: Standartinform, 2009. (In Russ.).
7. *Promyshlennost'* [Industry]. Available at: <https://www.evraas.ru/industries/manufacturing/> (accessed: 26 April 2023). (In Russ.).
8. *Aktual'nye kiberugrozy dlia promyshlennykh organizatsii: itogi 2022 goda* [Current cyber threats to industrial organizations: results of 2022]. Available at: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/industrial-cybersecurity-threats-2022/> (accessed: 24 April 2023). (In Russ.).
9. *Kiberugrozy dlia ASU i promyshlennykh predpriatii v 2023 godu* [Cyber threats to automated control systems and industrial enterprises in 2023]. Available at: <https://ics-cert.kaspersky.ru/publications/reports/2022/11/22/ics-cyberthreats-in-2023-what-to-expect/> (accessed: 15 May 2023). (In Russ.).
10. *Riski IB v promyshlennykh kompaniiakh* [Information security risks in industrial companies]. Available at: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/ics-risks-2021/> (accessed: 11 April 2023). (In Russ.).
11. *Rossiiskoi promyshlennosti obiavili kibervoinu* [Cyber war has been declared on Russian industry]. Available at: <https://expert.ru/2023/02/28/rossiyskoy-promyshlennosti-obyavili-kibervoinu/> (accessed: 07 April 2023). (In Russ.).
12. *Chislo kiberatak v Rossii i v mire* [The number of cyber attacks in Russia and in the world]. Available at: <https://www.tadviser.ru/index.php/> (accessed: 30 June 2023). (In Russ.).
13. *Blits-khak* [Blitz hack]. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/5927911/> (accessed: 13 April 2023). (In Russ.).
14. *Proizvoditel' oborudovaniia i PO dlia avtomatizatsii trgovli «Atol» podtverdil fakt vzloma IT-servisov kompanii* [Atol, a manufacturer of equipment and software for trade automation, confirmed the fact that the company's IT services were hacked]. Available at: <https://habr.com/ru/news/714028/> (accessed: 21 July 2023). (In Russ.).
15. *Nazvana «samaia zhelannaia tsel'» khakerov v rossiiskikh obektakh promyshlennosti* [The «most desirable target» of hackers in Russian industrial facilities has been named]. Available at: <https://www.gazeta.ru/tech/news/2023/06/20/20704028.shtml> (accessed: 21 July 2023). (In Russ.).
16. *Servera Acer vzlomali: khakery slili okolo 160 GB vnutrennikh dannnykh kompanii* [Acer servers were hacked: hackers leaked about 160 GB of the company's internal data]. Available at: <https://www.securitylab.ru/news/536823.php/> (accessed: 16 May 2023). (In Russ.).
17. *Kompaniia Purpose vosstanovila rabotu svoei oblachnoi platformy AZ Tower posle nedavnei kiberataki* [Purpose has restored its AZ Tower cloud platform after a recent cyber attack]. Available at: <https://www.securitylab.ru/news/539245.php/> (accessed: 20 July 2023). (In Russ.).
18. *Uiazvimosti v inzhenernykh utilitakh Mitsubishi Electric mogli byt' opasny dlia tekhnologicheskogo protsesssa* [Vulnerabilities in Mitsubishi Electric engineering utilities could be dangerous for the technological process]. Available at: <https://www.securitylab.ru/news/535426.php/> (accessed: 13 April 2023). (In Russ.).
19. *Rossiiskie kompanii atakoval virus White Snake* [Russian companies were attacked by the White Snake virus]. Available at: https://news.mail.ru/society/57242293/?frommail=1&utm_partner_id=440/ (accessed: 01 August 2023). (In Russ.).

Поступила в редакцию: 10.08.2023

Одобрена рецензентами: 19.09.2023

Принята к печати: 04.12.2023

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

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

УДК 550.344; 550.348; 622.235

УДАРНО-ВОЛНОВАЯ РЕЗКА: БЕЗОПАСНЫЕ СПАСАТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ ПОД ВОДОЙ

С.И. ДОРОШЕНКО, к.т.н., А.С. ИВАНОВ, В.А. МАЛЫХ, П.А. РОМАНЕНКОВ,
АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»

А.В. СКРИПКА, к.т.н., В.В. ЯХЕЕВ, к.т.н.,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»

Аннотация. Показано, что применение ударно-волновой резки под водой по сравнению с другими методами обладает рядом преимуществ, в частности, при выполнении взрывных работ на глубинах до 6000 метров, что может быть использовано для решения специальных задач в чрезвычайных ситуациях. Приведены результаты испытаний возможности зарядов по пробитию различных видов преград.

Ключевые слова: УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ЗАРЯД; ЗАРЯД ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА;
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ; ВОЛНА МАХА; ПОДВОДНЫЙ ВЗРЫВ.

Для цитирования: Дорошенко С.И. Ударно-волновая резка: безопасные спасательные работы под водой / С.И. Дорошенко, А.С. Иванов, В.А. Малых, П.А. Романенков, А.В. Скрипка, В.В. Яхеев // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 2. С. 44–60.



SHOCK WAVE CUTTING: SAFE UNDERWATER RESCUE OPERATIONS

S.I. DOROSHENKO, PhD in Engineering,
A.S. IVANOV, V.A. MALYKH, P.A. ROMANENKOV,
JSC «Scientific and Production Enterprise
«Radar mms»

A.V. SKRIPKA, PhD in Engineering,
V.V. YAHEEV, PhD in Engineering,
Saint-Petersburg university of State fire
service of EMERCOM of Russia

Abstract. *It is shown that the use of shock wave cutting under water in comparison with other methods has a number of advantages, especially when performing blasting operations at depths up to 6000 meters, which can be used to solve special tasks in emergency situations. The results of tests of the possibility of charges to penetrate various types of obstacles are presented.*

Keywords: SHOCK-WAVE CHARGE; BILINEAR CHARGE; MATHEMATICAL MODEL; MACH WAVE; ROCK; CONCRETE BLOCK; UNDERWATER EXPLOSION.

For citation: Doroshenko S.I., Ivanov A.A., Malykh V.A., Romanenkov P.A., Skripka A.V., Yaheev V.V. Shock wave cutting: safe underwater rescue operations. *Perspektivnyye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti* [Promising technologies for security systems], 2023, N 2, pp. 44–60 (In Russ.).

Введение

Сегодня более 60% мирового грузооборота совершается водным транспортом. Морские просторы по приблизительным расчетам бороздят более 60 000 судов, рассчитанных на перевозку крупногабаритного фрахта, а также чуть более 20 млн мелких судов, выполняющих раз-

Крупнейшие в мире катастрофы на воде

Дата	Судно, место, причина	Количество погибших
12.12.1939	«Индибирка», пароход СССР, вблизи о. Хоккайдо, при шторме	745
13.08.1950	«Маяковский», теплоход, г. Рига, перевернулся	147
05.06.1983	«Александр Суворов», теплоход, река Волга, столкновение с мостом	600
31.08.1986	«Адмирал Нахимов», теплоход, Цемесская бухта, столкновение с баклером «Петр Васев» (рис. 1)	432
20.12.1987	«Донья Пас», паром, пролив Таблас, столкновение с танкером (рис. 2)	4386
20.09.2002	«Джула», паром, у берегов Гамбии, затонул от износа	1863
21.06.2008	«Принцесса Звезд», паром, побережье острова Сибуян (арх. Ромблон), затонул во время тайфуна	805
10.07.2011	«Булгария», теплоход Казань-Болгар, перевернулся	122
16.04.2014	«Севоль», паром, у юго-западного побережья Корейского полуострова, затонул от перегруза	313
01.06.2015	«Звезда Востока», теплоход, река Янцзы в КНР, перевернулся (рис. 3)	442



Рис. 1. Теплоход «Адмирал Нахимов»



Рис. 2. Паром «Донья Пас»

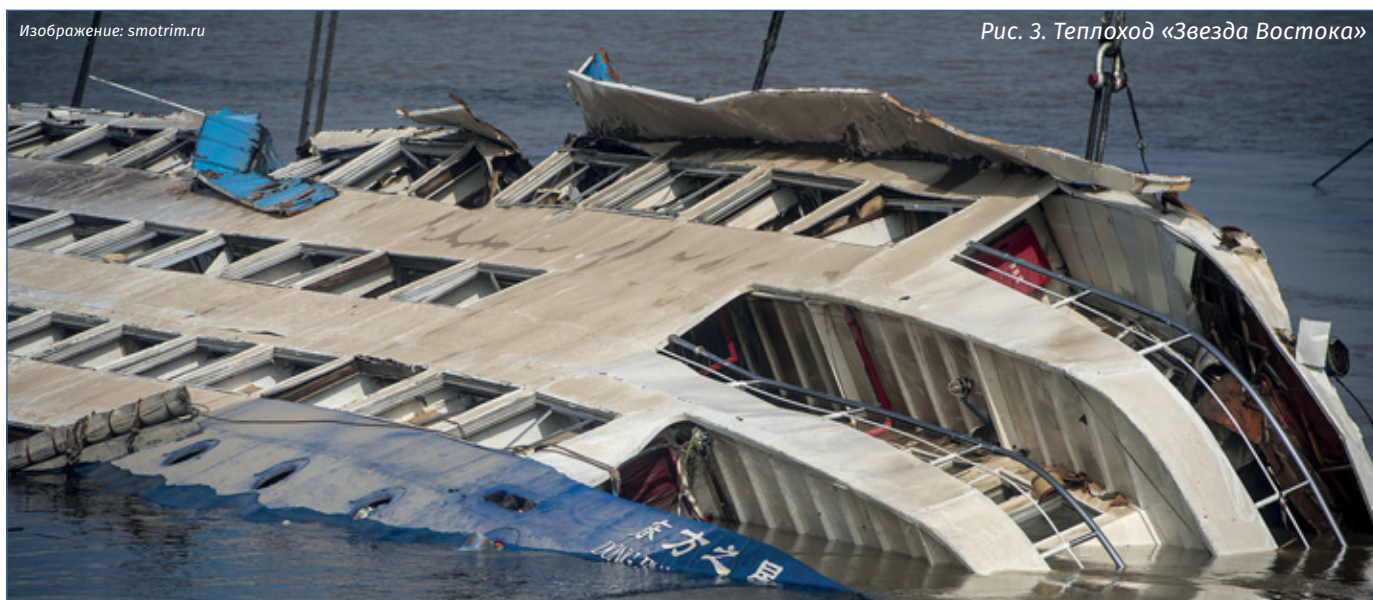


Рис. 3. Теплоход «Звезда Востока»

848 человек

в мире стали жертвами катастроф за первое полугодие 2023 г.

нообразные задачи (прогулочные катера, парусные яхты, лодки). Каждый день в акваториях пребывают 30 000 судов, а общая численность экипажей на них превышает 1 млн человек.

Насколько это безопасно, какова статистика аварий водного транспорта, причины катастроф и способы спасательных операций?

Статистика аварий выделяет основные причины происшествий на воде:

природный фактор – достаточно часто виновником происшествий становится стихия: штормы, ураганы, туман, лед. Сюда также относят и столкновение судна на пути следования с айсбергами и подводными скалами;

человеческий фактор – ошибки при проектировании, последующей эксплуатации судна. К чрезвычайным ситуациям (ЧС) могут привести неверные капитанские решения или ошибочные действия членов экипажа, халатность при проведении плановых технических осмотров и ремонтов, перегруз свыше допустимой нормы.

Статистика аварий водного транспорта, по данным Регистра судоходства Ллойда, содержит информацию касательно ежегодной гибели 300–400 и авариях 8000 судов. Количество человеческих жертв также ужасает. За первое полугодие 2023 г. в мире потерпели крушение 77 кораблей, жертвами которых стали 848 человек. Пять крупнейших катастроф за

последние 20 лет унесли около 9000 жизней. В табл. 1 представлены резонансные кораблекрушения с 1939 по 2020 г. [1].

По статистике самым безопасным видом транспорта признан железнодорожный. На втором месте – самолеты. Самым рискованным транспортом признаны мотоциклы и мопеды. Сведения статистики представлены на рис. 4.

Статистика аварий водного транспорта имеет данные также и о гибели военных надводных кораблей и подводных лодок (ПЛ). За последние 60 лет в результате крушений морских сил и средств ВМФ СССР и РФ погибли сотни членов экипажа (табл. 2) [1].

По оценке специалистов Научно-исследовательского института (спасения и подводных технологий) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», за последние 20 лет доля перевернувшихся кораблей и судов составила 17% всех аварий на водном транспорте. Причем количество

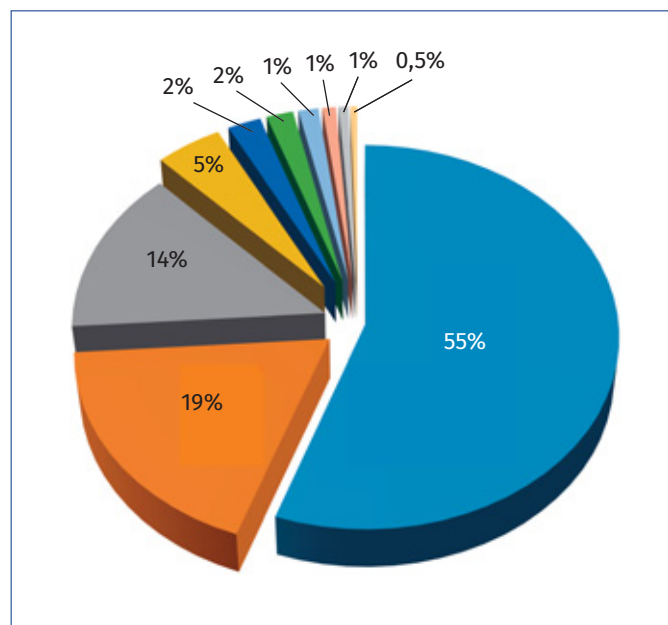


Рис. 4. Диаграмма смертности на различных видах транспорта на каждые 1,5 млрд км пути:

- – мотоцикл; ■ – велосипед; ■ – метро; ■ – водное судно;
- – космический корабль; ■ – микробус;
- – автомобиль; ■ – автобус; ■ – самолет; ■ – поезд



Рис. 5. Подводная лодка Б-37



Рис. 6. Подводная лодка К-141 «Курск»

За последние 60 лет в результате крушений морских сил и средств Военно-морского флота СССР и Российской Федерации погибли десятки кораблей и сотни членов экипажа.

Таблица 2

Крупные аварии кораблей Военно-морского флота СССР и России

Дата	Корабль, место	Количество погибших
01.12.1952	ПЛ С-117, Японское море	52
29.10.1955	Линкор «Новороссийск», Севастополь	617
27.01.1961	ПЛ С-80, Баренцево море	68
11.01.1962	ПЛ Б-37, С-350, военно-морская база, Северный флот (рис. 5)	122
08.03.1968	ПЛ К-129, Гавайский остров	98
12.04.1970	ПЛ К-8, Бискайский залив	52
06.10.1986	ПЛ К-219, Саргасово море	40
16.04.1987	Малый ракетный катер «Муссон», Тихий океан	39
07.04.1989	ПЛ К-278 «Комсомолец», Норвежское море	42
12.08.2000	ПЛ К-141 «Курск», Баренцево море (рис. 6)	118



Рис. 7. Теплоход «Булгария»

погибших в этом случае составило 50% от общего числа жертв. Большое число смертей именно при опрокидывании корабля объясняется его внезапностью и невозможностью быстро спасти людей с тонущего борта.

Пассажиры и члены команды массово гибнут как в морских, так и в речных акваториях. Яркий пример – 122 человека с теплохода «Булгария» (рис. 7) на Волге в 2011 г. Судно перевернулось за считанные секунды, и люди не смогли выбраться на поверхность. В 2015 г. лайнер «Звезда Востока» перевернулся на китайской реке Янцзы, утопив 442 пассажира и члена экипажа. Из 456 человек спастись удалось только 14-ти. Большинство просто не успели подняться на верхнюю палубу и оказались запертыми в отсеках.

Тяжелейшая катастрофа, унесшая жизни 4386 человек, случилась в 1987 г. у берегов Филиппин. В результате столкновения парома «Донья Пас» (см. рис. 2) и танкера с бензином произошло разрушение судов и пролив нефтепродуктов в мо-

ре. Бензин загорелся и тысячи людей не могли прыгнуть в воду. Те же смельчаки, которые оказались за бортом, были растерзаны акулами, которые кишат в проливе Таблас. Спасатели смогли достать из воды только 300 обглоданных тел. Тысячи были сожжены заживо. Спасти удалось только 24 участникам тех событий.

Во время миграции беженцев с Ближнего Востока, люди тонут тысячами. Только в 2015 г. у берегов Италии на одном из кораблей, столкнувшемся с торговым судном, погибло почти 1000 человек. По словам выжившего, многие оказались заперты в нижних отсеках. Более 600 человек погибло 14 июня 2023 г., когда судно с мигрантами перевернулось и затонуло в Ионическом море у берегов города Пилоса (Греция).

Способы спасения людей при кораблекрушении

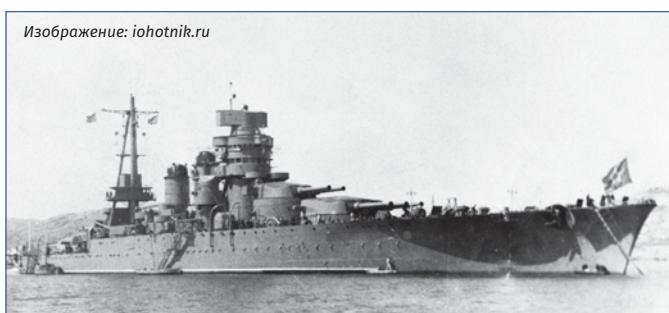
При опрокидывании судов некоторые отсеки не полностью заполняются водой.

В верхней части может образоваться воздушная подушка. Если находящиеся там люди не успели своевременно покинуть аварийное судно и остаются в своеобразной ловушке после опрокидывания, то в течение некоторого времени они могут использовать остатки воздуха, чтобы дожидаться помощи.

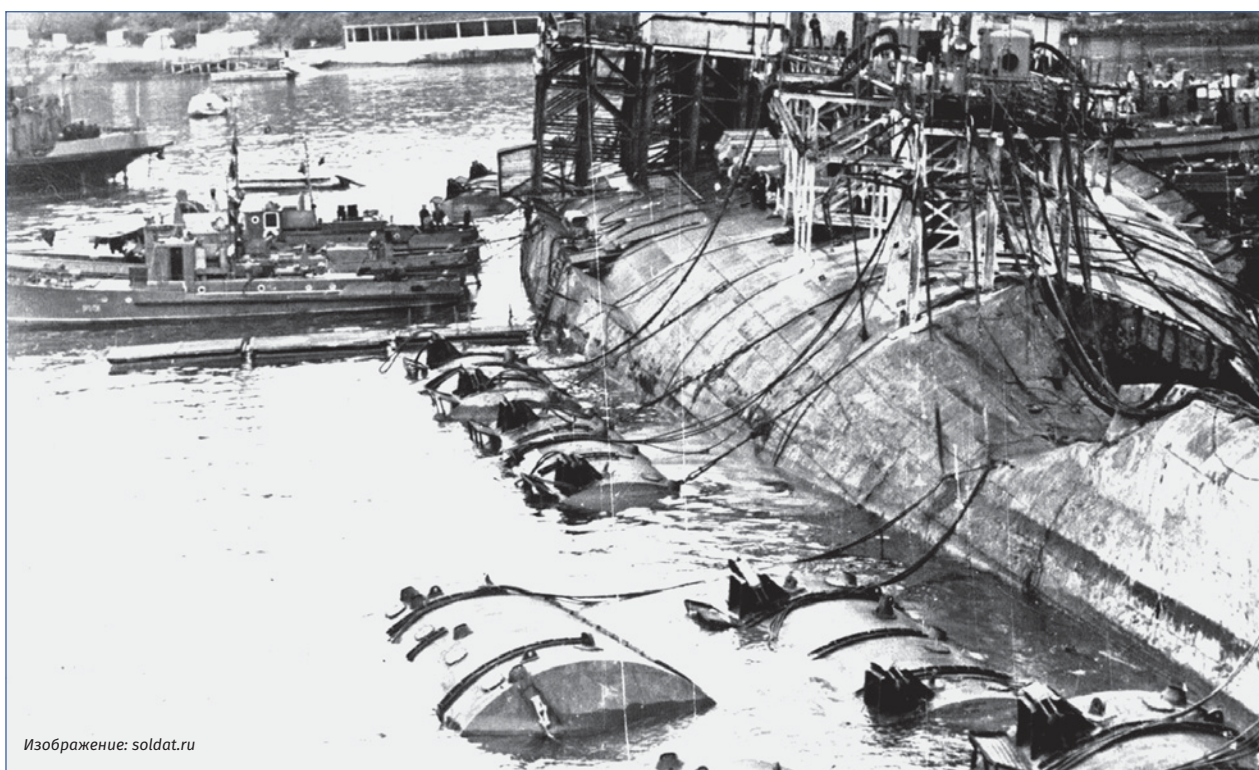
В большинстве случаев в затопленных помещениях люди остаются беспомощны и не могут существенно повлиять

на ситуацию. Между тем их спасение из перевернувшегося судна представляет собой довольно сложную и трудоемкую операцию с большой степенью риска, поскольку современные корабли не имеют специальных приспособлений для эвакуации экипажа через днище в том случае, если они легли на бок или перевернулись. В этих случаях спасательные операции предполагают изучение конструктивных особенностей судна и прорезание эвакуационных отверстий в местах, где это можно сделать проще и быстрее всего.

Кроме того, существующие способы и устройства спасения людей из опрокинувшегося корабля предусматривают использование водолазов [2]. Их активно применяли, например, в ходе гибели линкора «Новороссийск» (рис. 8) в Севастополе. При этом операция по спасению предусматривает:



а



б

Рис. 8. Линкор «Новороссийск» до (а) и после (б) трагедии

подход спасательного корабля к опрокинувшемуся судну и обеспечение надежного удержания его на минимально возможном, безопасном расстоянии;

получение объективных данных о наличии и местонахождении живых людей в отсеках погибающего корабля;

разработку плана, маршрута движения и оснащения водолазов, с учетом прогноза минимально возможного оставшегося времени пребывания корабля на плаву;

переход лидирующей группы (2–3 чел.) водолазов по заданному маршруту внутри корабля до местонахождения людей, с выставлением постов (2–3 чел.) из обеспечивающих водолазов на сложных участках перехода;

доставка водолазами дыхательных аппаратов, инструктаж и подключение к ним спасаемых (рис. 9);

поочередное выведение спасаемых через затопленные отсеки корабля на спасательное судно.

Следует заметить, что прорезание в днищевых корпусных конструкциях больших отверстий и выведение через них людей чрезвычайно опасно для жизни водолазов, так как прогнозировать реальную продолжительность нахождения опрокинувшегося корабля на плаву проблематично.

Вероятность спасения людей через вырезанные отверстия в днищевых корпусных конструкциях также мала, так как сам процесс с применением имеющихся технологий является довольно трудоемким и продолжительным и может вызвать стравливание воздушной подушки и потерю плавучести корабля. Герметичная установка шлюзовой камеры над планируемым местом выреза отверстия для предотвращения стравливания подушки при волнении моря проблематична и опасна. А работы под водой еще более затратные по времени.



Изображение: фотобанк ЛОРИ

Рис. 9. Спуск водолаза для проведения спасательных работ

Для решения данных задач должны быть найдены надежные, эффективные, простые в применении взрывные средства, обеспечивающие одновременное, практически мгновенное создание больших отверстий. Но особенностью взрыва под водой является тот факт, что имеющиеся специальные заряды для резки преград (кумулятивы) в жидкости не работают. Вследствие чего сегодня применяются накладные фигурные (удлиненные) заряды. При этом требуется выполнять затратные по времени мероприятия по их формированию и креплению. В комплекты удлиненных зарядов средства крепления не входят. Воздействие таких фугасов ударной волной и осколочным воздействием от разрушения преграды может травмировать спасаемых.

Заряды ударно-волновой резки

Для решения сложнейших спасательных работ под водой в ЧС и выполнения специальных взрывных работ рассмот-

Порядок испытаний

№ п/п	Тип преграды	Количество испытаний	Количество зарядов, шт., (длина, мм)	Испытание
1	Стальная труба $\varnothing 530$ мм и толщиной 10 мм	1	4 (600)	Испытание на пробитие преграды зарядом ЗУВР под водой
2	Стальная труба $\varnothing 530$ мм и толщиной 10 мм	1	1 (600), 2 (300)	Испытание на пробитие преграды зарядом ЗУВР под водой и на прохождение детонационной волны через зазор
3	Элемент обшивки вертолета, подкрепленный силовым набором	1	2 (300)	Испытание на пробитие преграды зарядом ЗУВР под водой
4	Элемент обшивки судна из стеклопластика 10 мм	1	1 (300)	Испытание на пробитие преграды зарядом ЗУВР под водой

рим результаты применения инновационной технологии – ударно-волновой резки взрывом. В результате теоретических и экспериментальных исследований в Балтийском государственном техническом университете «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (БГТУ «ВОЕНМЕХ») с участием специалистов Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России и АО «НПП «Радар ммс» разработаны физические и математические модели, описываемые системами уравнений для работ под водой, создана конструкция заряда ударно-волновой резки (ЗУВР) [3–6].

Одно из главных достоинств способа, не имеющих аналогов в мире, – возможность выполнения взрывных работ под водой, на глубинах до 6000 м. Для разрушения преграды под водой с обеспечением возможности проникновения спасателей при ЧС внутрь затонувшего корабля в настоящее время потребуется мощный сосредоточенный заряд или специально изготовленный фигурный заряд (что технологически сложнее), при этом в обоих случаях за преградой будут развигаться избыточные давления ударной волны. Кроме того, спасаемые люди бу-

дут испытывать осколочное воздействие от разрушаемой преграды.

В журнале «Перспективные технологии для систем безопасности» мы уже познакомили читателей с инновационной технологией разрушения пород и материалов методом ударно-волновой резки. Привели теоретические основы метода, позволяющие в щадящем режиме вести взрывные работы по резке конструкций под водой, в том числе на больших глубинах [7]. Именно ЗУВР могут выступить панацеей для решения сложных задач под водой, в том числе спасении людей в случае ЧС. Учитывая тот факт, что уже имеются разработанные и испытанные два типоразмера для резки конструкций толщиной до 10 и 30 мм (в том числе разработана и изготовлена оснастка для серийного изготовления), можно говорить о создании линейки ЗУВР для различных задач.

Испытания

Испытания ЗУВР под водой проводили БГТУ «ВОЕНМЕХ» и ФГУП «СКТБ «Технолог» при участии специалистов ФГБОУ

ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России» и АО «НПП «Радар ммс».

При проведении испытаний определялись возможности зарядов по пробитию различных видов преград, в том числе прохождения детонационной волны в угловых соединениях макетов зарядов.

Для этого последовательно, в соответствии с табл. 3, производились подрывы зарядов в водной среде.

При подготовке зарядов к испытаниям проверялась эластичность заряда путем оборачивания вокруг шаблона Ø100 мм на 180°.

В ходе разработки порядка действий по определению возможности зарядов при пробитии различных видов преград выставлялись зазоры между зарядами (для испытания № 2) при помощи калиброванных пластин, по временной схеме производилось крепление зарядов к поверхности преград и инициирующих устройств заряда.

Схемы проведения испытаний (укладки макетов зарядов)

Испытание № 1 на пробитие заряда ЗУВР под водой преграды (стальной трубы Ø530 мм и толщиной 10 мм). Осуществлялся квадратный рез 600×600 мм. Детонатор устанавливался в одном из углов ЗУВР (рис. 10).

Испытание № 2 на пробитие заряда ЗУВР под водой преграды (стальной трубы Ø530 мм и толщиной 10 мм). Осуществляется «П»-образный рез. Зазоры между зарядами № 1 и 2 – 1 мм, между зарядами № 2 и 3 – 2 мм (выставлялись с помощью калиброванной пластины). Детонатор устанавливался по центру заряда № 2 (рис. 11).

Испытание № 3 на пробитие макетом заряда ЗУВР под водой преграды (элемента обшивки вертолета, подкрепленной

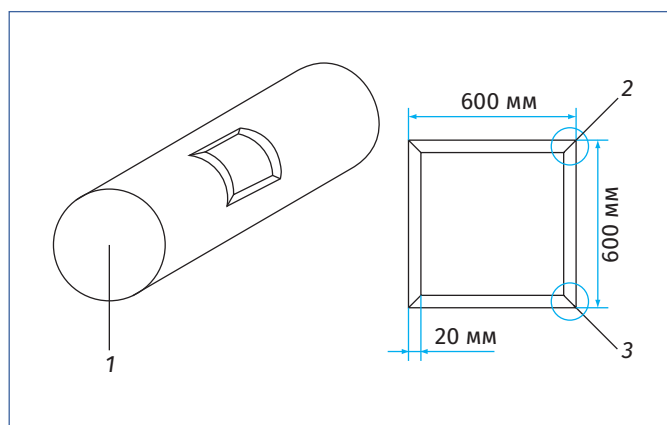


Рис. 10. Схема установки заряда № 1:
1 – труба Ø530 мм; 2 – место установки детонатора;
3 – соединение без зазора

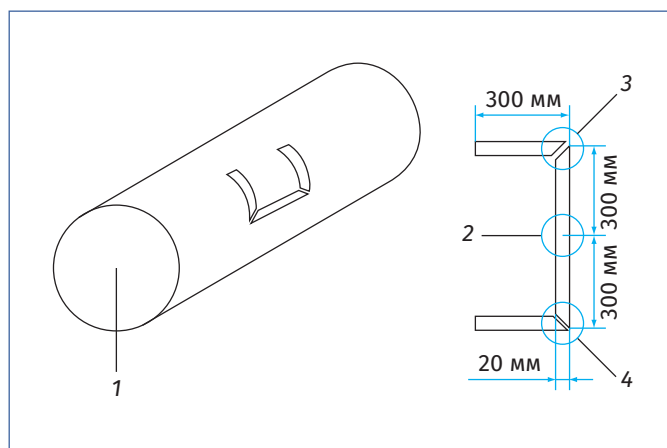


Рис. 11. Схема установки заряда № 2:
1 – труба Ø530 мм; 2 – место установки детонатора;
3 – соединение с зазором 2 мм;
4 – соединение с зазором 1 мм

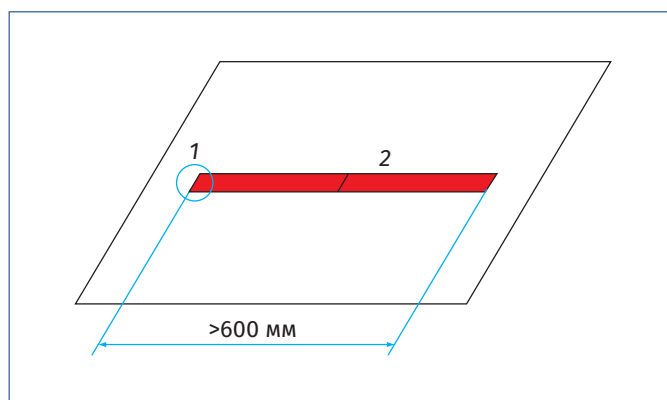


Рис. 12. Схема установки заряда № 3:
1 – место установки; 2 – заряд (допускается составной)

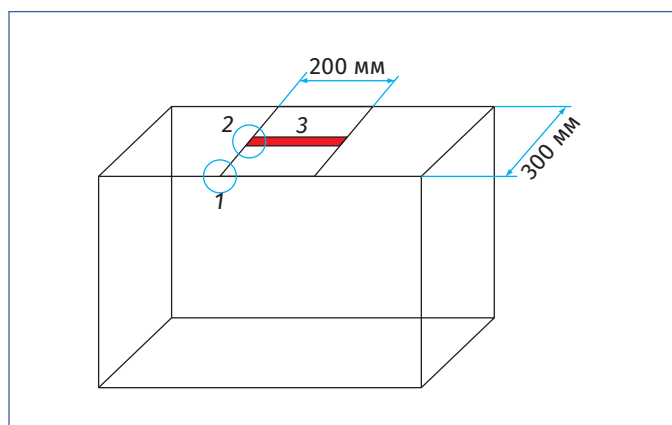


Рис. 13. Схема установки заряда № 4:
1 – крепление к каркасу на болты;
2 – место установки; 3 – заряд

силовым набором). Пробитие осуществлялось прямым зарядом (прямой рез). Детонатор устанавливался на одном из концов заряда (рис. 12).

Испытание № 4 на пробитие заряда под водой преграды (элемента обшивки

судна из стеклопластика 10 мм). Пробитие осуществлялось прямым укороченным зарядом (прямой рез). Детонатор устанавливался в средней части заряда (рис. 13).

Результаты испытаний

Во время проведения испытаний температура воздуха составляла 6 °С, а температура воды 8 °С. Результаты испытаний представлены в табл. 4.

На рис. 14 показаны подготовленные к подрыву сборки, закрепленные на преградах.

На рис. 15 представлены результаты испытаний макетов зарядов ЗУВР.

Как видно из опытов, ЗУВР успешно справился с задачами, но нужно отметить, что в экспериментах применялись заряды, изготовленные по разработанной физической и математической моделям, описываемые системами уравне-

Таблица 4

Результаты испытаний

Номер испытания	Глубина погружения, м	Масса ВВ, г	Расположение ВВ	Наличие зазоров между макетом заряда и преградой	Результат пробития преграды
1	0,5	588	Схема 1	Зазор 1 мм (самоклеющаяся магнитная лента)	Полное пробитие, вырез «окна» в преграде
2	0,5	295	Схема 2	–	Полное пробитие и фрагментирование внешней оболочки преграды, имеется надрез силового набора на краю преграды на глубину 30 мм, остальные части силового набора были полностью пробиты и фрагментированы; детонация макетов ЗУВР распространялась через зазоры величиной 1 и 2 мм
3	0,5	148	Схема 3	–	Полное пробитие внешней оболочки и силового набора преграды
4	0,5	74,5	Схема 4	–	Полное пробитие и фрагментирование преграды

Примечание. Схема 2 была изменена, стальную трубу заменили на элемент обшивки вертолета, подкрепленный силовым набором.

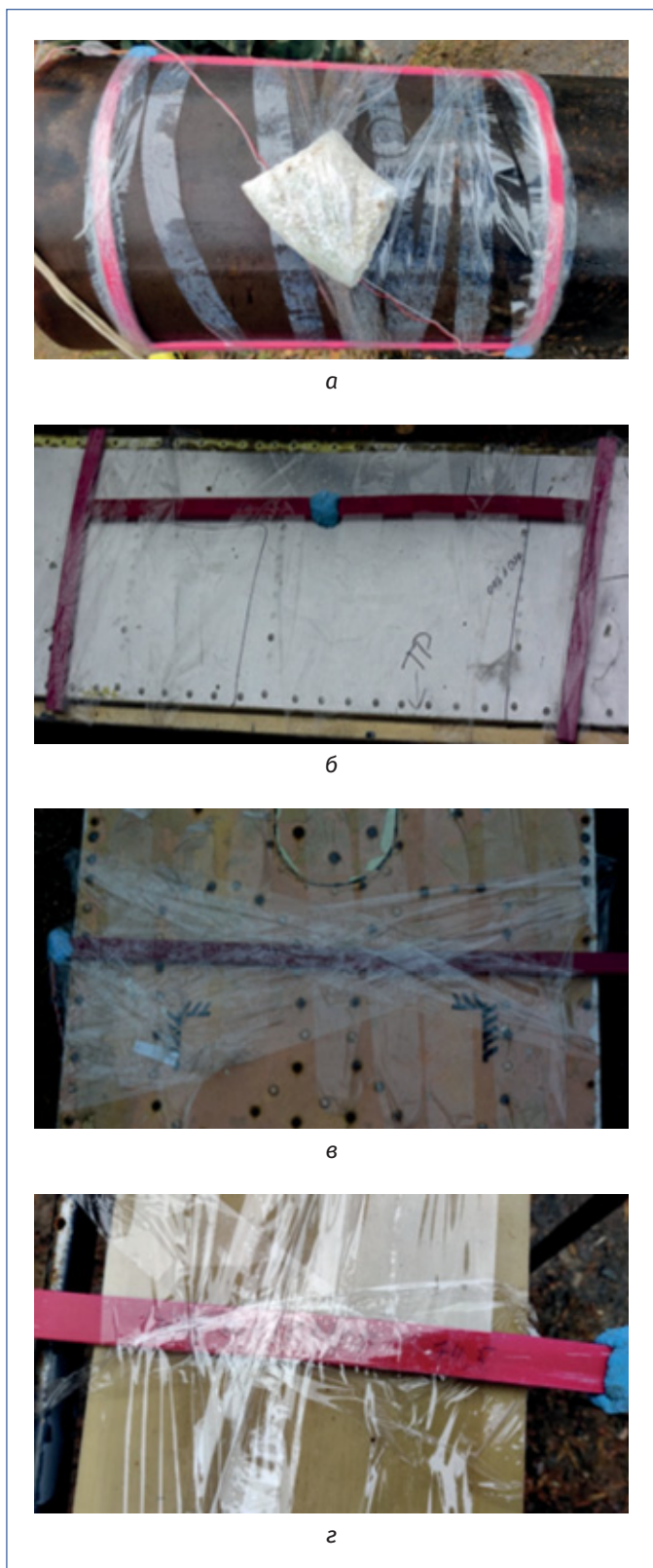


Рис. 14. Подготовка к подрыву: а – схема 1; б – схема 2; в – схема 3; г – схема 4

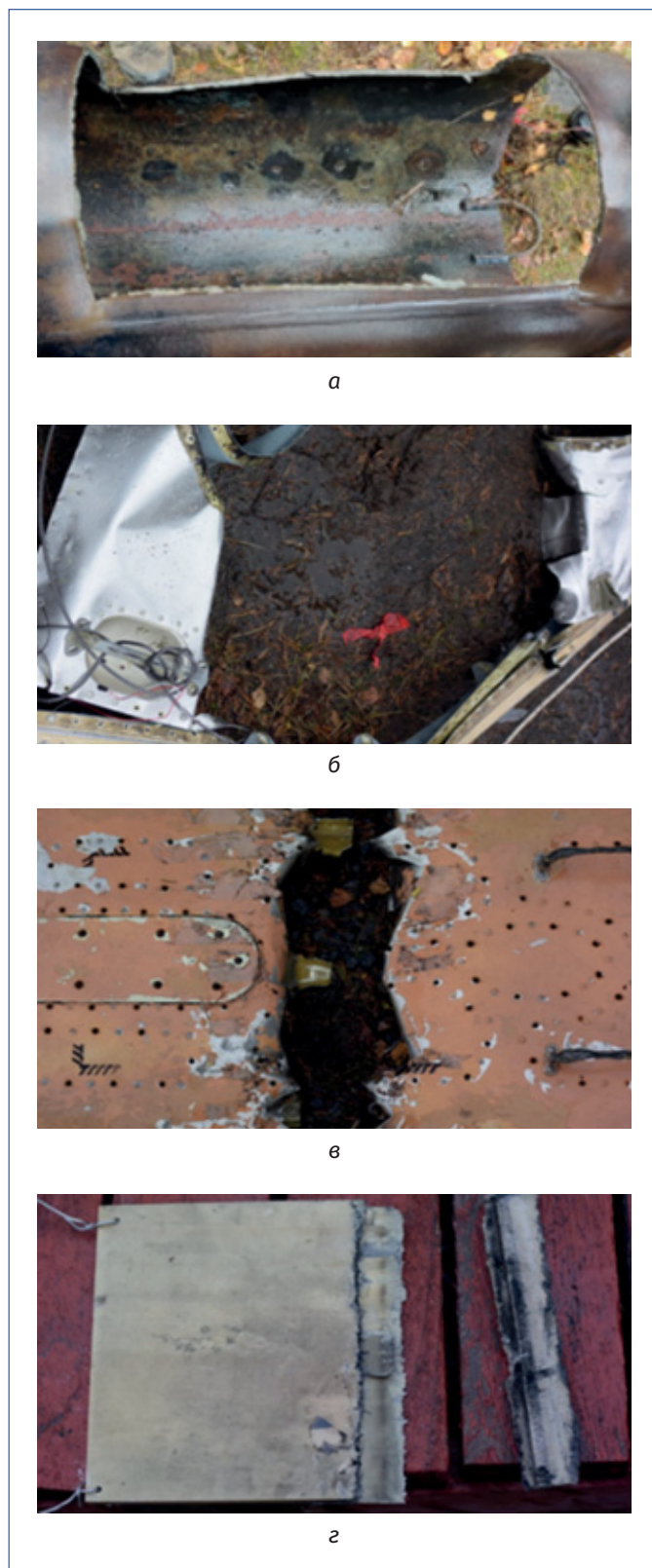


Рис. 15. Результаты испытаний: а – схема 1; б – схема 2; в – схема 3; г – схема 4



Рис. 16. Серийные образцы ЗУВР

ний, представленными в предыдущем издании журнала [7].

В ходе изготовления зарядов для испытаний не учитывалась необходимость

технологичности ведения взрывных работ с обеспечением высокого темпа работ (на образцах мы видим, что для крепления электродетонатора (ЭД) применен дополнительный детонатор из пластикового ВВ). В серийных образцах все эти проблемы решены [8]. Последние представлены на рис. 16.

Сравнительные показатели способов для резки взрывом под водой рассмотрим с учетом уже состоявшихся экспериментов, которые проводились при участии специалистов БГТУ «ВОЕНМЕХ», АО «НПП «Радар ммс» и ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России», на испытательной площадке ФГУП «СКТБ «Технолог». В ходе испытаний зарядом ЗУВР под водой было вырезано отверстие в стальной трубе периметром реза 600×600 мм (испытание № 1 рис. 14, а и 15, а). Длина реза составила 2400 мм. Расход взрывчатого вещества составил 600 гр. Применялся первый типоразмер ЗУВР для реза преград толщиной до 10 мм.

Расчет расхода ВВ определяем для аналогичного реза контактными фигурным зарядом по формуле 1 для перебивания листов толщиной до 20 мм [9]:

$$C = 4 \cdot 20F, \quad (1)$$

Т а б л и ц а 5

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

Примечание: Заряды СЗ-3а, СЗ-6, СЗ-6м могут применяться для взрывных работ под водой на глубинах до 10 м.

где C – вес заряда в граммах; F – площадь перебиваемого сечения листа по плоскости перебивания в квадратных сантиметрах; k – коэффициент при отсутствии подкрепления с обратной стороны заряды [9].

При использовании готовых зарядов из пластичного ВВ (пластит-4) в мягкой оболочке СЗ-6м диаметром 28 мм и длиной 1200 мм вес ВВ – 6 кг понадобится четыре заряда [9]. Основные характеристики стандартных зарядов представлены в табл. 5.

Безопасные расстояния в воде для водолазов и ихтиофауны при данных подводных работах для больших зарядов ВВ рассчитываются по формуле [9]:

$$L = 250\sqrt[3]{C}, \quad (2)$$

где L – безопасное расстояние в метрах; C – вес взрывающего заряда в килограммах.

Расчет для малых зарядов производится по формулам для избыточного давления во фронте Δp_ϕ и импульса фазы сжатия i , общий вид которых предложен Р. Коулом [3, 10]:

$$\Delta p_\phi = 31995 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\omega_3}}{r} \right)^{1,043}, \text{ кПа}; \quad (3)$$

$$i = 8986 \cdot \sqrt[3]{\omega_3} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\omega_3}}{r} \right)^{0,0964}, \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad (4)$$

где r – расстояние от места взрыва до водолаза; ω_3 – эквивалентная масса заряда взрывчатого вещества (ВВ), учитывающая расположение заряда и его тротильный эквивалент. Постоянные коэффициенты в представленных зависимостях определены для зарядов тротила на основе опытных данных.

Как показывают исследования, при избыточном давлении во фронте ударной

Таблица 6

Значения коэффициента η_1 для некоторых грунтов

Тип грунта	η_1
Скальный грунт	0,85...0,90
Глинистый грунт	0,65...0,70
Песчаный грунт	0,55...0,60

При использовании готовых зарядов из пластичного ВВ в мягкой оболочке понадобится четыре заряда.

волны менее 345 кПа и импульсе менее 215 Па·с повреждений организма человека не наблюдается. Безопасное расстояние будет определяться подстановкой указанных значений в зависимости (3), (4), что дает:

$$R_0 = \max \left\{ \begin{array}{l} 77 \cdot \sqrt[3]{\omega_3} \\ 48 \cdot \left(\sqrt[3]{\omega_3} \right)^{2,037} \end{array} \right. \quad (5)$$

При расчете эквивалентной массы заряда ω_3 необходимо учитывать тротильный эквивалент используемого ВВ и расположение заряда.

При взрыве в воде на дне водоёма в расчётах ударной волны используют массу заряда, увеличенную в $2\eta_1$ раза, где η_1 – коэффициент, учитывающий акустическую жесткость дна (табл. 6).

При взрыве на поверхности водоёма (рис. 17) расчеты параметров ударной волны в направлении нормали ($\varphi = 0$) проводят при массе заряда, равной $(0,3...0,35) \omega_3$, что позволяет учесть волну разгрузки, понижающую давление в ударной волне.

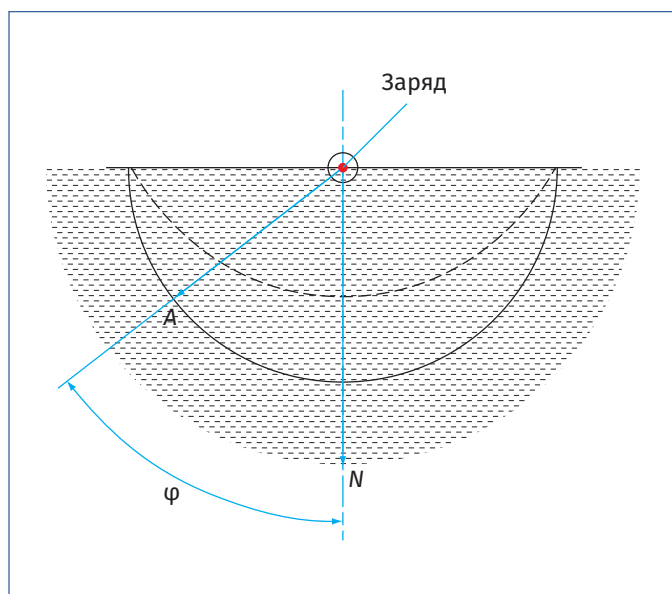


Рис. 17. Взрыв заряда на поверхности водоема

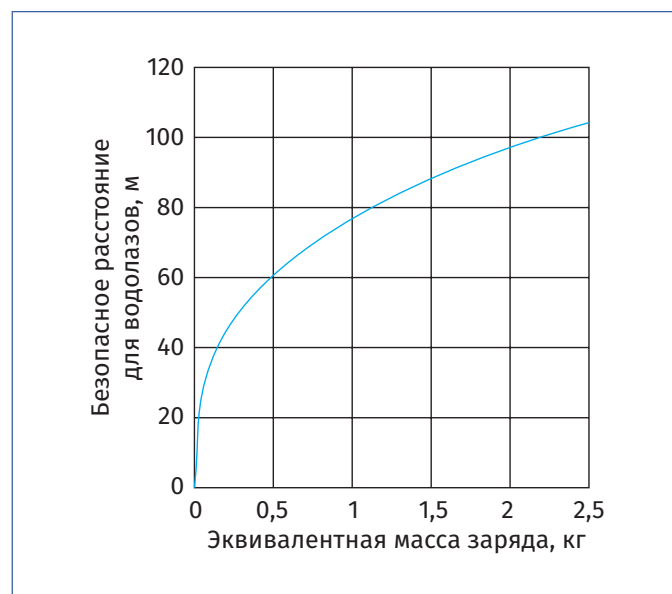


Рис. 18. Безопасное расстояние для водолазов

Таблица 7

Расчетные показатели зарядов

Наименование заряда	Масса ВВ, кг	Безопасные расстояния, м	Соотношение по массе ВВ	Соотношение по безопасным расстояниям
СЗ-6м	24	725	40	11
Фигурный	19,2	675	32	10
ЗУВР-1	0,6	65	–	–

При работах с зарядами малых масс наиболее опасным фактором для человека является избыточное давление, график зависимости безопасного расстояния от массы ВВ представлен на рис. 18.

При работе с зарядами до 100 г водолазы должны находиться на расстоянии не менее 40 м. Для испытанной эквивалентной массы заряда, равной 600 г, безопасное расстояние составляет не менее 65 м. Масса ВВ ЗУВР меньше в 32 раза по сравнению с контактным фигурным зарядом и в 40 раз при применении готового СЗ-6м. Расчетные показатели приведены

в табл. 7 для ЗУВР подтверждены экспериментом.

При этом следует отметить, ЗУВР для работы с большими толщинами 200 мм и более (описание в предыдущей статье [7]) может быть быстро изготовлен промышленностью для специальных работ, что обеспечивается простотой конструкции заряда. Кроме того, возможно и разовое изготовление ЗУВР на месте ведения работ с применением пластичных ВВ. Соотношение по массе ВВ для таких зарядов будет значительно больше в сравнении с приведенными.

Выводы

Резка с помощью ЗУВР под водой по сравнению с другими видами зарядов обладает рядом преимуществ, которые могут быть использованы в интересах решения специальных задач под водой, в том числе при ЧС:

имеет расход ВВ в 30–40 раз ниже при разрушении стальных конструкций для подводных работ;

исключает образование высокоскоростных осколков и обладает минимальным запреградным воздействием ударных волн при оптимальной (минимально-возможной) величине заряда;

готов к работам под водой, в том числе на глубинах до 6000 м;

технологичность и простота применения, не требует дополнительного оборудования, что обеспечивает высокий темп выполнения задач;

может обеспечить мгновенное проделывание необходимого количества больших отверстий одновременно, что не допустит стравливания подушки до начала эвакуационных работ;

значительно снижает вредное воздействие на экологию и, в частности, на ихтиофауну, особенно при специальных работах по большим толщинам.

Список литературы

1. Аварии кораблей и судов ВМФ РФ и СССР; Последнее погружение, аварии и катастрофы подводных лодок в СССР и России; Аварии на речном транспорте России в 2001–2014 гг.; Хронология крушения морских пассажирских судов с 2000 г.; Аварии кораблей НАТО; Хронология аварий и крушений российских рыболовецких судов [Электронный ресурс] // ТАСС-Досье/Происшествия. URL: <https://tass.ru/tass-dos-e-proisshestiya/> (дата обращения: 11.09.2023).
2. Муру Н.П. Гибель и подъем линкора «Новороссийск» // Катастрофы на море: сборник. СПб.: Судостроение, 1998.
3. Физика взрыва: в 2-х т. / под. ред. Л.П. Орленко. 3-е изд., переработ. М.: «Наука», 2004.
4. Михайлов Н.П. Основы математического моделирования процессов взрыва и удара: учебник. СПб.: Балт. техн. гос. ун-т, 2012. 202 с.
5. К вопросу эффективной ликвидации ЧС природного характера на основе инновационных технологий ударно-волновой резки / С.И. Дорошенко [и др.] // Мат-лы III Всерос. науч.-практич. конф. с межд. уч. «Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций». Воронеж: Воронежский институт ГПС МЧС России, 2014. С. 241–244.
6. Михайлов Н.П., Дорошенко С.И., Бригадин И.В. Совершенствование технологии резки, сварки и упрочнения металлов // Взрывное дело. 2013. № 109/67. С. 101–117.
7. Дорошенко С.И., Иванов А.С., Малых В.А. Ударно-волновая резка – инновационный инструмент эффективных и безопасных работ // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 1. С. 110–121.
8. Заряд для разрезания твердых материалов: пат. 2701600 с2 Рос. Федерация; заявл.03.07.2017; опубл. 30.09.2019.
9. Руководство по подрывным работам (ППР-69) / Машевский В.Ф. М.: МО СССР, 1968. С. 23, 35, 142, 145.
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. С. 84–88.

References

1. Accidents of ships and vessels of the Navy of the Russian Federation and the USSR; The last dive, accidents and disasters of submarines in the USSR and Russia; Accidents on Russian river transport in 2001–2014; Chronology of wrecks of passenger ships since 2000; Accidents of NATO ships; Chronology of accidents and wrecks of Russian fishing vessels. TASS-Dos'e/Proisshestiya [TASS-Dossier/Incidents]. Available at: <https://tass.ru/tass-dos-e-proisshestiya/> (accessed: 11 September 2023). (In Russ.).
2. Muru N.P. The death and rise of the battleship Novorossiysk. *Katastrofy na more: sbornik* [Disasters at sea: collection]. St. Petersburg: Shipbuilding, Publ., 1998. (In Russ.).

3. *Fizika vzryva: v 2-kh t.* [Physics of explosion: in 2 volumes], ed. by L.P. Orlenko, 3rd ed., pererabot. Moscow, «Nauka» Publ, 2004. (In Russ.).

4. Mikhailov N.P. *Osnovy matematicheskogo modelirovaniia protsessov vzryva i udara: uchebnik* [Fundamentals of mathematical modeling of explosion and impact processes: textbook]. St. Petersburg, Balt. tekhn. gos. un-t., 2012, 202 p. (In Russ.).

5. On the issue of effective elimination of natural emergencies on the basis of innovative shock-wave cutting technologies. S.I. Doroshenko et al. *Mat-ly III Vseros. nauch.-praktich. konf. s mezhd. uch. «Problemy obespecheniia bezopasnosti pri likvidatsii posledstviu chrezvychainykh situatsii»*. [Materials of the III All-Russian Scientific and Practical conference with the international department «Problems of ensuring safety in the aftermath of emergencies»]. Voronezh: Voronezhskii institut GPS MCHS Rossii Publ., 2014, pp. 241–244. (In Russ.).

6. Mikhailov N.P., Doroshenko S.I. *Brigadin I.V.* Improving the technology of cutting, welding and hardening of metals. *Vzryvnoe delo* [Explosive business], 2013, N 109/67, pp. 101–117. (In Russ.).

7. Doroshenko S.I., Ivanov A.S., Malykh V.A. Shock wave cutting is an innovative tool for effective and safe work. *Perspektivnye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti* [Promising technologies for security systems], 2023, N 1, pp.110–121. (In Russ.).

8. *Zariad dlia razrezaniia tverdykh materialov: pat. 2701600 c2 Ros. Federatsiia* [Charge for cutting solid materials: pat. 2701600 c2 Ros. Federation], zaiavl.03.07.2017; opubl. 30.09.2019. (In Russ.).

9. *Rukovodstvo po podryvnyim rabotam (RPR-69)* [Guide to demolition work (RPR-69)], Mashevskii V.F. Moscow, MO SSSR Publ., 1968, pp. 23, 35, 142, 145. (In Russ.).

10. *Vzryv i vzryvnye iavleniia, vzryvchatye veshchestva i vzryvnye ustroistva. Vzryvbezopasnost': ucheb. posobie* [Explosion and explosive phenomena, explosives and explosive devices. Explosion safety: studies. Manual]. S.I. Doroshenko et al., St. Petersburg, Sankt-peterburgskii universitet GPS MCHS Rossii Pubi., 2022, p. 84–88 (In Russ.).

Поступила в редакцию: 20.09.2023

Одобрена рецензентами: 11.10.2023

Принята к печати: 04.12.2023

Об авторах

Станислав Иванович Дорoshenko* – кандидат технических наук, доцент, 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, Associate Professor, head of the Laboratory for the development of chemical and mechanical systems of JSC «Scientific and Production Enterprise «Radar mms», honored military specialist of the Russian Federation, laureate of the State Prize G.K. Zhukov. Postal address: 37, lit. A Novoselkovskaya str, St. Petersburg, 197375. E-mail: stasdoroshenko@mail.ru.

Андрей Сергеевич Иванов – заместитель директора НПК АО «НПП «Радар ммс», Санкт-Петербург.

Andrey S. Ivanov – deputy director of JSC «Scientific and Production Enterprise «Radar mms», St. Petersburg.

Вадим Александрович Малых – инженер-конструктор 1 категории АО «НПП «Радар ммс», Санкт-Петербург.

Vadim A. Malykh – design engineer of the 1st category of JSC «Scientific and Production Enterprise «Radar mms», St. Petersburg.

Павел Андреевич Романенков – начальник отдела АО «НПП «Радар ммс», Санкт-Петербург.

Pavel A. Romanenkov – department head of JSC «Scientific and Production Enterprise «Radar mms», St. Petersburg.

Александр Владимирович Скрипка – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой горноспасательного дела и взрывобезопасности ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России», Санкт-Петербург.

Aleksandr V. Skripka – PhD in Engineering sciences, Associate Professor, head Department of Mine Rescue and Explosion Safety Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, St. Petersburg.

Валерий Васильевич Яхеев – кандидат технических наук, доцент кафедры горноспасательного дела и взрывобезопасности ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России». Санкт-Петербург.

Vaieriy V. Yaheev – PhD in Engineering sciences, Associate Professor Department of Mine Rescue and Explosion Safety Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, St. Petersburg.

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

РОССИЙСКАЯ КОСМИЧЕСКАЯ ПРОГРАММА «СФЕРА» СОСТАВИТ КОНКУРЕНЦИЮ STARLINK

Представленная Роскосмосом в 2018 г. программа «Эфир» спустя пять лет сменила название. Ее доработанная версия, а точнее федеральный космический проект «Сфера» призван обеспечить Россию (и другие страны) скоростным интернетом, сервисом IoT и голосовой связью.

Федеральный проект «Сфера» подразумевает запуск спутников связи и дистанционного зондирования Земли. В него войдут пять спутниковых группировок связи («Ямал», «Экспресс-РВ», «Экспресс», «Скиф» и «Марафон») и пять спутниковых группировок дистанционного зондирования Земли («Беркут-Х», «Беркут-О», «Беркут-ВД», «Беркут-С» и «Смотр»). Предполагается, что такое наблюдение в различных диапазонах длин волн поможет, в том числе решать задачи в экономике, сельском хозяйстве, бороться со стихийными бедствиями, лесными пожарами, землетрясениями, контролировать радиационный фон. Что особенно важно, «Сфера» полностью покроет стратегически важный для России Северный морской путь.

Всего, по словам главы Минпромторга России Дениса Мантурова, в рамках проекта планируется создать более 600 космических аппаратов. В 2022 г. на «Сферу» было выделено 14 млрд рублей из федерального бюджета, в 2023 и 2024-м предусмотрено по 18 млрд рублей, на 2025 г. зарезервировано еще 8,5 млрд рублей.

По сути, низкоорбитальная спутниковая группировка «Сфера» – это российский аналог американской и британской Starlink и OneWeb, насчитывающих, соответственно, более 5000 и 634 спутников. Преимущество спутников на низких орбитах – в более мощном сигнале при минимальной задержке и отсутствии слож-



Спутник «Скиф-Д»

ной наземной инфраструктуры. Первой космической ласточкой проекта стал запущенный в октябре прошлого года спутник «Скиф-Д», который протестирует эффективность технологий.

Не исключено, что со временем «Сфера» станет привлекательной и для частных инвесторов. Речь, прежде всего, идет о включении услуг связи, передачи данных, навигации и дистанционного зондирования Земли в сервисы телекоммуникационных, транспортных, банковских, страховых, добывающих и других компаний.

Учитывая наличие господдержки и частные вливания, «Сфера» имеет все шансы составить здоровую конкуренцию «Starlink».

Источники: techcult.ru, ixbt.com, ren.tv.

Фото ТАСС: Григоров Гавриил

РАДИОЛОКАЦИЯ И РАДИОНАВИГАЦИЯ



Изображение: info.sibnet.ru

УДК 621.371; 621.396.67; 621.8-1/9

ОЦЕНКА СКОРОСТИ СОПРОВОЖДЕНИЯ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАЗЕМНЫМИ АНТЕННАМИ

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

Аннотация. Разработаны способы оценки характеристик привода наземной направленной антенны радиоконкомплекса по азимуту и углу места при отслеживании космического аппарата на круговых орбитах. Решена задача определения координат летящего объекта, определены требуемые скорости его сопровождения и приведены результаты расчетов для конкретных углов наклона плоскости орбиты.

Ключевые слова: КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ; ПЛОСКОСТЬ ОРБИТЫ; НАЗЕМНАЯ АНТЕННА; СКОРОСТЬ СОПРОВОЖДЕНИЯ; АЗИМУТ; УГОЛ МЕСТА.

Для цитирования: Колесников Е.П., Купин М.Н., Червяков И.В. Оценка скорости сопровождения низкоорбитальных космических аппаратов наземными антеннами // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 2. С. 62–81.

ESTIMATION OF THE SPEED OF TRACKING LOW-ORBIT SPACECRAFT BY GROUND-BASED ANTENNAS

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

Abstract. Methods have been developed to evaluate the characteristics of the drive of the ground-based directional antenna of the radio complex by azimuth and elevation angle when tracking the spacecraft in circular orbits. The problem of determining the coordinates of a flying object is solved, the required speeds of its tracking along the azimuth and angle of location are determined, and the results of calculations for specific angles of inclination of the orbital plane are presented.

Keywords: SPACECRAFT; ORBIT PLANE; GROUND ANTENNA; TRACKING SPEED; AZIMUTH; ELEVATION ANGLE.

For citation: Kolesnikov E.P., Kupin M.N., Chervyakov I.V. Estimation of the speed of tracking low-orbit spacecraft by ground-based antennas. Perspektivnyye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti [Promising technologies for security systems], 2023, N 2, pp. 62–81 (In Russ.).

Введение

В состав наземного радиокомплекса, работающего с космическим аппаратом (КА), входит направленная следящая антенна. С учетом конкретных задач радиокомплекса ее можно выбрать из имеющихся на рынке или заказать в разработку. Если варианты наводящихся антенн (НА) по радиотехническим характеристикам широко представлены в литературе, то критерии выбора характеристик приводов, в частности, скорости по углу места и азимуту, практически отсутствуют. В соответствии с этим рассмотрим две связанные задачи:

выбор антенны по характеристикам приводов азимута и угла места;

расчет характеристик приводов антенны при ее разработке.

Для ориентировки приведем основные радиотехнические характеристики антенн и рассмотрим круговые орбиты КА с высотой орбиты H , лежащей в интервале $500 \leq H \leq 1500$ км.

Полученные результаты могут быть использованы при выборе или разработке НА, предназначенной для работы с КА.

Радиотехнические характеристики антенн

Будем рассматривать зеркальные НА для волн дециметрового и сантиметрового диапазонов с диаметром зеркала (апертуры) $D \leq 3...5$ м, поскольку именно такие антенны чаще всего используются при работе с низкоорбитальными КА.

Характеристики антенн подробно представлены в работах [1, 2]. Хорошо разработанная зеркальная антенна имеет коэффициент использования поверхности (КИП) апертуры, равный примерно величине $\text{КИП} = 0,5$. Это означает, что эффективная поверхность антенны $S_{\text{эф}} = S/2$, где S – геометрическая поверхность апертуры ($S = \pi a^2$; a – радиус зеркала).

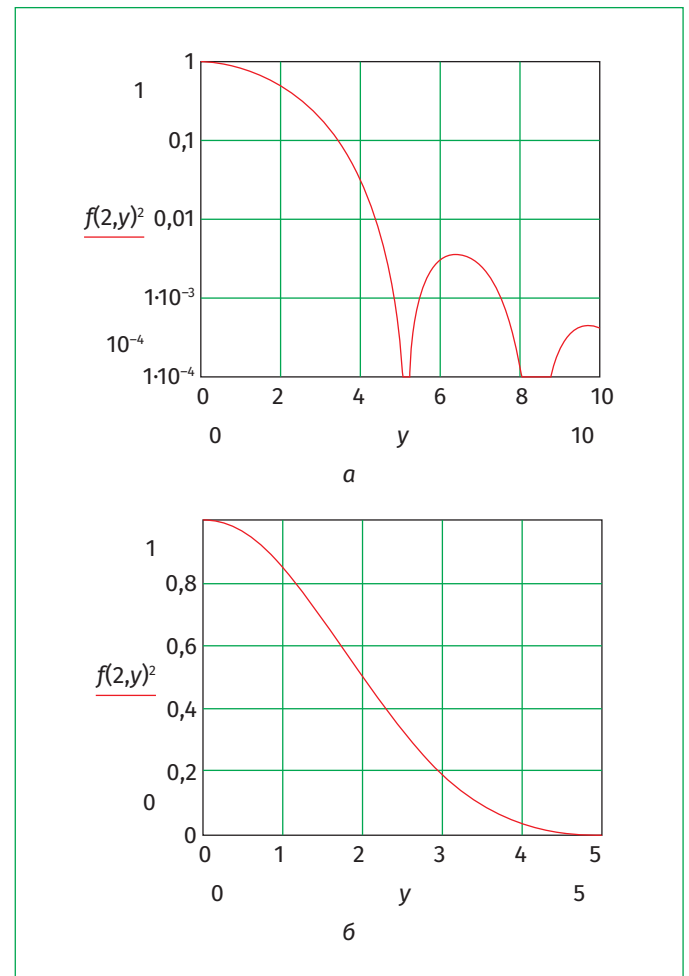


Рис. 1. Диаграмма направленности антенны:

а – с боковыми лепестками;

б – с частью основного лепестка

Так как максимальный коэффициент усиления (КУ) G антенны связан с эффективной поверхностью соотношением:

$$G = \frac{4\pi S_{\text{эф}}}{\lambda^2},$$

то КУ рассматриваемых антенн будет определяться как:

$$G = \frac{2\pi^2 a^2}{\lambda^2}.$$

На рис. 1 приведена нормированная к значению КУ $G = \frac{2\pi^2 a^2}{\lambda^2}$ диаграмма направленности (ДН) такой антенны с боковыми лепестками (рис. 1, а) и часть основного лепестка ДН антенны (рис. 1, б) в обобщенных координатах где: $f(2,y)^2$ – ДН антенны по мощности; $y = ka \sin\theta$; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны; θ – угол в радианах, отсчитываемый от нуля оси y [1, 2].

ДН антенны осесимметрична относительно нормали к апертуре, проведенной из центра апертуры (на графиках – относительно нуля оси y).

Как следует из рис. 1, полуширина основного лепестка ДН по уровню 0,5 (–3дБ) соответствует значению $y \approx 2$ и, следовательно, ширина ДН антенны по уровню 0,5 равна $\Delta\theta_{0,5} \approx 2 \arcsin(2/ka)$ рад. Поскольку антенна направленная, то $a \gg \lambda$ и:

$$\Delta\theta_{0,5} \approx 0,64 \lambda/a \text{ рад} \approx 36,5 \lambda/a \text{ град.} \quad (1)$$

Для примера укажем, что по равенству (1) антенна с диаметром зеркала 3 м ($a = 150$ см) формирует ДН с шириной $\Delta\theta_{0,5} = 0,02$ рад ($\Delta\theta_{0,5} = 1,15^\circ$) на длине волны $\lambda \approx 4,7$ см (частота $f \approx 6,4$ ГГц), а ДН с шириной $\Delta\theta_{0,5} = 0,2$ рад ($\Delta\theta_{0,5} = 11,5^\circ$) на длине волны $\lambda \approx 47$ см ($f \approx 0,64$ ГГц = 640 МГц).

Кинематическая схема НА

Поскольку приводы большинства антенн, работающих с КА, выполняются по двухосной схеме «первого типа» (классификация книги [3], рис. IV.1): вертикальная ось, обеспечивающая вращение антенны по азимуту, и горизонтальная ось – по углу места, мы будем рассматривать именно такую схему. В этой схеме угол азимута φ меняется в пределах $0 \leq \varphi \leq 360^\circ$, а угол места ϑ – в пределах

$0 \leq \vartheta \leq 90^\circ$, причем будем считать, что угол ϑ отсчитывается от зенита, как в стандартной сферической системе координат, а не от горизонта.

Особенностью рассматриваемой схемы антенны является то обстоятельство, что при проходе КА через зенит азимут антенны должен мгновенно измениться на 180° , что физически невозможно. Реальная система управления угловым положением антенны должна позволять разворачивать антенну по азимуту в минимально допустимое время с желательным условием, что во время разворота связь наземного радиокомплекса с КА не прерывается. В ряде случаев это, по-видимому, возможно, поскольку энергетика радиолинии Земля–КА (КА–Земля) рассчитывается на максимальное расстояние (КА на горизонте), которое всегда больше расстояния до КА, находящегося в зените антенны. Так как расстояние r от антенны до КА на горизонте равно:

$$r = \sqrt{(R+H)^2 - R^2},$$

где $R = 6400$ км – радиус Земли; H – высота КА над поверхностью Земли, км. В этом случае запас энергетике КА в зените определяется соотношением:

$$\Phi(H) = \frac{r^2}{H^2} = \frac{\sqrt{(R+H)^2 - R^2}}{H^2}. \quad (2)$$

На рис. 2 представлен энергетический запас $\Phi(H)$ соотношения (2) радиолинии (в размах) для интервала изменений высоты КА $500 \leq H \leq 1500$ км.

Как следует из выражения (2) и рис. 2, запас энергетике для указанных высот КА составляет примерную величину от 14 дБ ($H = 500$ км) до 9 дБ ($H = 1500$ км).

Однако указанный запас энергетике реализуется только, если на КА для связи

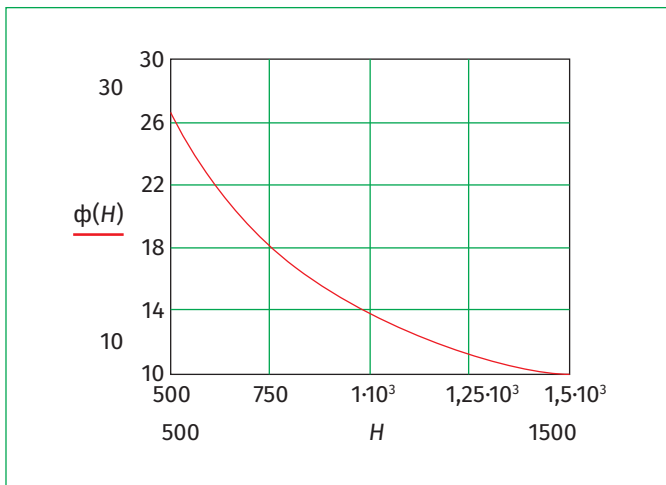


Рис. 2. Энергетический запас радиолинии для интервала изменений высоты КА $500 \leq H \leq 1500$ км

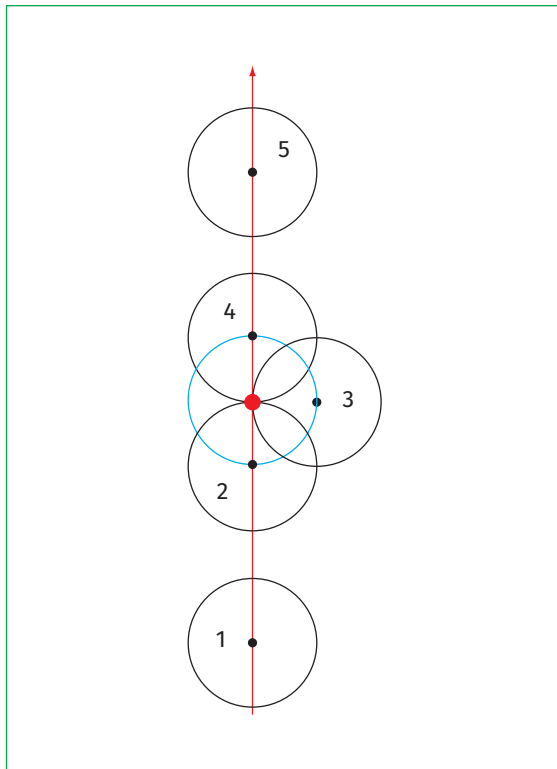


Рис. 3. Схема прохода следящей диаграммы направленности наземной станции при движении КА через зенит антенны

с наземной станцией (НС) используется ненаправленная антенна с равномерной ДН или следящая направленная антенна

(например, один из лучей многолучевой антенной решетки, как на КА системы Starlink). Если на КА используется антенна с оптимальной диаграммой направленности, форма которой компенсирует разницу расстояний КА–абонент [2], то такого запаса уже нет и можно только использовать то обстоятельство, что энергетика радиолинии всегда проектируется с запасом около 3 дБ.

Оценка скоростей приводов НА в точке зенита

В работе НА весьма важными представляются характеристики скоростей приводов антенны по азимуту и углу места, позволяющие пройти точку зенита без потери радиосвязи НС с КА.

Оценим требуемую скорость привода антенны по азимуту. На рис. 3 представлена схема прохода следящей ДН НС при движении КА через зенит антенны: красная линия – траексия КА; черные звезды – последовательные положения КА на траексии по углу места ϑ ; окружности – последовательные проекции ДН (1) НС по уровню -3 дБ на траексию КА; красная звезда – положение КА в зените НС; синяя окружность – обход зенита по азимуту.

Обход точки зенита системой управления НС можно представить следующим образом. Как только ДН НС по углу места достигает зенита краем ДН (точка 2 на рис. 3), система управления НС начинает разворот антенны по азимуту таким образом, чтобы в зените КА находился на уровне не ниже -3 дБ ДН (точка 3 на рис. 3). Разворот антенны по азимуту на 180° заканчивается, когда КА находится в центре ДН НС (точка 4 на рис. 3).

Как следует из рис. 3, требуемая скорость $d\varphi/dt$ разворота антенны по азимуту зависит от ширины ДН (1) антенны НС $\Delta\theta$ (по уровню -3 дБ) и угловой скорости

da/dt движения КА по орбите. Так как ширина ДН антенны НС достаточно мала (как правило, $1^\circ \leq \Delta\theta \leq 12^\circ$ или $0,02 \leq \Delta\theta \leq 0,2$ рад), а высота орбит КА достаточно велика ($500 \leq H \leq 1500$ км), угловую скорость движения КА относительно НС можно определить приближенно, полагая, что КА движется или параллельно плоскости Земли рис. 4, а, или по окружности радиуса H вокруг антенны НС рис. 4, б (на рис. 4, а, б Земля представлена толстой черной линией, зеленый треугольник – антенна НС, голубая линия – орбита КА, красные звезды – последовательные положения КА на орбите в пределах ширины $\Delta\theta$ ДН антенны НС, причем точка В на рис. 4 соответствует точке 2 на рис. 3, точка С на рис. 3 – точке 4 рис. 3, L – длина пути КА по орбите).

Оба подхода приводят к одному результату:

$$L \approx \Delta\theta H,$$

где $\Delta\theta$ в радианах.

Поскольку скорость движения КА по орбите определяется как:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R+H}},$$

где $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{с}^2 \text{ кг}$ – гравитационная постоянная; $M = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ – масса Земли, т.е. для R и H в километрах, как:

$$v \approx \frac{631}{\sqrt{R+H}}, \text{ км/с}, \quad (3)$$

то время T , за которое КА пройдет путь L , равно:

$$T \approx \frac{L}{v} = \frac{\Delta\theta \cdot H \cdot \sqrt{R+H}}{631}, \text{ с.}$$

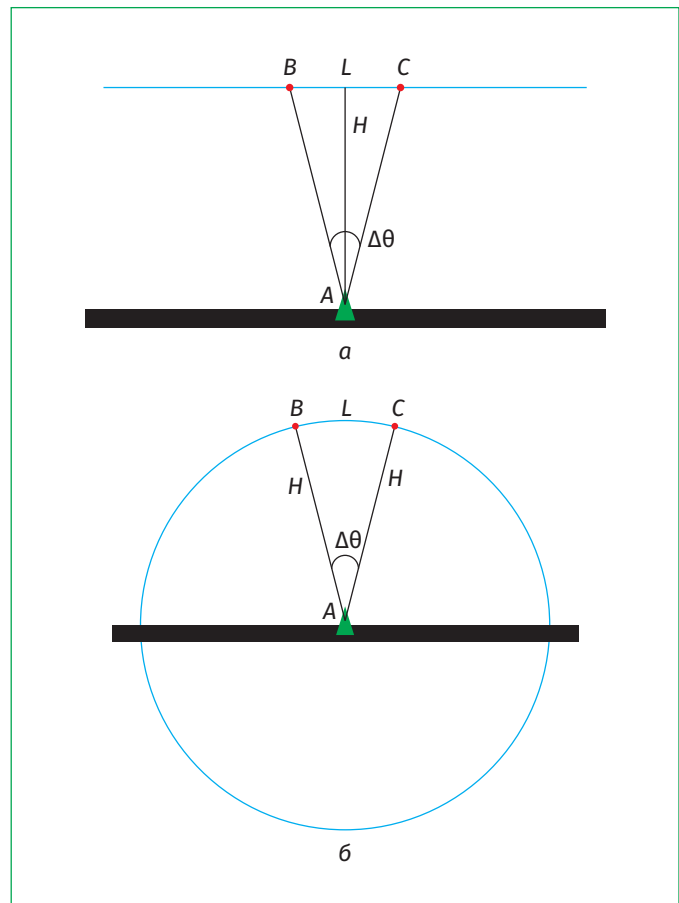


Рис. 4. Движение космического аппарата:
а – параллельно плоскости Земли;
б – по окружности радиуса H вокруг антенны НС

За это время антенна НС должна развернуться по азимуту на угол π и, следовательно, угловая скорость разворота антенны по азимуту равна:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\pi}{T} = \frac{\pi \cdot 631}{\Delta\theta \cdot H \cdot \sqrt{R+H}}, \text{ рад/с.} \quad (4)$$

Заметим, что выражение (4) определяет максимальную требуемую скорость разворота антенны по азимуту, что отмечено заменой в формуле (4) производной $d\varphi/dt$ на $d\Phi/dt$.

Как следует из выражения (4), скорость разворота антенны по азимуту

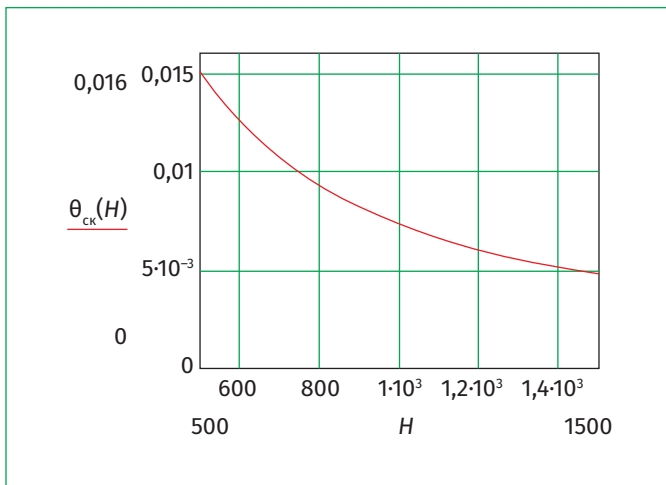


Рис. 5. Требуемая скорость $\vartheta_{ск} = d\vartheta/dt$ привода антенны НС по углу места в зависимости от высоты H орбиты КА

увеличивается при уменьшении высоты H орбиты КА и при уменьшении ширины $\Delta\theta$ ДН антенны. Так при $H = 500$ км и $\Delta\theta = 0,02$ рад ($\Delta\theta \approx 1,2^\circ$) $d\Phi/dt \approx 2,4$ рад/с или $d\Phi/dt \approx 137$ град./с.

Это очень большая скорость для антенн, диаметр зеркала которых равен, примерно, 3...5 м. Например, для антенны классической американской РЛС SCR-584 с диаметром зеркала 2,8 м (наш аналог – РЛС «Кама») скорость вращения по азимуту составляет 6 об./мин [3], т.е. $d\Phi/dt \approx 0,63$ рад/с = 36 град/с, что почти в 4 раза ниже требуемой скорости 2,4 рад/с.

Для $H = 500$ км и $\Delta\theta = 0,2$ рад ($\Delta\theta \approx 12^\circ$) $d\Phi/dt \approx 0,24$ рад/с или $d\Phi/dt \approx 13,7$ град./с. Эта скорость тоже велика.

В случае $H = 500$ км и $\Delta\theta = 0,02$ рад ($\Delta\theta \approx 1,2^\circ$) даже десятикратный запас по энергетике радиолинии (формула (2) и рис. 1) не сильно уменьшит требуемую максимальную скорость разворота антенны по азимуту. Как следует из рис. 1, ширина ДН по уровню 0,1 (–10 дБ) всего в $3,5/2 = 1,75$ раза больше ширины ДН по уровню 0,5 и максимальная скорость разворота антенны по азимуту выражения (4) уменьшится до величины $d\Phi/dt \approx 1,37$ рад/с или

$d\Phi/dt \approx 78,5$ град./с, что все равно примерно в 2 раза выше скорости привода РЛС SCR-584.

Оценим требуемую угловую скорость привода антенны по углу места.

Так как линейная скорость КА по орбите определяется выражением (3), то за время t КА пройдет расстояние:

$$L \approx \frac{631}{\sqrt{R+H}} \cdot t,$$

или в соответствии с рис. 4 переместится относительно антенны НС на угол $\vartheta \approx L/H$, т.е. на угол:

$$\vartheta \approx \frac{631}{H \cdot \sqrt{R+H}} \cdot t.$$

Соответственно, требуемая скорость сопровождения КА по углу места равна:

$$\frac{d\vartheta}{dt} \approx \frac{631}{H \cdot \sqrt{R+H}}. \quad (5)$$

На рис. 5 представлен график требуемой скорости $\vartheta_{ск} = d\vartheta/dt$ привода антенны НС по углу места в зависимости от высоты H орбиты КА.

Как следует из рис. 5, даже для высоты КА $H = 500$ км требуемая для сопровождения КА угловая скорость привода антенны по углу места составляет величину $d\vartheta/dt = 0,015$ рад/с $\approx 0,9$ град./с, что существенно меньше требуемой угловой скорости привода антенны по азимуту.

Оценим соотношение мощностей приводов антенны по углу места и по азимуту.

Пусть для перемещения зеркала антенны необходима сила f . Тогда работа по перемещению зеркала на угол ϑ равна

$A_{\text{ум}} = f\vartheta$, а мощность, требуемая для перемещения, $W_{\text{ум}} = f \frac{d\vartheta}{dt}$ [4]. Примем те-

перь, что масса опорно-поворотного устройства (ОПУ) по азимуту вместе с зеркалом в 2 раза больше, чем масса зеркала. Тогда по аналогии с подъемом груза будем считать, что сила, необходимая для перемещения ОПУ, равна $2f$, работа по перемещению ОПУ на угол φ равна

$A_{\text{аз}} = 2f\varphi$ и требуемая мощность $W_{\text{аз}} = 2f \frac{d\varphi}{dt}$.

Таким образом, получается, что соотношение мощностей приводов антенны по азимуту и по углу места равно:

$$\frac{W_{\text{аз}}}{W_{\text{ум}}} = 2 \frac{\frac{d\varphi}{dt}}{\frac{d\vartheta}{dt}}. \quad (6)$$

На основании проведенных оценок требуемых скоростей приводов антенны по азимуту и углу места, позволяющих пройти точку зенита без потери радиосвязи НС с КА, можно сделать следующие выводы:

1) требуемая скорость приводов по азимуту и углу места увеличивается с уменьшением высоты H орбиты КА и с уменьшением ширины $\Delta\Omega$ ДН антенны, причем требуемая скорость привода по азимуту существенно выше скорости по углу места;

2) поскольку увеличение скорости приводов приводит к удорожанию антенны, так как помимо увеличения мощности двигателей придется усиливать прочность конструкции, можно уверенно полагать, что в большинстве случаев скорость привода по азимуту будет меньше требуемой, а, следовательно, радиосвязь

НС с КА при проходе КА через зенит будет прерываться.

Ниже будет проведена оценка скорости привода антенны по азимуту, которая удовлетворяет требованию по допустимому перерыву связи НС с КА.

Аналитическая оценка скоростей приводов НА при низкой орбите КА

При проектировании и разработке антенных приводов, кроме оценок, необходимы аналитические выражения скорости приводов антенны по углу места и азимуту.

В работе [2] приводится соотношение, связывающее угол α , характеризующий положение КА относительно антенны и отсчитываемый из центра Земли, с углом ϑ_H – углом места КА относительно антенны, отсчитываемым от горизонта (рис. 6), для орбит, проходящих через зенит антенны:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{R}{R+H} \cos \vartheta_H\right) - \vartheta_H. \quad (7)$$

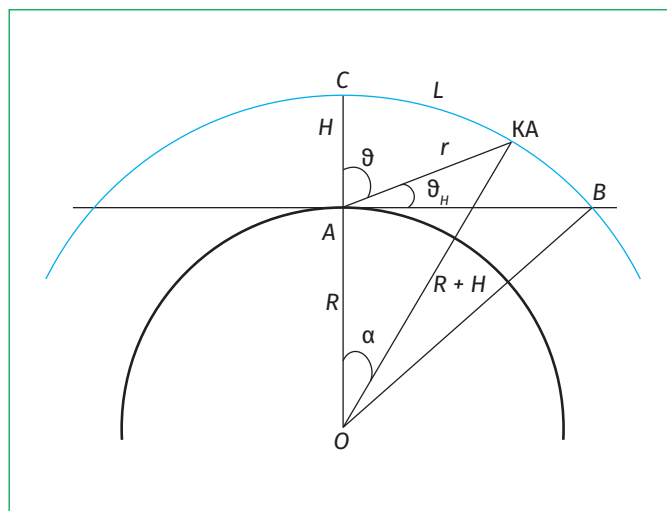


Рис. 6. Соотношение, связывающее угол α , отсчитываемый из центра Земли, с углом ϑ_H – места КА относительно антенны, отсчитываемым от горизонта

Оценим максимальную скорость привода антенны по углу места, воспользовавшись соотношением (6), рис. 6.

Заменив угол ϑ_H на угол ϑ , отсчитываемый от зенита $\vartheta_H = \pi/2 - \vartheta$, получим:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{R}{R+H} \cos \vartheta\right) - \frac{\pi}{2} + \vartheta. \quad (8)$$

Поскольку углы α и ϑ в формуле (8) зависят от времени t , продифференцировав выражение (8) по t , получим:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \left(1 - \frac{\frac{R}{R+H} \cdot \cos \vartheta}{\sqrt{1 - \left(\frac{R}{R+H}\right)^2 \cdot \sin^2 \vartheta}} \right) \cdot \frac{d\vartheta}{dt},$$

или

$$\begin{aligned} \frac{d\vartheta}{dt} &= \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{R}{R+H}\right)^2 \cdot \sin^2 \vartheta}}{\sqrt{1 - \left(\frac{R}{R+H}\right)^2 \cdot \sin^2 \vartheta} - \frac{R}{R+H} \cdot \cos \vartheta} \times (9) \\ &\quad \times \frac{d\alpha}{dt}. \end{aligned}$$

В соответствии с рис. 6 угол α связан с длиной пути КА по орбите (дуга L от точки C до точки КА) соотношением $L = (R+H)\alpha$ и, следовательно, $\alpha = L/(R+H)$. При скорости на круговой орбите выражение (3) $v \approx 631/\left(\sqrt{R+H}\right)$ КА за время t

пройдет путь $L = \left(631/\left(\sqrt{R+H}\right)\right) \cdot t$ и, соответственно, $\alpha = \left(631/\left(\sqrt{(R+H)^3}\right)\right) \cdot t$, а

$$d\alpha/dt = 631/\left(\sqrt{(R+H)^3}\right). \quad (10)$$

Выражение (9) теперь можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\vartheta}{dt} &= \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{R}{R+H}\right)^2 \cdot \sin^2 \vartheta}}{\sqrt{1 - \left(\frac{R}{R+H}\right)^2 \cdot \sin^2 \vartheta} - \frac{R}{R+H} \cdot \cos \vartheta} \times \\ &\quad \times \frac{631}{\sqrt{(R+H)^3}}. \end{aligned} \quad (11)$$

В соответствии с формулой (11) максимальная скорость привода антенны по

углу места (при $\vartheta=0$) равна $\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{631}{H\sqrt{R+H}}$,

что полностью совпадает с оценкой выражения (5), рис. 5. Таким образом, можно утверждать, что максимальная скорость привода антенны по углу места, равная $d\vartheta/dt = 0,015$ рад/с $\approx 0,9$ град./с, обеспечит слежение за КА на орбитах высотой $H \geq 500$ км.

На рис. 7 представлен рассчитанный по выражению (11) график скорости $\vartheta_{ск}(\vartheta) = d\vartheta/dt$ антенны по углу места, как функция угла места КА для $H = 500$ км и $0 \leq \vartheta \leq \pi/2 \approx 1,571$ (напомним, что угол ϑ отсчитывается от зенита антенны).

Прежде чем оценивать скорость привода антенны по азимуту, решим общую задачу определения координат КА на круговой орбите, плоскость которой не проходит через зенит антенны.

Рассмотрим схему (рис. 8), на которой представлено сечение Земли плоскостью, проходящей через ее центр – точка O и антенну, расположенную на поверхности – точка A . Введем далее правинтовую прямоугольную систему координат с началом в точке A . Ось z направлена по радиусу Земли OA , а ось y расположена

в горизонтальной плоскости. Соответственно, ось x направлена нормально к плоскости сечения (в сторону читателя).

Голубой линией на рис. 8 представлена проекция круговой орбиты КА (нормальной к плоскости uz и наклоненной на угол β к оси OA) на плоскость сечения – на плоскость uz . На рисунке обозначены проекции на плоскость uz : буквой K_o – положения КА в верхней части, видимой с антенны орбиты ($OK_o = R + H$), а буквой K_n – текущего положения КА на орбите. Угол β_m соответствует максимальному отклонению плоскости орбиты от оси OA (предел видимости КА с точки A). Как следует из рис. 8:

$$\beta_m = \arccos \frac{R}{R + H}. \quad (12)$$

На рис. 9 голубой линией представлена плоскость орбиты КА, соответствующая проекции на рис. 8.

На рис. 9 буквой K обозначено текущее положение КА на орбите, причем угол α отсчитывается от оси OK_o . Ось x_n – это проекция оси x на плоскость орбиты. Точка E – проекция K на ось x_n (отрезок KE на рис. 9 равен отрезку K_nB на рис. 8). Угол α_m соответствует углу захода КА за горизонт. Остальные обозначения такие же, как на рис. 8.

С учетом величины отрезка OB , которая определяется по рис. 8:

$$\alpha_m = \arccos \frac{R}{(R + H) \cdot \cos \beta}. \quad (13)$$

На рис. 10 представлены сферические координаты КА r, ϑ, φ относительно антенны A в связи с прямоугольными координатами x, y, z (рис. 8, 9). Синими линиями на рис. 10 изображена часть

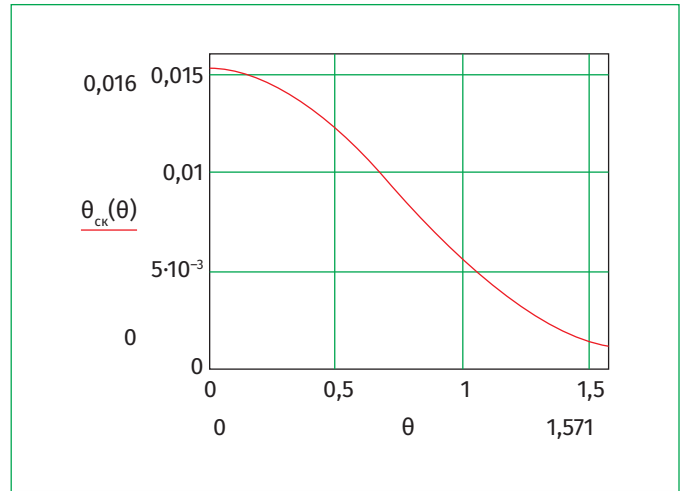


Рис. 7. График скорости $\vartheta_{ck}(\vartheta) = d\vartheta/dt$ антенны по углу места как функция угла места КА для $H = 500$ км и $0 \le \vartheta \le \pi/2 \approx 1,571$

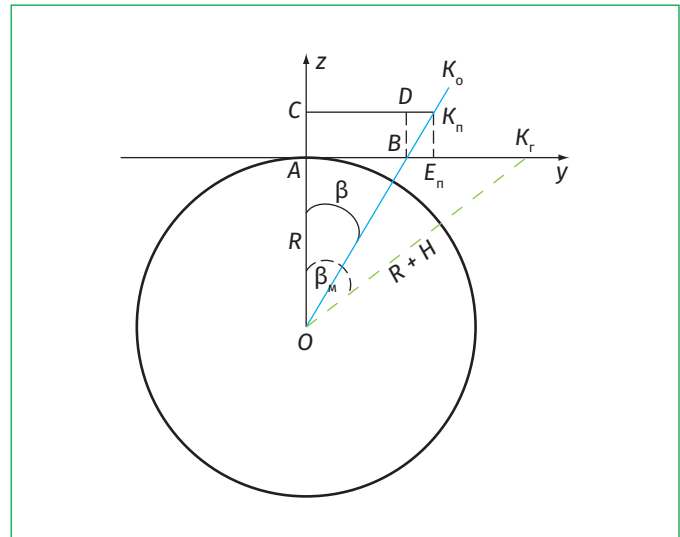


Рис. 8. Сечение Земли плоскостью, проходящей через ее центр и антенну, расположенную на поверхности

плоскости орбиты КА. Обозначения на рис. 10 соответствуют обозначениям на рис. 8, 9, а отрезок $KF = K_nE_n$.

Как следует из рис. 8, координата КА (K) по оси x определяется отрезком $x_k = KK_n$, координата по оси y (рис. 9) отрезком $y_k = CK_n = CD + DK_n$, а координата $z_k = K_nE_n$. Отрезки DK_n и K_nE_n определяются из треугольников DK_nB и BK_nE_n при

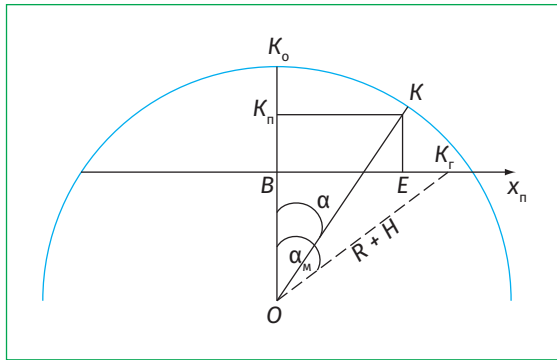


Рис. 9. Плоскость орбиты КА, соответствующая проекции на рис. 8

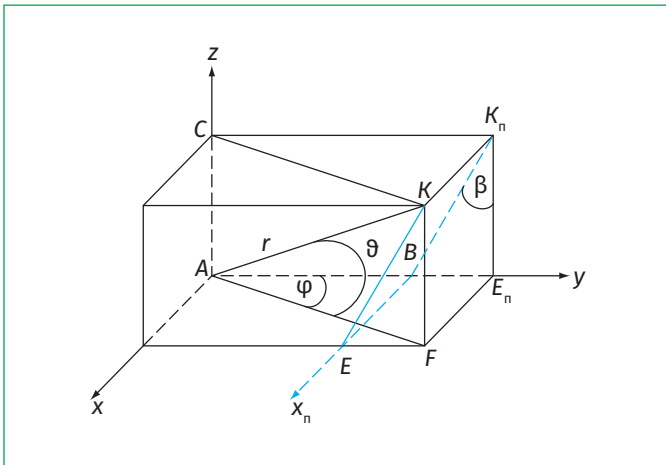


Рис. 10. Сферические координаты КА r, ϑ, φ относительно антенны А в связи с прямоугольными координатами x, y, z

известной величине BK_n , поскольку углы DK_nB и BK_nE_n равны β . Величина BK_n определяется по рис. 9 с учетом величины OB , определенной по рис. 8.

Проведя соответствующие вычисления, получим:

$$\begin{aligned} x_k &= (R + H)\sin\alpha; \\ y_k &= (R + H)\cos\alpha\sin\beta; \\ z_k &= (R + H)\cos\alpha\cos\beta - R. \end{aligned}$$

Теперь по рис. 10 определим сферические координаты КА r, ϑ, φ относительно антенны А.

$$\vartheta = \arctg \frac{(R + H)\cos\alpha - R}{(R + H)\sqrt{\sin^2\alpha + \cos^2\alpha \sin^2\beta}}; \quad (15)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\sin\beta}. \quad (16)$$

Напомним, что в соответствии с данными выражений (12), (13) получим:

$$0 \leq \alpha \leq \alpha_m = \arccos \frac{R}{(R + H) \cdot \cos\beta}; \quad (17)$$

$$0 \leq \beta \leq \beta_m = \arccos \frac{R}{R + H}. \quad (18)$$

По выражениям (14)–(16) с учетом формул (17), (18) можно вычислить целеуказания для наведения антенны. Следует только помнить, что эти выражения получены при условии неподвижной Земли и при расчете целеуказаний следует учитывать скорость вращения Земли (15 град./ч).

На рис. 11, а приведена зависимость угла ϑ от α , рассчитанная по формуле (15) для $\beta = 0$ (орбита КА проходит через зенит) и $H = 500$ км, а на рис. 11, б – та же зависимость для уменьшенного диапазона изменения угла α .

На рис. 12 приведена зависимость угла $\vartheta_6(\alpha)$, рассчитанная по формуле (15) для угла наклона орбиты $\beta = 0,1$ ($\beta \approx 6^\circ$) и $H = 500$ км.

Необходимо отметить разницу результатов расчета угла $\vartheta(\alpha)$ для $\beta = 0$ и $\beta = 0,1$. Несмотря на малое отличие орбиты с наклоном 6° от орбиты, проходящей через зенит, результаты на рис. 11 и 12 отличаются принципиально: если на рис. 11 производная угла ϑ при $\alpha = 0$ существенно отличается

$$r = \sqrt{[(R + H)\cos\alpha - R]^2 + (R + H)^2 \cos^2\alpha \sin^2\beta + (R + H)^2 \sin^2\alpha}; \quad (14)$$

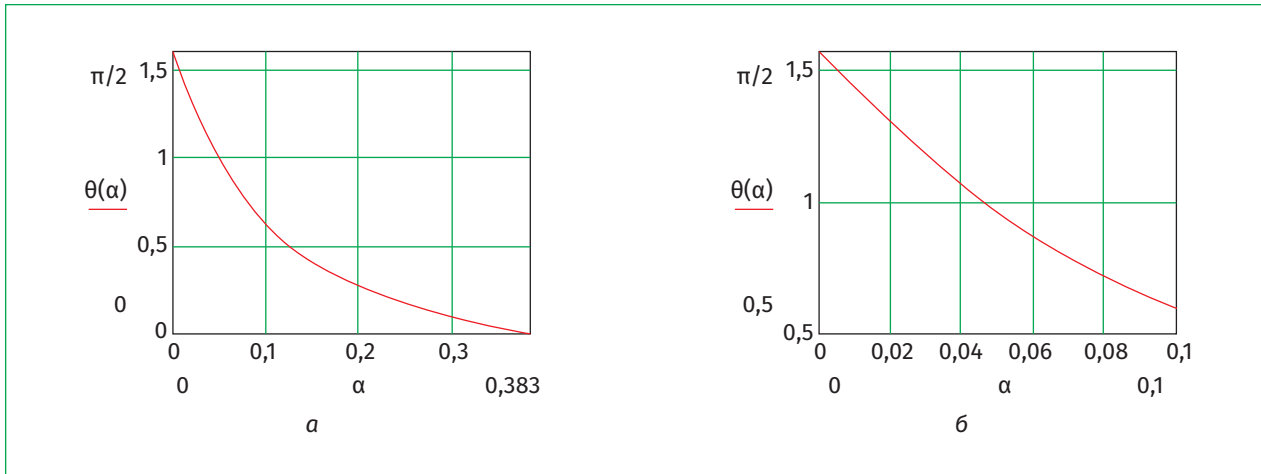


Рис. 11. Графики зависимости: а – угла ϑ от α ; б – угол ϑ от уменьшенного диапазона изменения угла α

ся от нуля, то производная угла ϑ при $\alpha = 0$ равна нулю. Кроме того, даже для орбиты с малым наклоном ($\beta = 6^\circ$) максимальный угол места КА при $\alpha = 0$ ($\vartheta \approx 0,63$ рад или $\vartheta \approx 36^\circ$) существенно меньше угла места КА на орбите, проходящей через зенит ($\vartheta = \pi/2$ рад, $\vartheta = 90^\circ$). Оценим скорость привода антенны по углу места для $\beta \geq 0$.

Производная угла ϑ формулы (15) по времени получается слишком громоздкой и неудобной для вычислений. Вычисления $d\vartheta/dt$ для $\beta \neq 0$ удобнее проводить численным способом, как:

$$\frac{d\vartheta(\alpha)}{dt} \approx \frac{\Delta\vartheta(\alpha)}{\Delta\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt}. \quad (19)$$

Так как знак производной $d\vartheta(\alpha)/dt$ показывает только характер изменения угла ϑ с изменением угла $\alpha(t)$ (увеличивается угол ϑ или уменьшается), то при вычислениях знак скорости, как правило, выбирается положительным.

Производная угла ϑ при $\varphi = 0$ равна:

$$\frac{d\vartheta}{dt}(\varphi = 0) = \pm \frac{(R+H)^2 - R(R+H)\cos\alpha}{[(R+H)\cos\alpha - R]^2 + (R+H)^2 \sin^2\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt}. \quad (20)$$

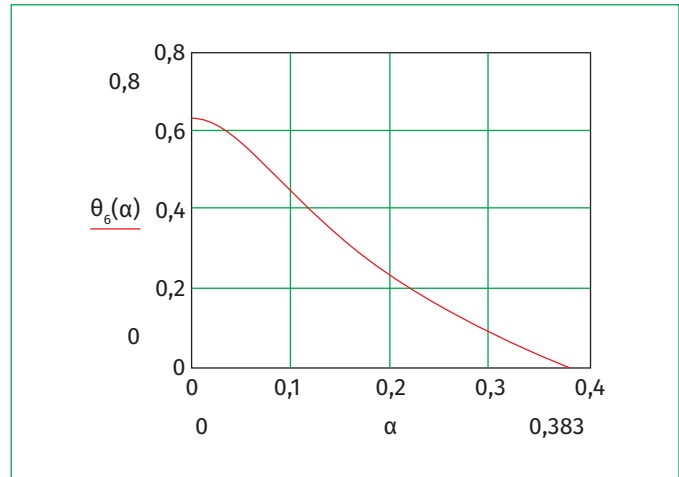


Рис. 12. График зависимости угла $\vartheta_6(\alpha)$

Знак \pm в выражении (20) появляется при извлечении корня $\sqrt{\sin^2\alpha}$. График функции формулы (20) $d\vartheta/dt = \vartheta_{ок}(\alpha)$ для $H = 500$ км приведен на рис. 13, а, а для $H = 1500$ км на рис. 13, б (красная линия).

Как следует из выражения (20) и рис. 7, 13, величина производной $d\vartheta/dt$ для $\beta = 0$ при $\alpha = 0$ полностью совпадает с выражениями (5) и (10) при $\vartheta = 0$. Также

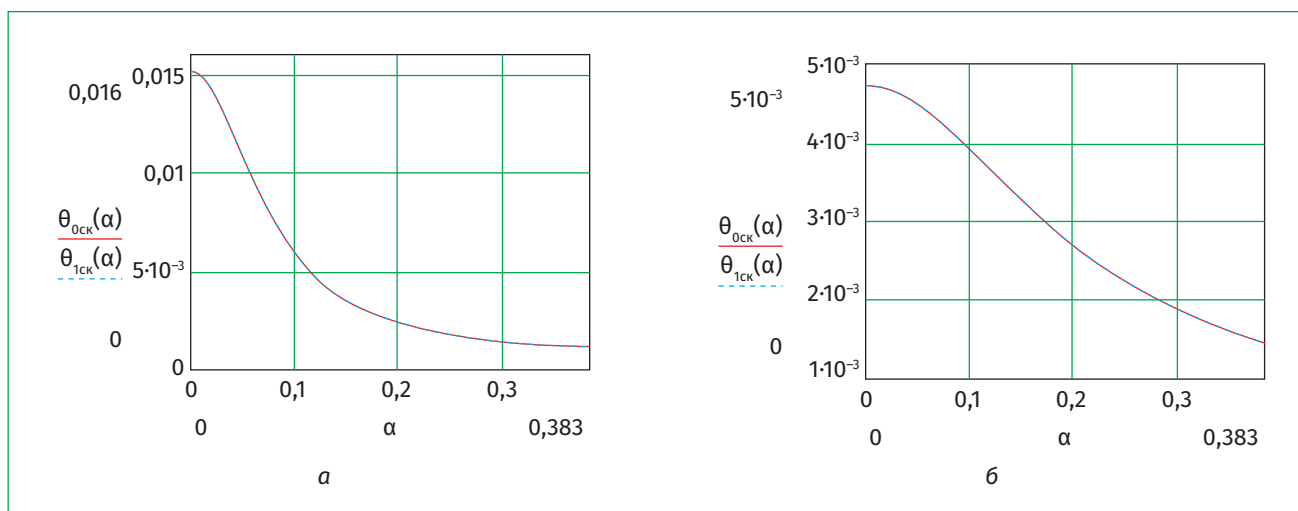


Рис. 13. Графики функций: а – $H = 500$ км; б – $H = 1500$ км

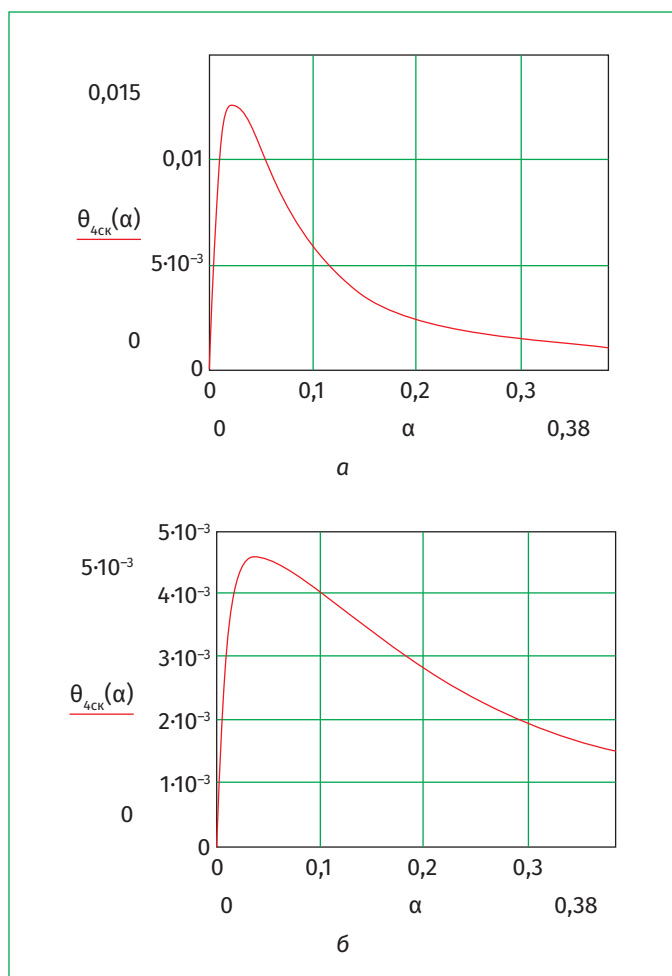


Рис. 14. Графики кривых $d\theta/dt = \theta_{4СК}(\alpha)$ ($\beta \approx 0,6^\circ$):
а – $H = 500$ км; б – $H = 1500$ км

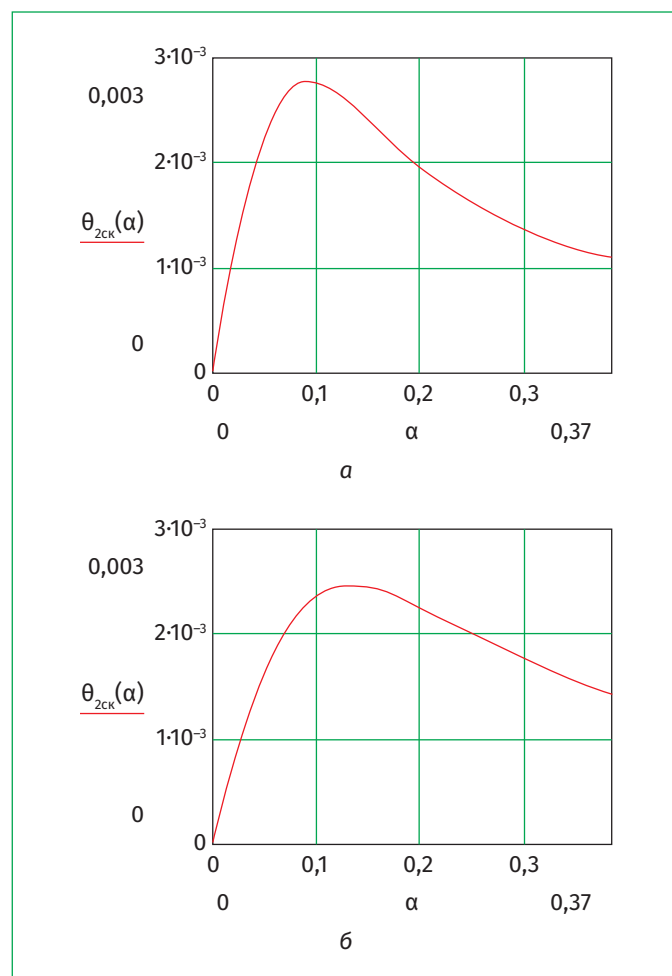


Рис. 15. Графики кривых $d\theta/dt = \theta_{2СК}(\alpha)$ ($\beta \approx 6^\circ$):
а – $H = 500$ км; б – $H = 1500$ км

совпадает скорость привода антенны по углу места при $\vartheta = \pi/2$ (рис. 7) и при $\alpha = \alpha_m \approx 0,383$ рад (рис. 13).

Для оценки точности приближенных вычислений на рис. 13 приведена кривая $d\vartheta/dt = \vartheta_{1\text{СК}}(\alpha)$, вычисленная по формуле (19) при $\Delta\alpha = 0,001$ (синяя линия), также для $\beta = 0$ и высоты орбит КА $H = 500$ км и $H = 1500$ км. Графики полностью совпадают.

На рис. 14, а, 15, а, 16, а приведены рассчитанные по модулю выражения (19) кривые при $H = 500$ км: $d\vartheta/dt = \vartheta_{4\text{СК}}(\alpha)$ для угла наклона орбиты $\beta = 0,01$ рад ($\beta \approx 0,6^\circ$), $d\vartheta/dt = \vartheta_{2\text{СК}}(\alpha)$ для $\beta = 0,1$ рад ($\beta \approx 6^\circ$) и $d\vartheta/dt = \vartheta_{3\text{СК}}(\alpha)$ для $\beta = 0,2$ рад ($\beta \approx 11,5^\circ$) соответственно, с учетом ограничений отношений (17), (18) для α_m при выбранных β_m . На рис. 14, б, 15, б, 16, б приведены аналогичные кривые для $H = 1500$ км.

Следует отметить изменение характера скорости $d\vartheta/dt$ при наклонной орбите КА (рис. 14–16) по сравнению с $d\vartheta/dt$ для орбиты с $\beta = 0$ (рис. 13). При орбите, проходящей через зенит антенны (рис. 13), скорость привода по углу места на восходящей ветви орбиты плавно увеличивается от величины около 10^{-3} рад/с до максимума $0,015$ рад/с в зените, после чего также плавно уменьшается до 10^{-3} рад/с. При $\beta \neq 0$ (рис. 14–16) на восходящей ветви $d\vartheta/dt$ также сначала увеличивается от значения 10^{-3} рад/с до максимума, который примерно соответствует углу $\alpha \approx \beta$, но величина которого меньше $0,015$, а затем уменьшается до нуля при $\alpha = 0$ (положение максимума видимой части орбиты). На нисходящей ветви орбиты $d\vartheta/dt$ увеличи-

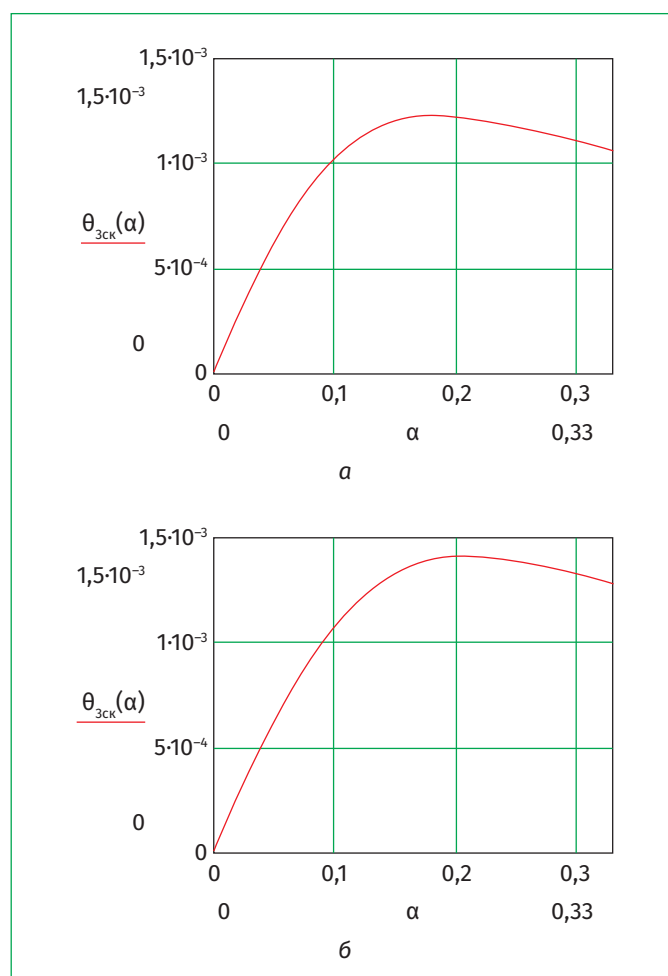


Рис. 16. Графики кривых $d\vartheta/dt = \vartheta_{3\text{СК}}(\alpha)$ ($\beta \approx 11,5^\circ$): а – $H = 500$ км; б – $H = 1500$ км

вается от нуля до такого же максимума, после чего плавно уменьшается до значения 10^{-3} рад/с.

Если учитывать знак скорости в функции выражения (19), она при переходе через точку $\alpha = 0$ (рис. 14–16) меняет знак, становясь из положительной отрицательной (или наоборот). Для $\beta = 0$ функция выражения (19) терпит разрыв при переходе через

При орбите, проходящей через зенит антенны, скорость привода по углу места на восходящей ветви плавно увеличивается до максимума, после чего также плавно уменьшается.

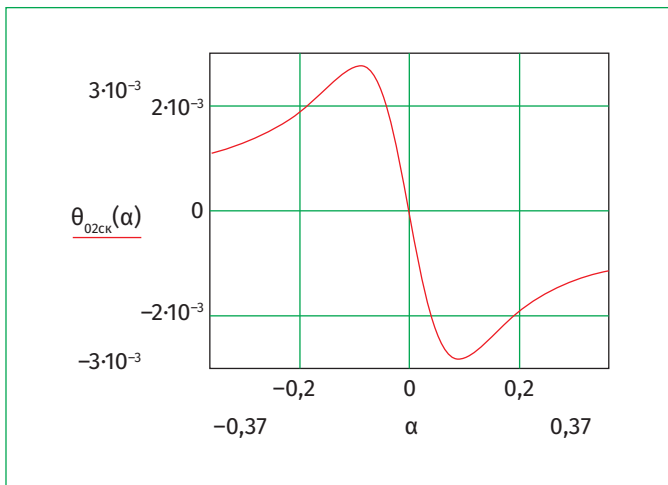


Рис. 17. Диаграмма функции выражения (19) с учетом знака для $\beta = 0,1$ рад ($\beta \approx 6^\circ$) и $H = 500$ км

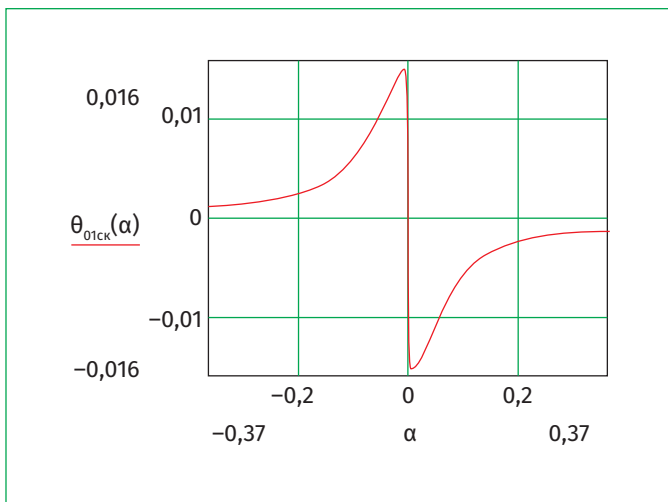


Рис. 18. Диаграмма функции выражения (19) с учетом знака для $\beta = 0$

точку $\alpha = 0$. Если считать, что КА движется по орбите из области отрицательных углов α в область положительных, то $d\vartheta/dt$ будет положительна при отрицательных углах α (угол α увеличивается) и отрицательна при положительных α .

В качестве примера, на рис. 17 представлена функция выражения (19) с учетом знака для $\beta = 0,1$ рад ($\beta \approx 6^\circ$) и $H = 500$ км (аналог рис. 15, а), а на рис. 18 эта же функция для $\beta = 0$.

Расчет по модулю выражения (20) для $\beta = 0$ дает гладкую кривую с максимумом при $\alpha = 0$. Однако знаки + и - в выражении (20) относятся к разным ветвям функции $d\vartheta/dt$ и при учете знаков расчет также показывает разрыв при переходе через точку $\alpha = 0$, аналогичный расчету по формуле (19) – рис. 18.

В соответствии с рис. 14–16, появляется еще одно требование к двигателю привода по углу места: требование по ускорению. Так для $\beta = 0,01$ и $H = 500$ км (рис. 14, а) двигатель должен развивать ускорение примерно 1 рад/с². Аналогично для $H = 500$ км и $\beta = 0,1$ (рис. 15, а) ускорение должно составлять около $0,05$ рад/с², а для $\beta = 0,2$ (рис. 16, а) – 10^{-2} рад/с². По-видимому требования по ускорению приведут к необходимости увеличения мощности двигателя привода антенны по углу места.

Перейдем к оценке скорости привода антенны по азимуту.

Дифференцируя выражение (16) по t , получим для скорости привода антенны по углу φ :

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\sin \beta}{(\sin^2 \beta + \operatorname{tg}^2 \alpha) \cos^2 \alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt},$$

или с учетом формулы (10):

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dt} &= \\ &= \frac{\sin \beta}{(\sin^2 \beta + \operatorname{tg}^2 \alpha) \cos^2 \alpha} \cdot \frac{631}{\sqrt{(R+H)^3}}. \end{aligned} \quad (21)$$

Проведем расчеты скорости привода антенны по азимуту для $H = 500$ км при ограничениях по условиям выражений (17), (18). На рис. 19 представлен график скорости привода по азимуту отношения (21) $d\varphi/dt = \varphi_{\text{ск}}(\alpha)$ как функция угла α для $\beta = 0,071$ рад $\approx 4^\circ$. Как следует из графика,

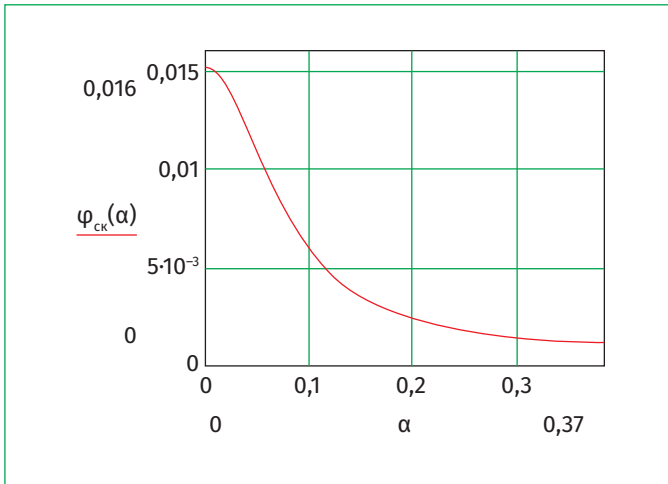


Рис. 19. График скорости привода по азимуту $d\varphi/dt = \varphi_{ck}(\alpha)$ ($\beta \approx 4^\circ$)

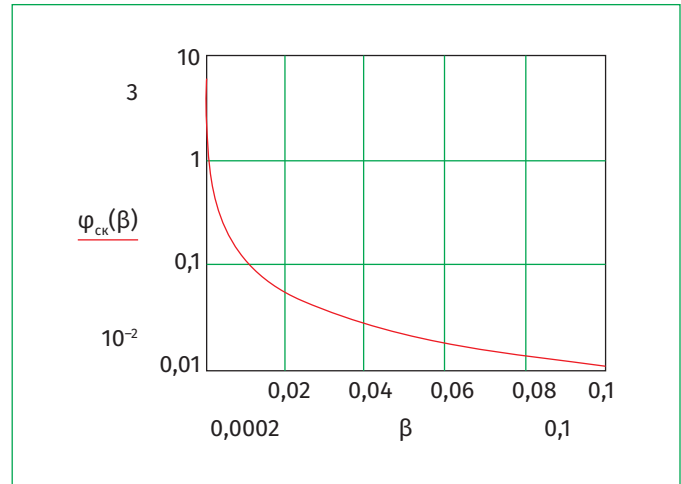


Рис. 21. График функции выражения (22) для $H = 500$ км в пределах $2 \cdot 10^{-4} \leq \beta \leq 0,1$ рад ($0,7' \leq \beta \leq 6^\circ$)

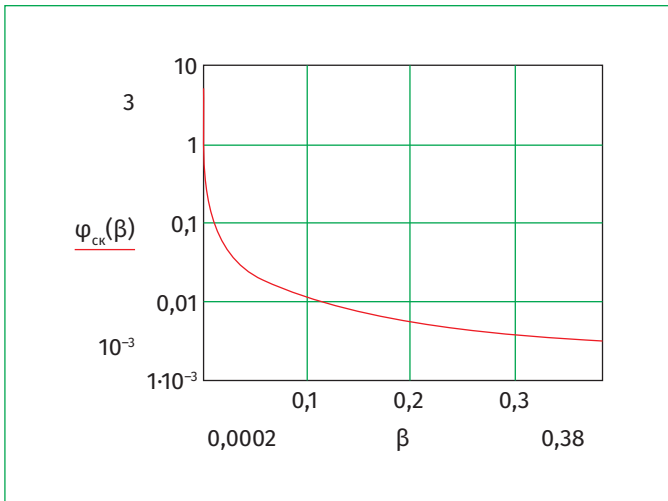


Рис. 20. График функции выражения (22) для $H = 500$ км в пределах $2 \cdot 10^{-4} \leq \beta \leq 0,38$ рад ($0,011^\circ = 0,7' \leq \beta \leq 22^\circ$)

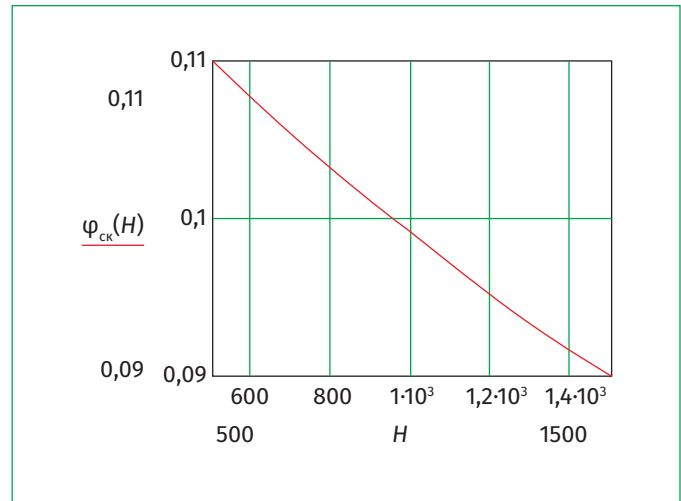


Рис. 22. График функции выражения (22) для наклона орбиты $\beta = 0,01$ рад ($0,6^\circ$)

максимальная скорость привода по азимуту при $\alpha = 0$ в этом случае составляет $0,015$ рад/с ($0,9$ град./с), что совпадает с максимальной скоростью привода по углу места (выражение (5), рис. 5, 7, 13).

В соответствии с выражением (21) скорость привода по азимуту при $\alpha = 0$ равна:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{\sin\beta} \cdot \frac{631}{\sqrt{(R+H)^3}}. \quad (22)$$

Так как при $\beta \rightarrow 0$ производная $d\varphi/dt \rightarrow \infty$, на рис. 20 представлен график функции формулы (22) $d\varphi/dt = \varphi_{ck}(\beta)$ для $H = 500$ км в пределах $2 \cdot 10^{-4} \leq \beta \leq 0,38$ рад ($0,011^\circ = 0,7' \leq \beta \leq 22^\circ$), а на рис. 21 тот же график в уменьшенных пределах по углу β : $2 \cdot 10^{-4} \leq \beta \leq 0,1$ рад ($0,7' \leq \beta \leq 6^\circ$). При $\beta = 2 \cdot 10^{-4}$ рад $\varphi_{ck} = d\varphi/dt = 5,775$.

Как следует из выражения (22), рис. 20, 21, выбор скорости привода антенны по азимуту определяет предельный угол

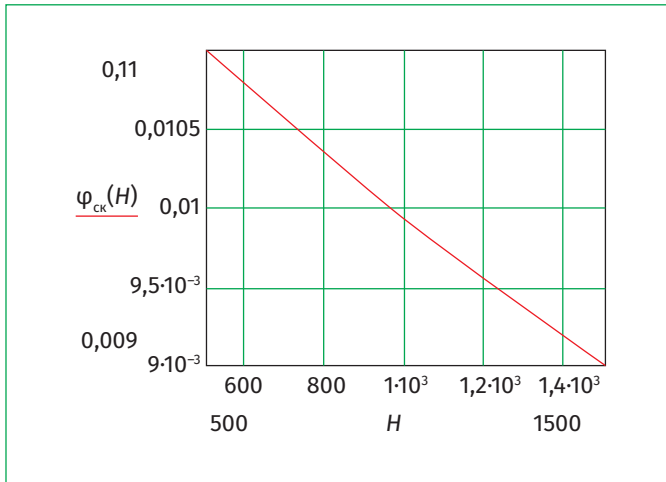


Рис. 23. График функции выражения (22) для наклона орбиты $\beta = 0,1$ рад (6°)

$\vartheta_0 = \beta$. В зоне углов $\vartheta \leq \vartheta_0$ антенна не успеет сопровождать КА по азимуту, и система управления антенной должна учитывать это обстоятельство.

Наконец, на рис. 22, 23 представлены графики функции выражения (22) $d\varphi/dt = \varphi_{\text{СК}}(H)$ в зависимости от высоты орбиты КА $500 \leq H \leq 1500$ км для наклона орбиты $\beta = 0,01$ рад ($0,6^\circ$) – рис. 22 и $\beta = 0,1$ рад (6°) – рис. 23.

Оценка скорости привода антенны по допустимому перерыву связи НС с КА

Рассмотрим задачу оценки такой скорости привода антенны по азимуту, которая позволяет пройти точку зенита без потери радиосвязи НС с КА. Требуемая скорость для $H = 500$ км и $\Delta\theta = 0,02$ рад ($\Delta\theta \approx 1,2^\circ$) оказалась чрезмерно большой: $d\varphi/dt \approx 2,4$ рад/с или $d\varphi/dt \approx 137$ град./с. Заметим, что в соответствии с формулой (22), скорость $d\varphi/dt \approx 2,4$ рад/с позволяет обеспечить сопровождение КА на орбите с наклоном $\beta \approx 5 \cdot 10^{-4}$ рад или $\beta \approx 0,029^\circ \approx 1,7'$.

Изменим условия задачи: оценим такую скорость привода антенны по азимуту, которая удовлетворяет или требованию по допустимому перерыву связи НС с КА, или требованию определенной вероятности нахождения КА в зоне зенита.

Рассмотрим задачу последовательно.

Пусть антенна с малой шириной ДН $\Delta\theta = 0,02$ рад ($\Delta\theta = 1,15^\circ$) сопровождает КА на орбите высотой $H = 500$ км, проходящей через зенит.

Воспользуемся схемой рис. 9. В соответствии с условием выражения (17) для $H = 500$ км и $\beta = 0$ $\alpha_m = 0,383$ рад, а, следовательно, зона видимости КА с антенны (от горизонта до горизонта) занимает угол $2\alpha_m = 0,766$ рад (44°). Примем, что допустимой является потеря в зоне зенита 10% общего времени связи за

Параболическая антенна космической станции связи



При подходе космического аппарата к зениту система управления антенной должна прекратить сопровождение спутника по углу места и начать разворот по азимуту со скоростью 0,045 рад/с.

Изображение: фотобанк ЛОРИ

Навигационный спутник

сеанс, что соответствует углу $\Delta\alpha = 0,766/10 \approx 0,077$ рад ($\Delta\alpha \approx 4,4^\circ$). КА пройдет по орбите путь $\Delta L = (R + H)\Delta\alpha \approx 530$ км, при скорости движения формулы (3), за время

$$\Delta T = (530 \cdot \sqrt{6900}) / 631 \approx 70 \text{ с.}$$

За это время антенна должна развернуться по азимуту на 180° , т.е. развернуться со скоростью $d\varphi/dt = \pi/70 \approx 0,045$ рад/с (примерно 3 град/с или 0,5 об./мин). В соответствии с рис. 19, такая скорость разворота по азимуту поз-

воляет сопровождать КА на орбите с наклонением $\beta \approx 0,022$ рад ($\beta = 1,26^\circ$).

При подходе КА к зениту, а именно к значению $\alpha \approx 0,038$ рад, система управления антенной должна прекратить сопровождение КА по углу места и начать разворот по азимуту со скоростью 0,045 рад/с. По окончании разворота по азимуту на 180° КА оказывается опять на оси ДН ($\alpha \approx 0,038$ рад) и антенна продолжает сопровождать КА по уменьшающемуся углу места. Заметим, что в соответствии с рис. 11, б, при

Мощность двигателей приводов антенн, разработанных в США, лежит в диапазоне 100...1000 Вт.

$\alpha = 0,038$ рад угол места антенны составляет чуть больше $\vartheta \approx 1$ рад, т.е. равен примерно $\vartheta \approx 60^\circ$ и не доходит до зенита на 30° , хотя скорость разворота антенны по азимуту $d\varphi/dt = \pi/70 \approx 0,045$ рад/с позволяет сопровождать КА на орбите с наклоном $\beta \approx 0,022$ рад ($\beta = 1,26^\circ$).

Таким образом, в соответствии с приведенными данными для скорости разворота антенны по азимуту $d\varphi/dt = 0,045$ рад/с (3 град./с) радиосвязь НС с КА в районе зенита при высоте орбиты КА $H = 500$ км и ширине ДН антенны $\Delta\theta = 0,02$ рад ($\Delta\theta = 1,15^\circ$) будет прерываться примерно на 70 с, что составляет 10% общего времени связи в сеансе.

Теперь оценим вероятность нахождения КА в зоне углов $\alpha \leq 0,0383$ рад.

Если считать, что появление КА на орбите высотой $H = 500$ км равновероятно в любой точке зоны видимости с антенны НС, т.е. при $\alpha_m \leq 0,383$ рад, то вероятность $p(\alpha \leq \alpha_3 = 0,0383$ рад) появления КА в зоне углов $\alpha \leq \alpha_3$, очевидно, равна отношению частей поверхности сферы единичного радиуса, ограниченных, соответственно, углами α_3 и α_m :

$$p(\alpha \leq \alpha_3) = \frac{\int_0^{\alpha_3} \int_0^{2\pi} \sin\theta d\vartheta d\varphi}{\int_0^{\alpha_m} \int_0^{2\pi} \sin\theta d\vartheta d\varphi} = \frac{\sin^2 \frac{\alpha_3}{2}}{\sin^2 \frac{\alpha_m}{2}}.$$

Для $\alpha_3 = 0,038$ рад и $\alpha_m = 0,383$ рад получим $p(\alpha \leq 0,0383) = 0,01$, т.е. вероятность появления КА с высотой орбиты $H = 500$ км в зоне углов $\alpha \leq 0,0383$ рад равна 1%.

Напомним, что в соответствии с выражением (6) соотношение мощностей приводов антенны по азимуту и по углу места равно:

$$\frac{W_{аз}}{W_{ум}} = 2 \frac{d\varphi}{d\vartheta}.$$

Для сведения, мощность двигателей приводов антенн, разработанных в США [3], лежит в диапазоне 100...1000 Вт. Так, мощность двигателей приводов антенны РЛС SCR-584 и по азимуту, и по углу места составляет 350 Вт при максимальной скорости вращения 6 об./мин (0,63 рад/с) по азимуту и 3,5 об./мин (0,37 рад/с) по углу места.

Выводы

1. Представлены способы оценки скоростей приводов НА по азимуту и углу места при сопровождении КА на круговых орбитах. Оценки основываются или на условии непрерывной радиосвязи с КА при его проходе через зенит НА, или на условии потери радиосвязи с КА в заданном интервале времени.

2. Показано решение задачи определения координат КА относительно НА при произвольном наклоне плоскости орбиты КА к оси центр Земли-НА. На основе решения определены требуемые скорости сопровождения КА по азимуту и углу места и приведены результаты расчетов скоростей для конкретных углов наклона плоскости орбиты.

3. Результаты исследования могут быть использованы при выборе или при разработке наземной антенны, которая предназначается для сопровождения КА на круговых орбитах.

Список литературы

1. Антенны сантиметровых волн. Пер. с англ. / под ред. д-ра техн. наук, проф. Я.Н. Фельда. М.: Советское радио, 1950. Т. 1, 2.
2. Колесников Е.П., Купин М.Н., Червяков И.В. Практические задачи ракетно-космической радиотехники. НПЦ «СОТИС». М.: Красная Звезда, 2021.
3. Механизмы вращения антенн. Пер. с англ. / под ред. Г.С. Ханевского. М.: Советское радио, 1951.
4. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. М.: ГИТТЛ, 1956. Т. 1.

References

1. *Antenny santimetrovyyh voln. Per. s angl.* [Centimeter wave antennas. Trans. from English]. Pod red. d-ra tekhn. nauk, prof. Ya. N. Fel'da. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1950, V. 1, 2. (In Russ.).
2. Kolesnikov E.P., Krupin M.N., Chervyakov I.V. *Prakticheskie zadachi raketno-kosmicheskoy radiotekhniki. NPC «SOTIS».* [Practical tasks of rocket and space radio engineering. NPC «SOTIS»]. Moscow, Krasnaya Zvezda, 2021. (In Russ.).
3. *Mekhanizmy vrashcheniya antenn. Per. s angl.* [Mechanisms of antenna rotation. Trans. from English]. Pod red. G.S. Hanevskogo. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1951. (In Russ.).
4. Frisch S.E., Timoreva A.V. *Kurs obshchej fiziki* [Course of General Physics]. Moscow, GITTL, 1956, V. 1. (In Russ.).

Поступила в редакцию: 28.11.2023

Одобрена рецензентами: 29.11.2023

Принята к печати: 04.12.2023

Об авторах

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

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

Михаил Николаевич Купин – главный конструктор НПЦ «СОТИС».

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

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

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

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

УДК 66.083.2

ЗАЩИТНЫЕ СИСТЕМЫ ДЕТОНАЦИОННОЙ АВТОМАТИКИ В ТОКАМАКАХ*

М.В. МАНЗУК, Д.И. АЛЕКСЕЕВ, А.М. КУДРЯВЦЕВА, Ю.Н. ЛАТМАНИЗОВА, В.В. ХАРЧЕНКО,
АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»

С.И. КРИВОШЕЕВ, д.т.н., проф., С.Г. МАГАЗИНОВ, к.т.н.,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

С.М. МИКЛЯЕВ,
Частное учреждение государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР»

Аннотация. Проведены аналитические и экспериментальные исследования работоспособности разрушаемых взрывом элементов конструкции защитных коммутационных аппаратов размыкающего типа, определены: коэффициенты запаса по импульсному взрывному нагружению, необходимые для надежного срабатывания и гарантированного разрушения токоведущих элементов; расчетно-экспериментальные параметры значений давления продуктов взрыва и скорости разлета цилиндрического токоведущего элемента (оболочки) в водной среде.

Ключевые слова: ЗАЩИТНЫЕ КОММУТАЦИОННЫЕ АППАРАТЫ; ДЕТОНАЦИОННАЯ АВТОМАТИКА; РАЗМЫКАТЕЛЬ ЗАЩИТНЫЙ; ВЗРЫВ В ВОЗДУШНОЙ И ВОДНОЙ СРЕДЕ; ПРОДУКТЫ ВЗРЫВА; МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ; КОММУТАЦИЯ; АВАРИЙНЫЕ ТОКИ.

Для цитирования: Манзук М.В. Защитные системы детонационной автоматики в современных токамаках / М.В. Манзук, Д.И. Алексеев, А.М. Кудрявцева, Ю.Н. Латманизова, В.В. Харченко, С.И. Кривошеев, С.Г. Магазинов, С.М. Микляев // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 2. С. 82–95.

* Работа выполнена в рамках Договора №17706413348230000070/39-23/01 от 23.05.2023 на выполнение НИОКР «Разработка, опытное изготовление и испытания образцов коммутирующей аппаратуры, энергопоглощающих резисторов, шинопроводов и контрольно-измерительной аппаратуры для систем электропитания обмоток магнитной системы ИТЭР в 2023 году». Государственный контракт № Н.4а.241.19.23.1014 от 18.01.2023.

PROTECTIVE SYSTEMS OF DETONATION AUTOMATION IN MODERN TOKAMAKS

M.V. MANZUK, D.I. ALEKSEEV, A.M. KUDRIAVTSEVA, Y.N. LATMANIZOVA, V.V. KHARCHENKO,
JSC «D.V. Efremov Research Institute of Electrophysical Equipment»

S.I. KRIVOSHEEV, Grand PhD in Engineering, Prof., S.G. MAGAZINOV, PhD in Engineering,
St. Petersburg Polytechnic University Peter the Great

S.M. MIKLYAEV,
Private institution of the State Atomic Energy Corporation «Rosatom» «ITER Project Center»

Abstract. Analytical and experimental studies of the operability of the structural elements of protective switching devices of the opening type destroyed by an explosion were carried out, the following factors were determined: the reserve coefficients for pulsed explosive loading necessary for reliable operation and guaranteed destruction of current-carrying elements; calculated and experimental parameters of the pressure values of the explosion products and the expansion velocity of the cylindrical current-carrying element (shell) in an aqueous medium.

Keywords: PROTECTIVE SWITCHING DEVICES; DETONATION AUTOMATION; PROTECTIVE DISCONNECTOR; EXPLOSION IN AIR AND WATER ENVIRONMENT; EXPLOSION PRODUCTS; MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS; SWITCHING; EMERGENCY CURRENTS.

For citation: Manzuk M.V., Alekseev D.I., Kudriavtseva A.M., Latmanizova Y.N., Kharchenko V.V., Krivosheev S.I., Magazinov S.G., Miklyaev S.M. Protective systems of detonation automation in modern tokamaks. *Perspektivnye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti* [Promising technologies for security systems], 2023, N 2, pp. 82–95 (In Russ.).

Введение

Данные Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) свидетельствуют, что в мире насчитывается 62 электрофизические установки типа токамак, находящиеся на различных стадиях жизненного цикла. В частности, 52 токамака – в эксплуатации, 5 – на стадии сооружения, 1 проект закрыт, 4 – конструируют.

Значительный прогресс в развитии токамаков произошел в результате перехода от резистивных к сверхпроводниковым магнитным системам, что позволилократно снизить энергозатраты на создание и удержание магнитных полей и,

одновременно, существенно увеличить уровень индукции в вакуумной камере. Кроме того, это позволило перейти от создания импульсных термоядерных установок к установкам, работающим в квазистационарном режиме.

Однако сверхпроводниковые магнитные системы имеют чрезвычайно высокую стоимость и легко могут быть критически повреждены, вплоть до полного разрушения, в случае перехода сверхпроводника в нормальное (резистивное) состояние. В этом случае для защиты сверхпроводниковой катушки необходимо быстро вывести энергию, запасен-

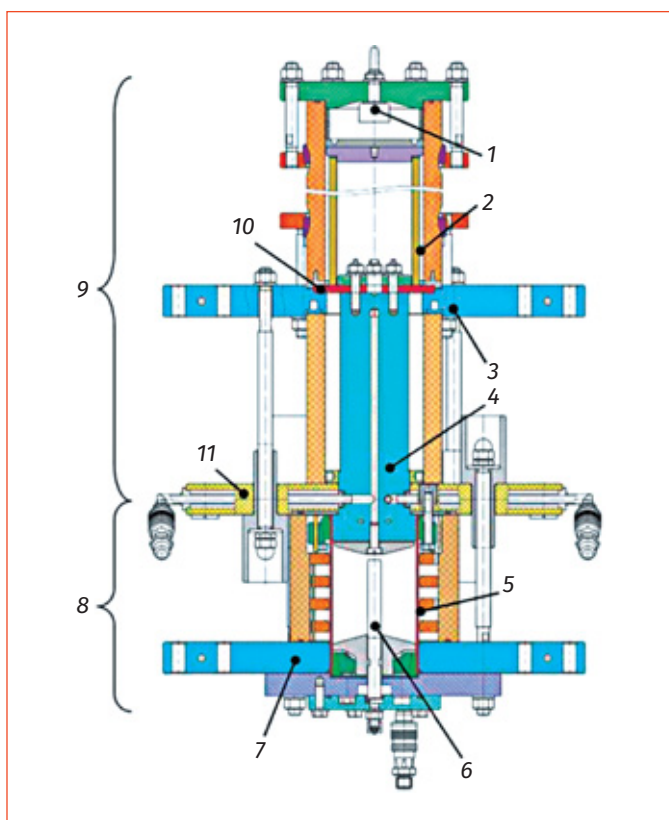


Рис. 1. Основные элементы конструкции размыкателя защитного: 1 – верхний заряд; 2 – диэлектрический цилиндр; 3 – верхний токоподвод; 4 – центральный токоподвод; 5 – контактный цилиндр; 6 – нижний заряд; 7 – нижний токоподвод; 8 – коммутационная секция; 9 – отделитель; 10 – мембрана; 11 – основание

ную в ее магнитном поле, чтобы избежать локального перегрева участка обмотки, потерявшего сверхпроводящие свойства.

Сбой в процессе вывода энергии может вызвать необратимые повреждения термоядерной установки стоимостью в миллионы, а иногда и в миллиарды долларов, поэтому к надежности систем быстрого вывода энергии предъявляются исключительно высокие требования.

Цель данной работы состоит в уточнении расчетно-экспериментальных методов определения значений давлений и усилий, возникающих от продуктов взрыва (ПВ) в воздушной и водной средах, для оптимизации разрушаемых элемен-

тов конструкции защитных коммутационных аппаратов, а также определения коэффициентов запаса по импульсному взрывному нагружению, необходимых для гарантированного разрушения токоведущих элементов.

Устройство и принцип действия размыкателя защитного

Защитный коммутационный аппарат размыкающего типа, рассматриваемый в данной работе, применен в нескольких современных токамаках со сверхпроводниковой магнитной системой, в частности: ИТЭР, JT-60SA и KSTAR. Конструкция аппарата (защищена патентом РФ [1]) представлена на рис. 1 и состоит из коммутирующей части и отделителя, соединенных последовательно.

Для обеспечения работоспособности размыкателя защитного (РЗ) при длительном протекании больших постоянных токов применяется водяное охлаждение, которое позволяет ограничить разогрев токоведущих элементов и сопрягаемых с ними частей конструкции. Процесс охлаждения осуществляется с помощью деминерализованной воды, протекающей сквозь внутренний объем размыкателя, в котором, в том числе, в доль оси симметрии разрушаемого элемента расположен заряд взрывчатого вещества (ВВ).

РЗ приводится в действие энергией двух зарядов ВВ. В результате детонации ВВ, расположенного в коммутирующей части, внутри разрушаемого контактного цилиндра создается избыточное давление, которое разрывает его по заранее подготовленным проточкам – концентраторам напряжений. Электрическая дуга, возникающая в образующихся промежутках, гасится охлаждающими потоками воды, вытекающими из внутренней области цилиндра.

Одновременно с подрывом заряда коммутирующей части происходит детонация ВВ отделителя, в результате чего приводится в движение диэлектрический цилиндр (твердотельный изолятор), который разрезает мембрану и, опустившись до основания, отделяет центральный токопровод от верхнего токоподвода, обеспечивая требуемую электрическую прочность после размыкания цепи.

Расчет прочности разрушаемых элементов конструкции

В работе приведены прочностные параметры мембраны отделителя с учетом оценочного коэффициента динамической нагрузки и разрушаемого контактного цилиндра за пределами упругости по теории Мизеса с учетом рассчитанного коэффициента динамической нагрузки для реальных условий нагружения.

Мембрана отделителя. При взрыве верхнего заряда отделителя массой 8 г образуются горячие газы от продуктов взрыва в известном замкнутом объеме. Зная кислородный баланс, теплоту и температуру взрыва заряда ВВ (RDX насыпной плотности [2, 3, 4]), допуская, что процесс протекает без теплообмена с окружающей средой, т.е. является адиабатическим, можно оценить давление продуктов взрыва по формуле Менделеева-Клапейрона для идеальных газов.

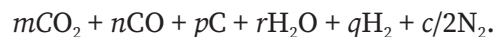
Давление от продуктов взрыва, развивающееся внутри вкладыша, составляет

величину менее 50 МПа (вкладыш при этом не разрушается), в таком случае допускается применение уравнения Менделеева-Клапейрона для идеальных газов.

При детонации ВВ тепло преобразуется в механическую работу, которую совершают продукты взрыва (ПВ) в процессе своего расширения. Стоит отметить, что при давлениях 50...100 МПа (давление внутри зарядной капсулы) закон расширения ПВ описывается политропой вида $PV^n = \text{const}$, при меньших давлениях – адиабатой $PV^\gamma = \text{const}$, где $\gamma = C_p/C_v$, т.е. соотношение теплоемкостей ПВ при постоянном давлении и объеме, как для идеальных газов.

Если элементарный состав газов ВВ отвечает формуле $C_aH_bN_cO_d$ и ВВ имеет отрицательный кислородный баланс (для гексогена $C_3H_6N_6O_6$ – 21,6%), то ПВ могут содержать следующие газы: CO_2 , CO , C в виде сажи, графита или алмаза, H_2O , H_2 , N_2 .

Реакцию разложения можно записать в виде:



Согласно работе [4], при больших степенях расширения ПВ гексогена с насыпной плотностью образуется состав газов, приведенный в табл. 1.

Существуют различные газодинамические методики расчета продуктов взрыва ВВ, основанные на минимуме потенциалов Гиббса и другие [3, 5, 6].

Таблица 1

Состав газов, образующийся при больших степенях расширения ПВ гексогена с насыпной плотностью

Плотность, г/см ³	H ₂ O	H ₂	CO ₂	CO	C	N ₂
1,0	2,8	0,11	0,67	1,855	0,45	2,98
1,1	2,13	0,75	0,93	2,0	–	3,0

Таблица 2

Соотношения теплоемкостей и температуры взрыва

Развиваемое давление, МПа	T_k , К	$RT_{пр.}$, МДж/кг	$RT_{газ.}$, МДж/кг	$Z_{газ.}$ %	$\mu_{газ.}/\mu_{пв.}$	$\gamma = C_p/C_v$	α , дм ³ /кг	ρ , кг/дм ³
10	3684	1,294	1,294	100	23,66/23,66	1,2377	1,177	1,8
15	3734	1,307	1,307	100	23,75/23,75	1,2361	1,173	1,8
20	3769	1,316	1,316	100	23,81/23,81	1,2369	1,17	1,8

При взрыве гексогена насыпной плотности в ограниченном объеме определение состава газов эмпирическими расчетными методиками является весьма нетривиальной задачей термодинамики. Для ее решения может быть использовано расчетное моделирование по термодинамической программе ВКВ-Т [7]. Результаты расчета молярной массы ПВ при взрыве заряда гексогена плотностью 1,8 г/см³ в замкнутом объеме при давлениях от 10 до 20 МПа, с учетом α -ковольума (коэффициент, учитывающий размер молекул газов), соотношения теплоемкостей и температуры взрыва T_k приведены в табл. 2.

Согласно расчетной оценке при давлении 20 МПа и $T = 3769$ К, молярная масса газов составляет величину 23,81 г/моль.

При взрыве верхнего заряда гексогена массой 8 г образуются горячие газы от продуктов взрыва в замкнутом объеме. Тогда, с учетом вышеизложенного, используя уравнение Менделеева-Клапейрона, может быть записано выражение:

$$P \cdot V = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot T, \quad (1)$$

где P – расчетная величина определяемого давления, МПа; m – масса газов ПВ гексогена, равная $8 \cdot 10^{-3}$ кг; R – универсальная газовая постоянная, 8,31 Дж/моль·К; T – температура взрыва гексогена (RDX)

в градусах Кельвина; μ – молярная масса продуктов взрыва, равная 23,81 г/моль (стоит отметить, что молярная масса CO = 28 г/моль).

Таким образом, уточненная расчетная величина давления горячих газов составляет 24,86 МПа.

Мембрана изготовлена из листа ГПРХХ 12 М1 по ГОСТ 1175–2006. Медь отоженная марки М1 по ГОСТ 859–2014 имеет следующие механические характеристики:

модуль Юнга $E = 1,28 \cdot 10^5$ МПа;

предел текучести $\sigma_T = 220 \dots 250$ МПа.

Для проведения и упрощения оценочных расчетов в работе сделаны следующие допущения:

не учитываются потери на трение;

не учитывается диссипация энергии

от ПВ гексогена, т.е. считается, что давление горячих газов передается через манжету и крышку на цилиндр диэлектрический и мембрану срезную, равномерно распределяясь вдоль длины срезаемого кольца мембраны.

Взаимодействие тел, при котором за малый промежуток времени значительно (скачкообразно) изменяются скорости этих тел, называется ударом [8]. Для его практического анализа можно установить динамический коэффициент нагружения k_d , который показывает во сколько раз максимальные напряжения и деформации при ударе больше соответствующих напряжений и деформаций при стати-

ческом приложении нагрузки. Для нашей задачи на основе практического опыта и с учетом рекомендаций [8] обоснованно принимаем для оценочных расчетов динамический коэффициент нагружения, равный $K_d = 1,5$.

Принимаем $\sigma_T = 240$ МПа [8–10]. Для общих машиностроительных расчетов получаем условие прочности по нормальным напряжениям с учетом динамики:

$$\sigma = \sigma_T \cdot K_d = 240 \cdot 1,5 = 360 \text{ МПа,}$$

где σ – допускаемые напряжения.

Условие гарантированного разрушения мембраны срезной можно записать в следующем виде: $\sigma_{\max} \geq \sigma$.

В результате выполнения оценочного расчета максимальных напряжений среза по известной методике, описанной в работе [9], принимая, что эквивалентная толщина мембраны в зоне среза составляет 4 мм, а также зная геометрические характеристики диэлектрического цилиндра и величину давления ПВ, получаем максимальные значения нормальных напряжений $\sigma_{\max} = 1174$ МПа.

Полученное значение существенно превышает допускаемые напряжения (в 3,6 раза), и выполняется условие гарантированного разрушения мембраны.

Токведущий цилиндр. Расчетные оценки внутреннего давления, при котором весь материал тонкостенного цилиндра разрушаемого переходит в пластическое состояние [10], целесообразно проводить с помощью теории пластичности Мизеса.

При взрывах и сильных ударах выделяется значительная кинетическая энергия, которая вызывает разрушения инженерных систем и элементов конструкций. Существуют различные технические решения, основанные на поглощении или рассеянии этой энергии. Известно решение для цилиндров, находящихся

под действием внутреннего и внешнего давлений [8, 10, 11]. Для сферических оболочек – решения [11, 12] (с учетом импульсного взрывного нагружения). Определение предельного значения давления, при котором весь материал переходит в пластическое состояние, выполнено с учетом следующих допущений:

материал является несжимаемым в гидродинамическом приближении;

под действием внутренней нагрузки цилиндр расширяется устойчиво, так что перемещения являются радиальными;

стенка цилиндра находится в условиях плоского деформированного состояния, т.е. относительное удлинение материала вдоль оси z отсутствует, $\epsilon_z = 0$.

На рис. 2 приведены эпюры распределения напряжений по толщине цилиндра, находящегося под действием внутреннего давления.

Эпюры распределения главных напряжений σ_z и σ_r , построены по формулам, представленным в работе [10]. С учетом

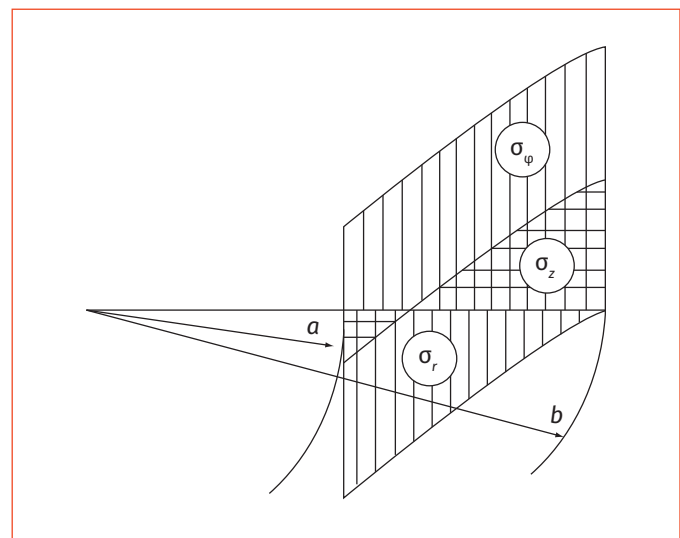
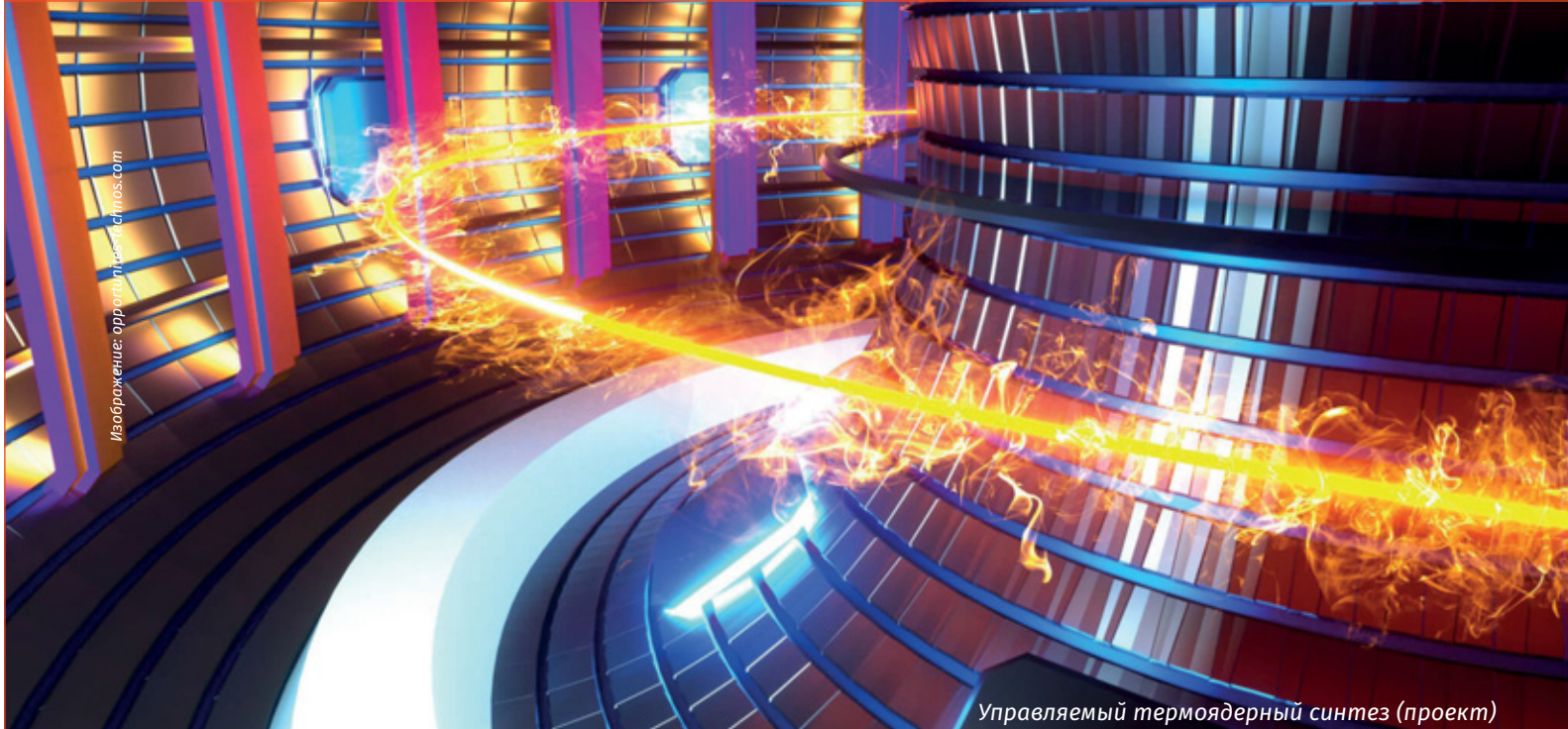


Рис. 2. Эпюры распределения напряжений по толщине цилиндра, находящегося под действием внутреннего давления: σ – нормальные (главные) напряжения; z, r и φ – цилиндрические координаты; a – внутренний радиус цилиндра; b – наружный радиус цилиндра; $\sigma_\varphi > \sigma_z > \sigma_r$



Управляемый термоядерный синтез (проект)

допущения, что материал цилиндра следует идеальной диаграмме пластичности, при увеличении внутреннего давления пластическое состояние достигается прежде всего на внутренней поверхности цилиндра.

Условие достижения по критерию Мизеса можно записать:

$$q = \sigma_T \frac{b^2 - a^2}{\sqrt{3}b^2}, \quad (2)$$

где q – внутреннее давление; b – наружный радиус цилиндра; a – внутренний радиус цилиндра; σ_T – предел текучести материала.

При решении задачи будем исходить из теории пластичности Мизеса [10], применяя формулу, которая дает решение для случая плоской деформации и соответствует именно закрытому цилиндру:

$$q_T = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T \ln \frac{b}{a}. \quad (3)$$

Анализ экспериментальных данных механических характеристик меди М1 по степени деформации в зависимости от

скорости деформации хорошо описан в работе [13]. Скорость деформации медного цилиндра на интересующем нас радиусе оценена по методике Покровского [14] для полубесконечного пространства. При импульсном взрывном нагружении скорости расширения цилиндра на радиусах 111/2 и 117/2 мм составляют 20 м/с. Это соответствует величине $1,5 \cdot 10^4$ 1/с при деформации на 3 мм.

Механические свойства, характеризующие прочностные и пластические свойства меди марки М1, представлены в виде уравнений регрессии по данным из аппроксимации [13]:

$$\sigma_B = 250 + 15\varepsilon\%^{0,58}. \quad (4)$$

При скорости деформации 15...20 м/с по уравнению регрессии получаем сопротивление деформации, равным:

$$\sigma_S = 80 + 285\varepsilon\%^{0,226}. \quad (5)$$

Для экспериментальных данных, полученных на образцах цилиндра при статическом растяжении, получаем следующие значения:

$$\sigma_B = 250 + 15 \cdot 18,333^{0,58} = 332,75 \text{ МПа};$$

$$\sigma_s = 80 + 285 \cdot 18,333^{0,226} = 634,43 \text{ МПа.}$$

Экспериментальное значение σ_s показывает истинное значение динамического коэффициента нагружения $K_d = 634,43/332,75 = 1,9$ при скорости деформации 15...20 м/с.

По теории Мизеса при толщине стенки цилиндра 3 мм, без учета концентраторов напряжений (расчет в запас), с учетом коэффициента нагружения K_d допускаемые значения кратковременных разрушающих давлений (в динамике) равны:

$$q_T = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_b \ln \frac{b}{a} = 20,23 \text{ МПа.}$$

Таким образом, при давлении 20,23 МПа весь материал цилиндра токоведущего переходит в пластическое состояние и начинает движение.

**Оценочный расчет
давления продуктов взрыва
в зарядной капсуле**

Заряд гексогена массой 20 г насыпной плотности, расположенный в капсуле нижней камеры, имеет цилиндрическую форму, диаметр 12 мм и длину 140 мм. При вводе детонационного импульса от высоковольтного электродетонатора модели АТЭД-15 давление продуктов взрыва будет иметь величину в несколько десятков тысяч атмосфер.

В практике инженерных расчетов [2–4] применяют уравнение Ван-дер-Ваальса для реальных газов. Пусть объем зарядной камеры равен V и в ней размещено ВВ массой m , тогда:

$$p \cdot (V - b) = \frac{m}{M \cdot RT_{\text{взр}}}, \quad (6)$$

где b – несжимаемая часть объема газов в единицах объема; M – молекулярная масса ВВ в кг/моль; R – универсальная газовая постоянная, 8,31 Дж/моль·К; $T_{\text{взр}}$ – температура взрыва гексогена (RDX) в градусах Кельвина.

Обозначив $m/V = \rho_{\text{зар}}$ – плотность заряжения в кг/м³; $1/M = n$ – число молей продуктов взрыва в моль/кг; $b/m = \alpha$ – в м³/кг, получим выражение:

$$P_{\text{з.к.}} = nRT_{\text{взр}} \cdot (\rho_{\text{зар}} / (1 - \rho_{\text{зар}} \alpha)). \quad (7)$$

Далее, выразив $R = P_0 V_0 / T_0$ и обозначив $V_0 n = V_{\text{ок}}$ – объем ПВ при атмосферном давлении и температуре $T_0 = 283$ К, равный $22,4 \cdot 10^{-3}$, получим широко распространенное для расчетов уравнение Нобля–Абеля:

$$P_{\text{взр}} = (P_0 V_{\text{ок}}) \frac{T_{\text{взр}}}{T_0} \left[\frac{\rho_{\text{зар}}}{1 - \alpha_0 \rho_{\text{зар}}} \right], \quad (8)$$

где $P_0 = 0,1$ МПа.

Для оценочных расчетов значение коволюма ПВ гексогена при плотности 1,5 г/см³ равно $4,84 \cdot 10^{-4}$ м³/кг [3]. Рассчитанное значение ПВ $V_{\text{ок}} = 0,8$ м³/кг. При плотности заряжения 1000 кг/м³ $T_{\text{взр.}} = 3769$ К получаем давление в зарядной капсуле, окруженной водой, рассчитанное по формуле Нобля–Абеля:

$$P_{\text{взр}} = 20650 \text{ кгс/см}^2 \approx 2000 \text{ МПа.}$$

Амплитуда давления в ударной волне быстро падает и на расстоянии 10 радиусов заряда для сферической волны уменьшается приблизительно в 100 раз. В цилиндрической волне затухание будет менее интенсивным. Колебания газового пузыря могут быть циклическими. Известно [5, 6, 15, 16], что общепринятого уравнения состояния воды не существует. Для практических оценочных расчетов

используют эмпирические зависимости, наибольшее распространение получила формула Р. Коула [16] и ударная адиабата воды в форме уравнений Тэта [5, 6].

В грубом приближении получается, что на расстоянии 10 радиусов $R_{ВВ}$, т.е. на внутренней стенке разрушаемого цилиндра, давление воды составит величину ~ 20 МПа.

Выполненная расчетная оценка гидродинамического давления на внутренней стенке разрушаемого цилиндра, согласно которой расчетное значение гидродинамического давления на внутреннюю стенку цилиндра составляет ~ 20 МПа, позволяет сделать вывод о том, что при взрыве гексогена насыпной плотности массой 20 г гарантировано разрушение с рассчитанным динамическим нагружением 1,9.

Экспериментальное определение давления на стенке контактного цилиндра

Для определения величины и характера импульса давления, оказываемого на внутреннюю стенку контактного ци-

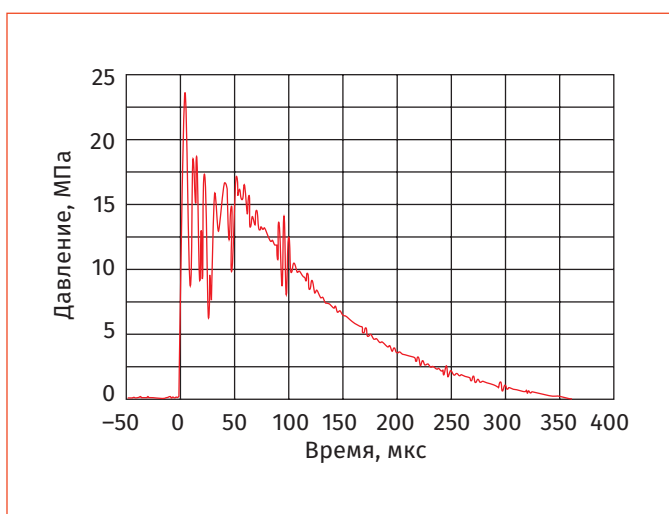


Рис. 3. Результаты прямого эксперимента по регистрации избыточного давления в эксперименте

линдра продуктами взрыва, проведено экспериментальное исследование на макете, представляющем собой коммутационную секцию РЗ с установленным в контактный цилиндр измерительным датчиком давления. Результаты прямого эксперимента зарегистрированы и приведены на рис. 3.

Амплитуда давления, зарегистрированная в результате экспериментального измерения ударной волны, составила 23,7 МПа. Колебания показаний могут быть вызваны как наводками на измерительную систему, так и наложением ударных волн, отраженных от стенок цилиндра до его разрушения.

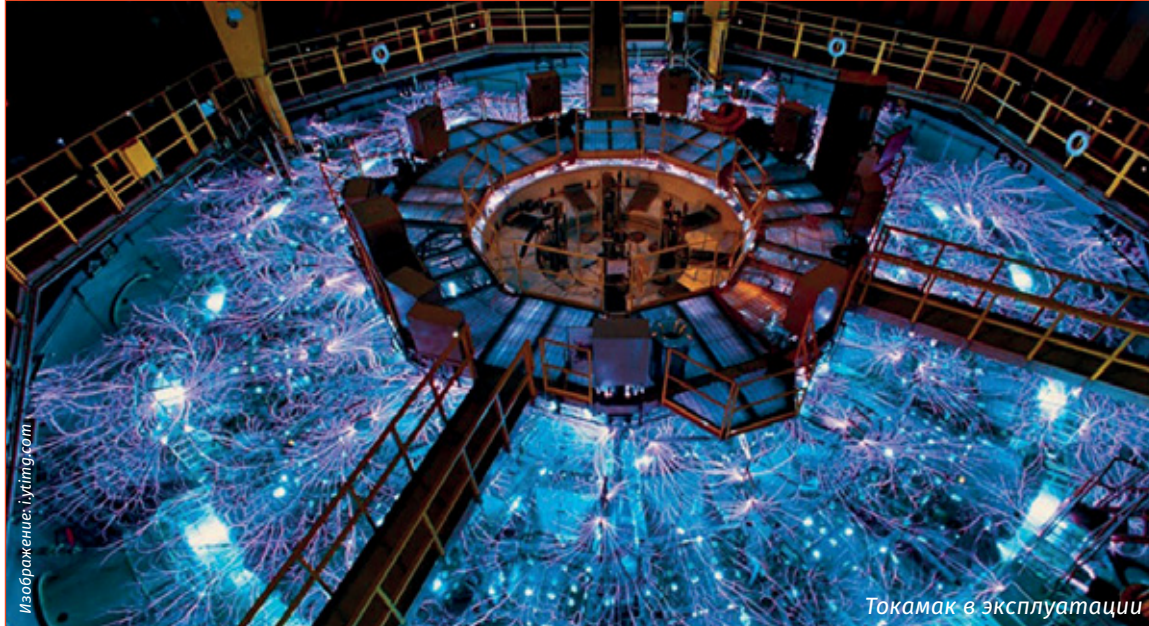
В эксперименте был использован индуктивный датчик избыточного давления ДДИ-20, который предназначен для измерения быстропеременных давлений в пневматических и гидравлических системах и нормирующего преобразователя НП-03 производства ООО «ЦАТИ».

Численное моделирование разрушения токопроводящего цилиндра

Для оценки характера и динамики процесса деформации контактного цилиндра в процессе коммутации выполнен численный анализ процесса деформации на основе данных, полученных по экспериментальным данным.

В качестве расчетной использована модель деформирования с пластическими характеристиками Джонсона–Кука [17] для бескислородной меди. Согласно модели пластичности Джонсона–Кука, механическое напряжение при пластическом деформировании описывается следующим выражением:

$$\sigma = [A + B\epsilon_p^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}_p^*][1 - T^{*m}], \quad (9)$$



Изображение: iutimg.com

Токамак в эксплуатации

где ε_p – эффективные пластические деформации; ε_p^* – относительная скорость деформации; T^{*m} – гомологическая температура; A, B, C, n, m – параметры модели.

Также использована модель разрушения Джонсона–Кука [17], которая определяется эмпирическим уравнением, согласно которому разрушение конечного элемента происходит, если параметр поврежденности D становится равным единице:

$$D = \frac{1}{\varepsilon_f} \sum_i \Delta \varepsilon_p^i \quad (10)$$

где $\Delta \varepsilon_p^i$ – приращение эффективной пластической деформации в конечном элементе на i -м шаге интегрирования по времени, а ε_f определяется формулой:

$$\varepsilon_f = \left(D_1 + D_2 \cdot \exp \left(D_3 \cdot \frac{P}{\sigma_{ef}} \right) \right) \times \left(1 + D_4 \cdot \ln \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0} \right) \times \left(1 + D_5 \cdot \frac{T - T_y}{T_m - T_y} \right), \quad (11)$$

где $D_1 \dots D_5$ – параметры материала; σ_{ef} – эффективное напряжение; P – давление в рассматриваемом конечном элементе.

Исследуемый элемент – контактный цилиндр, изготовленный из меди марки М1, через который до момента коммутации протекает постоянный ток. Объем внутри цилиндра заполнен водой, выполняющей функцию отведения тепла, а в момент коммутации – функцию передачи ударной волны, создаваемой вследствие детонации взрывчатого вещества, расположенного в нижнем заряде. Эта ударная волна воздействует на внутреннюю стенку контактного цилиндра, разрушая его.

Поскольку материал, из которого изготовлен контактный цилиндр, аналогичен материалу, использованному в данном исследовании (медь М1), выполним численный анализ процесса деформирования контактного цилиндра с учетом параметров модели разрушения (табл. 3), которые отличаются от исходной модели Джонсона–Кука и получены для меди М1 в работах [18, 19].

Расчетная область представляет собой сечение стенки цилиндра с концентраторами механического напряжения и упорные кольца. К внутренней стенке цилиндра прикладывается заданный импульс давления, задача решается в осесимметричной постановке. Численный анализ выполнен с использованием исходных параметров модели разрушения и параметров, полученных в результате настоящего исследования для меди М1. В

Численный анализ процесса деформирования контактного цилиндра с учетом параметров модели разрушения

Пункт	Параметр	Исходное значение	Новое значение
1	D_1	0,54	0,1
2	D_2	4,89	1,0
3	D_3	-3,03	-8,0
4	D_4	0,014	0,014
5	D_5	1,12	1,12

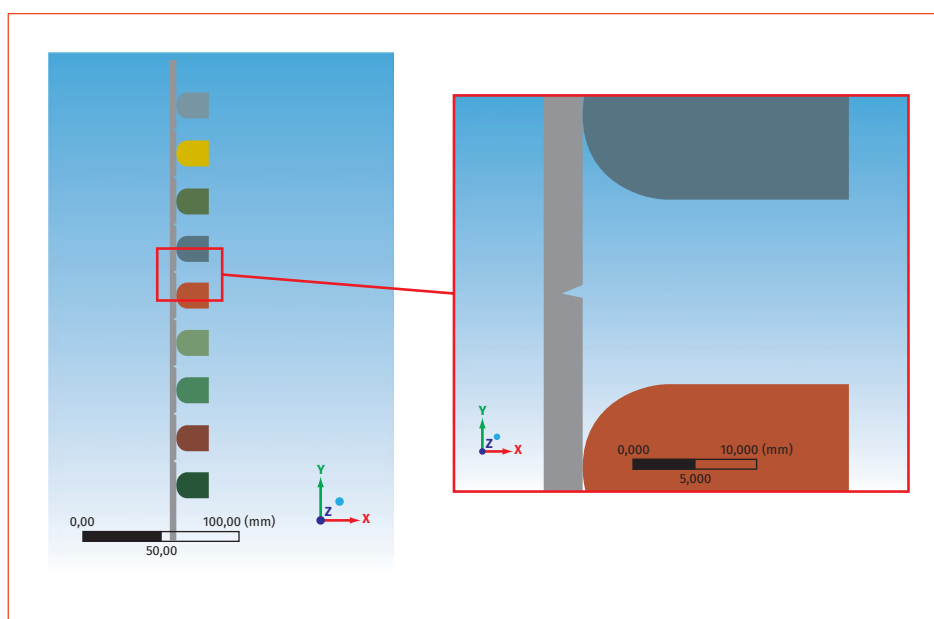


Рис. 4. Геометрия расчетной области

обоих случаях импульс воздействующего механического давления, а также прочие параметры модели одинаковы. Для выполнения численного расчета были использованы экспериментальные данные по измерению давления на внутренней стенке цилиндра, приведенные в пункте 4 (табл. 3).

Геометрия расчетной области представляет собой двухмерное сечение разрушаемого (токопроводящего) цилиндра и упоров. Область расчетов осесимметрична (рис. 4).

В результате численного анализа получено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу и деформация цилиндра (рис. 5).

Анализ результатов численного расчета показывает качественное совпадение с деформацией контактного цилиндра, получаемого при исследовании коммутирующей способности РЗ, и количественное совпадение величины давления, необходимого для обеспечения деформации, при этом скорость деформации цилиндра достигает величин порядка 10^4 1/с.

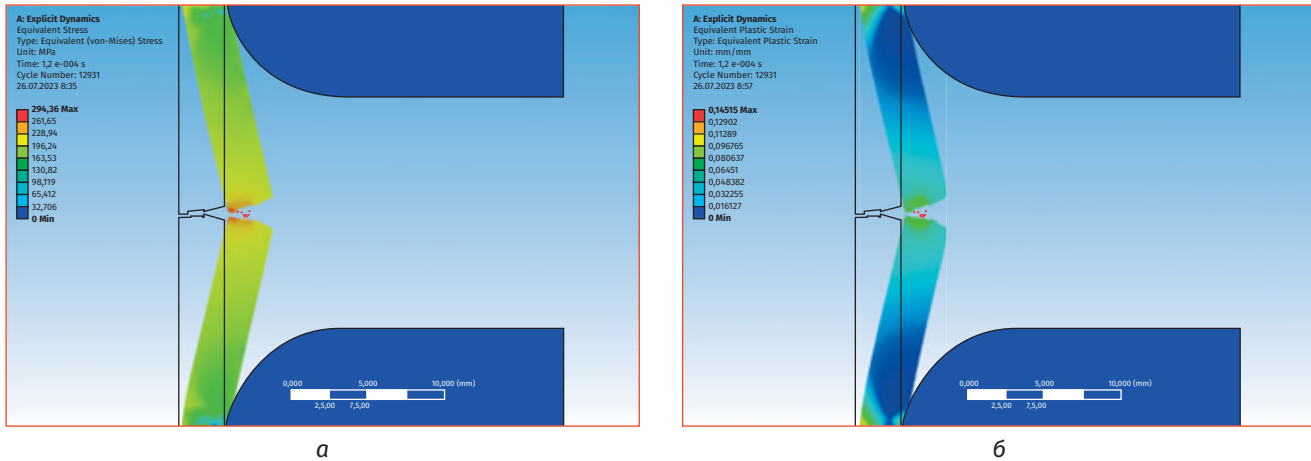


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу (а) и деформации цилиндра (б)

Выводы

В работе показан аналитический расчет давлений и усилий, возникающих от продуктов взрыва в воздушной и водной средах, для оптимизации разрушаемых взрывом элементов конструкции защитных коммутационных аппаратов, а также представлено определение коэффициентов запаса по импульсному взрывному нагружению, необходимых для гарантированного разрушения токоведущих элементов.

Значения амплитуды давлений и форма импульса были определены экспериментально и впоследствии использованы

для численного моделирования процесса деформации. Величины давления, необходимого для деформации, рассчитанные аналитически – 20 МПа и подтвержденные экспериментально – 23,7 МПа, близки по значению, что позволяет говорить о достоверности применяемых методик и корректности полученных экспериментальных данных.

Отмечено качественное совпадение результатов численного моделирования процесса деформации контактного цилиндра с реальными деформациями, наблюдаемыми при эксплуатации.

Список литературы

1. Пат. 061327 Рос. Федерация. Взрывной размыкатель: № 2020133574/07: заявл. 12.10.2020 / Аванесов С.Д., Манзук М.В., Волков С.М. [и др.]; заявитель и патентообладатель АО «НИИЭФА».
2. Котомин А.А., Душенок С.А., Козлов А.С. Эмпирические методы расчета взрывчатых веществ и композиций. СПб.: Лань, 2020. 384 с.
3. Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И. Промышленные взрывчатые вещества. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1988. 188 с.
4. Захаренков В.Ф. Внутренняя баллистика и автоматизация проектирования артиллерийских орудий: учебник. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2010. 276 с.
5. Физика взрыва / под ред. Л.П. Орленко. 3-е изд., перераб. и доп., в 2 т. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. Т. 1. 832 с.
6. Физика взрыва / под ред. Л.П. Орленко. 3-е изд., перераб. и доп., в 2 т. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. Т. 2. 656 с.
7. Уравнения состояния продуктов детонации взрывчатых веществ / В.В. Валько [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2021. № 51. 38 с.
8. Соппротивление материалов / под ред. Н.М. Беляева. 15-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1975. 609 с.

9. Справочник машиностроителя: в 6 т. / под ред. С.В. Серенсена. 2-е изд., испр. и доп. М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит-ры, 1956. Т. 3. 564 с.
10. Работнов Ю.Н. Сопротивление материалов. М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит-ры, 1962. 456 с.
11. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теория упругости: в 10 т. М.: Наука, 1987. Т. 7. 259 с.
12. Забабахин Е.И., Забабахин И.Е. Явления неограниченной кумуляции. М.: Наука, 1988. 163 с.
13. Логинов Ю.Н. Медь и деформируемые медные сплавы: учеб. пособие. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. 136 с.
14. Покровский Г.И. Взрыв. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1980. 190 с.
15. Коул Р. Взрывы в воде; пер. с англ. [Cole R.H. Underwater explosions]. 1948. 439 с.
16. Подводные и подземные взрывы; пер. с англ. под ред. В.Н. Николаевского. М.: Мир, 1974. 417 с.
17. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strain, strain rates, temperatures and pressures. Eng. fract. mech. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 21, N 1, 1985, pp. 31–48. Doi:10.1016/0013-7944(85)90052-9.
18. Krivosheev S.I., Magazinov S.G., Alekseev D.I. The peculiarities of the application of magnetic-pulse method for forming controlled pressure pulses to test metal samples. Proceedings of the fifteenth international conference on megagauss magnetic field generation and related topics, September 18–22, 2016, pp. 39–42.
19. Alekseev D.I., Magazinov S.G., Krivosheev S.I., Manzuk M.V., Adamyan Yu.E. Uniaxial High Strain Rate Tension with the Use of Magnetic Pulse Method. Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020. January, 2020.

References

1. Pat. 061327 Rus. Federation. Explosive disconnecter : No. 2020133574/07 : application 12.10.2020. Avanesov S.D., Manzuk M.V., Volkov S.M. et al., applicant and patent holder of JSC «NIIIEFA». (In Russ.).
2. Kotomin A.A., Dushenok S.A., Kozlov A.S. *Empiricheskie metody rascheta vzryvchatykh veshchestv i kompozitsii* [Empirical methods for calculating explosives and compositions]. St. Petersburg, Lan Publ., 2020, 384 p. (In Russ.).
3. Dubnov L.V., Bakharevich N.S., Romanov A.I. *Promyshlennyye vzryvchatyye veshchestva, 3-e izd., pererab. i dop.* [Industrial explosives, 3rd ed., reprint. and add.]. Moscow, Nedra Publ., 1988, 188 p. (In Russ.).
4. Zakharenkov V.F. *Vnutrenniaya ballistika i avtomatizatsiya proektirovaniya artilleriiskikh orudii: uchebnyk* [Internal ballistics and automation of artillery guns design: textbook]. St. Petersburg, Balt. gos. tekhn. uni-et Publ., 2010, 276 p. (In Russ.).
5. *Fizika vzryva* [Physics of explosion] / pod red. L.P. Orlenko. 3-e izd., pererab. i dop., v 2 t. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2002, T. 1, 832 p. (In Russ.).
6. *Fizika vzryva* [Physics of explosion] / pod red. L.P. Orlenko. 3-e izd., pererab. i dop., v 2 t. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2002, T. 2, 656 p. (In Russ.).
7. Equations of state of detonation products of explosives / V.V. Valko et al. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha* [Preprints of IPM named after M.V. Keldysh]. 2021, N 51, 38 p. (In Russ.).
8. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials] / pod red. N.M. Beliaeva, 15-e izd., pererab. i dop. Moscow, Nauka Publ., 1975, 609 p. (In Russ.).
9. *Spravochnik mashinostroyeniya v 6 t* [Handbook of Mechanical engineering in six volumes] / pod red. S.V. Serensena, 2-e izd., ispr. i dop. Moscow, Gos. nauch.-tekhn. Publ., 1956, T. 3, 564 p. (In Russ.).
10. Rabotnov Yu.N. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials]. Moscow, Gos. nauch.-tekhn. Publ., 1962, 456 p. (In Russ.).
11. Landau L.D., Livshits E.M. *Teoriya uprugosti v 10 t.* [Theory of elasticity in 10 t.]. Moscow, Nauka Publ., 1987, T. 7, 259 p. (In Russ.).
12. Zababakhin E.I., Zababakhin I.E. *Iavleniya neogranichennoy kumulatsii* [Phenomena of unlimited cumulation]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 163 p. (In Russ.).
13. Loginov Yu.N. *Med' i deformiruemye mednye splavy: ucheb. posobie* [Copper and deformable copper alloys: textbook. stipend]. Yekaterinburg, GOU VPO UGTU-UPI Publ., 2004, 136 p. (In Russ.).
14. Pokrovsky G.I. *Vzryv* [Explosion]. 4-e izd., pererab. i dop. Moscow, Nedra Publ., 1980, 190 p. (In Russ.).
15. Koul R. *Vzryvy v vode* [Explosions in the water]; per. s angl. Cole R.H. Underwater explosions, 1948, 439 p. (In Russ.).
16. *Podvodnyye i podzemnyye vzryvy* [Underwater and underground explosions]; per. s angl. pod red. V.N. Nikolaevskogo. Moscow, Mir Publ., 1974, 417 p. (In Russ.).

17. Johnson G.R., Cook U.H. Characteristics of the destruction of three metals subjected to various deformations, deformation rates, temperatures and pressures. English fragment. *robot. Engineering Mechanics of Destruction*, Volume 21, N 1, 1985, pp. 31–48. Doi: 10.1016/0013-7944(85)90052-9.

18. Krivosheev S.I., Shops S.G., Alekseev D.I. Features of the application of the magnetic pulse method for the formation of controlled pressure pulses for testing metal samples. *Proceedings of the Fifteenth International Conference on the Generation of Megagauss Magnetic Fields and Related Topics*, September 18–22, 2016, pp. 39–42.

19. Alekseev D.I., Magazinov S.G., Krivosheev S.I., Manzuk M.V., Adamyan Yu.E. Uniaxial stretching with high strain rate by magnetic pulse method. *Proceedings of the IEEE Young Researchers Conference in Electrical and Electronic Engineering 2020, EIConRus 2020*. January 2020.

Поступила в редакцию: 10.10.2023

Одобрена рецензентами: 20.10.2023

Принята к печати: 04.12.2023

Об авторах

Максим Витальевич Манзук* – начальник научно-исследовательского отдела АО «НИИЭФА», Россия, 196641, С.-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой, д. 3. E-mail: manzuk@sintez.niiefa.spb.su.

Maksim V. Manzuk* – head of division, JSC «NIIEFA». Postal address: 3 bld. Doroga na Metallstroy str., Metallstroy, St.-Petersburg, Russia, 196641. E-mail: manzuk@sintez.niiefa.spb.su.

Дмитрий Игоревич Алексеев – начальник научно-исследовательской лаборатории АО «НИИЭФА». Россия, С.-Петербург. E-mail: dmitry.alekseev@sintez.niiefa.spb.su.

Dmitrii I. Alekseev – head of laboratory JSC «NIIEFA». Russia, St.-Petersburg. E-mail: dmitry.alekseev@sintez.niiefa.spb.su.

Анна Михайловна Кудрявцева – математик 2 категории АО «НИИЭФА». Россия, С.-Петербург. E-mail: kudriavtseva@sintez.niiefa.spb.su.

Anna M. Kudriavtseva – mathematician of the 2nd category JSC «NIIEFA». Russia, St.-Petersburg. E-mail: kudriavtseva@sintez.niiefa.spb.su.

Юлия Николаевна Латманизова – инженер-исследователь 1 категории АО «НИИЭФА». Россия, С.-Петербург. E-mail: latmanizova.yuliya@sintez.niiefa.spb.su.

Yuliya N. Latmanizova – research engineer of the 1st category JSC «NIIEFA». Russia, St.-Petersburg. E-mail: latmanizova.yuliya@sintez.niiefa.spb.su.

Вадим Вальтерович Харченко – ведущий исследователь АО «НИИЭФА». Россия, С.-Петербург. E-mail: vadim.kharchenko@sintez.niiefa.spb.su.

Vadim V. Kharchenko – lead research engineer JSC «NIIEFA». Russia, St.-Petersburg. E-mail: vadim.kharchenko@sintez.niiefa.spb.su.

Сергей Иванович Кривошеев – доктор технических наук, профессор Высшей школы высоковольтной энергетики ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». Россия, С.-Петербург. E-mail: ksi.mgd@spbstu.ru.

Sergey I. Krivosheev – Grand PhD in Engineering sciences, Professor Higher School of High-Voltage Power Engineering of the St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great. Russia, St.-Petersburg. E-mail: ksi.mgd@spbstu.ru.

Сергей Геннадьевич Магазинов – кандидат технических наук, доцент Высшей школы высоковольтной энергетики ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». Россия, С.-Петербург. E-mail: magazinov_sg@spbstu.ru.

Sergey G. Magazinov – PhD in Engineering sciences, Assistant professor Higher School of High-Voltage Power Engineering of the St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great. Russia, St.-Petersburg. E-mail: magazinov_sg@spbstu.ru.

Сергей Михайлович Микляев – руководитель проекта Частное учреждение государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР». Москва, Россия. E-mail: S.Miklyaev@iterrf.ru.

Sergey M. Miklyaev – project manager Private institution of the State Atomic Energy Corporation «Rosatom» «ITER Project Center». Russia, Moscow. E-mail: S.Miklyaev@iterrf.ru.

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

УДК 550.835.2

ОЦЕНКА ОЖИДАЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ α -, β -РАДИОНУКЛИДОВ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

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

Аннотация. Приводится описание существующих методов и устройств регистрации альфа- и бета-излучения в водной среде в режиме реального времени. Показаны методические аспекты выбора геометрии и метода оценки активности радионуклидов в водной среде. Приведены результаты теоретического расчета ожидаемых показателей чувствительности детектирования α -, β -радионуклидов в водной среде.

Ключевые слова: АЛЬФА- И БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЕ; АЛЬФА- И БЕТА-РАДИОНУКЛИДЫ; РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ; ТЕХНИЧЕСКОЕ СРЕДСТВО ИЗМЕРЕНИЯ; ВОДНАЯ СРЕДА; МЕТОД ДЕТЕКТИРОВАНИЯ.

Для цитирования: Никитаев С.П., Чернов С.А., Казакова М.Б. Оценка ожидаемых показателей детектирования α -, β -радионуклидов в водной среде // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 2. С. 96–114.

ESTIMATION OF EXPECTED INDICATORS OF DETECTION OF α -, β -RADIONUCLIDES IN THE AQUATIC ENVIRONMENT

S.P. NIKITAEV, Grand PhD Engineering, Prof., S.A. CHERNOV, PhD Chemical, M.B. KAZAKOVA,
SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics»

Abstract. *The description of the existing methods and devices for recording alpha and beta radiation in the aquatic environment in real time is given. Methodological aspects of the choice of geometry and method of detecting radionuclides in an aqueous medium are shown. The results of the theoretical calculation of the expected sensitivity indicators for radiation detection are presented.*

Keywords: ALPHA AND BETA RADIATION; ALPHA AND BETA RADIONUCLIDES;
RADIATION SAFETY; TECHNICAL MEANS OF MEASUREMENT; AQUEOUS MEDIUM;
DETECTION METHOD.

For citation: *Nikitaev S.P., Chernov S.A., Kazakova M.B.* Estimation of expected indicators of detection of α -, β -radionuclides in the aquatic environment. *Perspektivnye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti* [Promising technologies for security systems], 2023, N 2, pp. 96–114 (In Russ.).

Введение

Актуальность темы статьи обусловлена важностью научной технической задачи, относящейся к критическим технологиям Российской Федерации, Перечень которых утвержден Президентом Российской Федерации 21 мая 2006 г. Пр-842 «Технологии обеспечения защиты и жизнедеятельности населения и опасных объектов при угрозах террористических проявлений». В рамках этой технологии одним из приоритетных направлений является защита человека от вредных ионизирующих микропримесей воды.

Существующие методы, способы и средства выполнения измерений не в полной мере обеспечивают исключение рисков неконтролируемого внутреннего облучения персонала и населения через потребление питьевой воды на первых стадиях развития радиационной аварии. Наиболее опасное для здоровья человека радиационное воздействие может быть вызвано внутренним облучением от альфа- и бета-излучающих радионуклидов. В этой связи сохраняется объективная пот-

ребность в разработке устройств, предназначенных для радиационного контроля проточной питьевой воды на содержание альфа- и бета-излучающих радионуклидов в воде в реальном (квазиреальном) масштабе времени и в автоматическом режиме. Сложность задачи обусловлена жесткими нормативными требованиями, утвержденными Госстандартом России [1–7], к допущенным к применению методикам измерения радиологических показателей. Так установлено, суммарная альфа-активность должна составлять не более 0,2 Бк/л; суммарная бета-активность – не более 1 Бк/л, а удельная активность радона – не более 60 Бк/л.

До настоящего времени технических средств измерения, отвечающих указанным требованиям по обнаружению суммарной активности растворенных радионуклидов в воде в режиме ограниченного времени, близкого к реальному, не создано [8–15]. Например, радиационный монитор NEX-BETA-ABG производства Continental Hydrodyne Systems Inc. (США) не обладает требуемой чувствительностью

Забор воды для проведения исследований



даже при длительности измерений более 30 мин для обеспечения возможности регистрации прописанных норм пороговых значений объемных активностей радионуклидов (измерение α -излучения (^{238}U) – 925 Бк/л, β -излучения (^{40}K) – 1110 Бк/л). В линейке радиационных мониторов производства той же фирмы представлен NEXGEN-SSS, который при получасовом измерении имеет порог чувствительности α -излучения (^{238}U , ^{210}Po) 74 Бк/л, а по β -излучению (^{40}K) – 22 Бк/л. Вместе с тем основными недостатками данного радиационного монитора являются большие габариты (863,6×1828,8×787,4 мм) и масса (380 кг).

В качестве функционального прототипа может рассматриваться монитор трития в воде NEX-Tritium производства Continental Hydrodyne Systems Inc. (США), у которого нижний порог чувствительности по β -излучению (^3H) составляет 18500 Бк/л при 30-минутной экспозиции. К недостатку можно отнести то, что он является специализированным прибором, не имеющим функциональной возможности регистрации α -частиц.

В качестве прототипа мобильного малогабаритного устройства детектирования наливного типа (с пробоотбором) может рассматриваться радиационный монитор для воды MEDA-SP производства Continental Hydrodyne Systems Inc. (США), который позволяет детектировать:

источники γ -излучения с помощью выносного погружного детектора;

источники α - и β -излучения в пробах воды;

поверхностное загрязнение α -, β - и γ -активными радионуклидами.

Важно отметить, что в качестве детекторов источников излучения разработчики применили плоские счетчики Гейгера-Мюллера с небольшой площадью чувствительной поверхности, сле-

Исходя из способа отбора проб и пробоподготовки, методы детектирования α - и β -активных радионуклидов в воде условно разделяют на две группы: прямого измерения проб и измерения счетных образцов.

довательно, можно предположить, что показатели чувствительности данного монитора к α - и β -активным радионуклидам, растворенным в воде, будут ниже требуемых.

Исходя из способа отбора проб и пробоподготовки методы детектирования α - и β -активных радионуклидов в воде условно разделяют на две группы: прямого измерения проб воды и измерения счетных образцов пробы воды.

Метод прямого измерения проб воды включает следующую последовательность действий: забор пробы (вручную или подвод от водопроводной магистрали к измерительной камере контрольного прибора); прямое измерение скорости счета детектора, находящегося непосредственно в исследуемой пробе или рядом с ней.

Метод измерения счетных образцов проб воды проводят в следующей последовательности: забор пробы; подготовка счетных образцов согласно применяемой методике (выпаривание, концентрирование, радиохимическое выделение нуклида, дополнительная химическая обработка и т.п.); измерение скорости счета детектора, регистрирующего α - и β -излучение от счетного образца, обычно в условиях низкофоновой камеры.

Основным преимуществом метода прямого измерения проб является возможность контроля состояния воды на

предмет радиоактивного загрязнения в режиме реального времени. К его недостаткам можно отнести относительно невысокий порог чувствительности к α - и β -активным радионуклидам, растворенным в воде, по сравнению с некоторыми методами измерения счетных образцов. Последнее обстоятельство связано с очень малой длиной (единицы микрон – для α -излучения; от единиц микрон до единиц миллиметров, в зависимости от энергии – для β -излучения) свободного пробега α -/ β -частиц в воде в сочетании с низкой концентрацией активности в измеряемой среде.

Основным преимуществом метода измерения счетных образцов является высокий порог чувствительности к α - и β -активным радионуклидам, который достигается концентрированием активности специальными методами пробоподготовки и возможностью длительных экспозиций в условиях низкого естественного фона. Особенности и основными недостатками метода в контексте решаемой задачи являются: длительное время между пробоотбором и получением результата (до нескольких суток, в зависимости от типа измеряемого радионуклида и способа подготовки счетного образца), сложность автоматизации выполняемых процедур, высокие требования к квалификации персонала. Тем не менее в практике радиационного контроля пи-

Существует противоречие между обеспечением требований радиационной безопасности и возможностями методов и технических средств, способных их удовлетворить.

твевой воды – это основной метод измерений альфа- и бета-активности в воде.

С точки зрения физических принципов регистрации α - и β -активности в воде наиболее часто применяются методы жидкосцинтилляционной и низкофоновой радиометрии счетных образцов с использованием полупроводниковых кремниевых детекторов. Последние в статье не рассматриваются, так как они не позволяют оперативно проводить измерения.

Метод жидкосцинтилляционной радиометрии представляет собой регистрацию сцинтилляционных вспышек, возникающих в объеме смеси специального жидкого сцинтиллятора и пробы воды, содержащей α - и β -излучающие радионуклиды. Такая схема измерения позволяет минимизировать свободный пробег α - и β -частиц в измерительном объеме и, соответственно, существенно повысить чувствительность. Измерения на жидкосцинтилляционных радиометрах проводятся как с радиохимической подготовкой проб, так и без нее – экспресс-анализы методом скрининга.

Преимуществами подобной радиометрии являются:

низкая минимальная детектируемая активность (МДА) – от 0,01 Бк/проба (объем 8 мл);

высокая эффективность к альфа- и бета-излучению;

решение задач, которые сложно выполнить другими методами, как, например, контроль низкоэнергетических β -излучателей (^3H , ^{14}C).

К недостаткам жидкосцинтилляционной радиометрии можно отнести:

высокую стоимость расходных материалов;

сложность автоматизации измерений (пробоотбора и подготовки проб), особенно для проточного режима;

большие габариты и массу, связанные прежде всего с пассивными и активными экранами, уменьшающими фон;

повышенные требования к квалификации персонала.

Сцинтилляционный метод регистрации радиоактивных излучений. Он является наиболее интересным с точки зрения оперативности измерения. Суть метода заключается в прямом измерении проб воды твердыми сцинтилляционными детекторами с большой площадью чувствительной поверхности. Этот метод позволяет организовать радиационный контроль воды на содержание α - и β -активных радионуклидов в режиме времени, близкому к реальному, и в проточном автоматическом режиме. Но на практике сцинтилляционный метод используется достаточно редко из-за ряда возникающих технологических и эксплуатационных проблем.

Таким образом, существует противоречие между обеспечением требований радиационной безопасности и возможностями методов и технических средств, способных их удовлетворить.

Цель представленной работы как раз и состоит в том, чтобы устранить это противоречие, для чего необходимо решить научную задачу, заключающуюся в обосновании выбора метода и способа обеспечения требуемых нормативных порогов чувствительности для α - и β -излучений при заданной геометрии измерений.

Методика проведения исследования

В основу технологии детектирования α - и β -активных радионуклидов в проточной воде в реальном масштабе времени положен сцинтилляционный метод регистрации радиоактивных излучений с использованием сцинтилляционных пластин с большой суммарной площадью

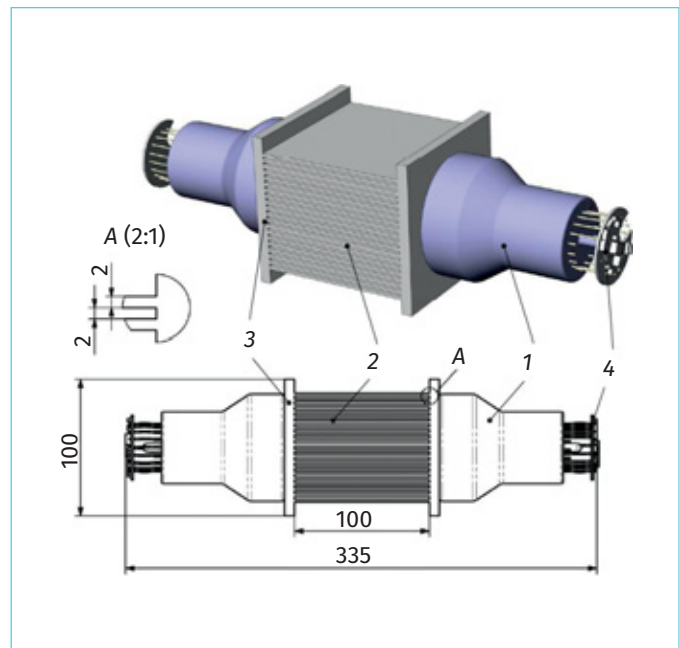


Рис. 1. Эскиз детектирующей части устройства в рамках сцинтилляционного метода регистрации радиоактивных излучений: 1 – ФЭУ; 2 – фосвич-детектор; 3 – оргстекло; 4 – плата делителя напряжения

поверхности, установленных в проточной измерительной камере, просматриваемой с двух сторон низкофоновыми фотоэлектронными умножителями (ФЭУ). Эскиз макета устройства, реализующего указанный метод, приведен на рис. 1.

В качестве детектора α - и β -частиц применили фосвич-детектор на основе полистирольной пластины с покрытием из сульфида цинка ZnS(Ag).

Основной решаемой технической задачей является регистрация низких уровней полезного сигнала, сопоставимых с уровнем шумов, связанных с особенностями поглощения как излучения, так и света в водной среде, поэтому регистрацию фотовспышек сцинтиллятора предложено проводить с помощью двух низкофоновых ФЭУ, включенных по схеме совпадений.

Разделение компонентов скорости счета по видам регистрируемого излу-

чения проводили по анализу формы и длительности сигналов, различных при регистрации альфа- и бета-излучения. Для большей ее эффективности пластины были сгруппированы в детектирующую ячейку с определенным шагом. Светосбор осуществляли с боковых граней пластин.

Следует отметить, что эффект регистрации α -частиц зависит от:

- геометрических размеров измерительной камеры;
- конструкции сцинтиблока;
- расстояния от поверхности измерительной камеры до фотокатода;
- диаметра фотокатода;
- толщины и размеров сцинтиллирующих пластин;
- поглощения и рассеяния образовавшихся в сцинтиллирующем слое фотонов в объеме измерительной камеры.

Физическую модель процесса переноса α -частиц через слой жидкости можно представить следующим образом.

1. Имеется слой жидкости толщиной h , прилегающий к сцинтиллирующей пластине с площадью поверхности S , покрытой прозрачным защитным слоем толщиной h_1 .

2. Средний пробег α -частиц с энергией E в контролируемой жидкости равен R .

3. Средний пробег α -частиц с энергией E в веществе защитной пленки равен R_1 .

4. Средняя тормозная способность вещества в контролируемой жидкости:

$$\left[\frac{dE}{dx} \right] = \frac{E}{R}. \quad (1)$$

5. Средняя тормозная способность защитной пленки:

$$\left[\frac{dE}{dx} \right]_1 = \frac{E}{R_1}. \quad (2)$$

6. Потери энергии ΔE при прохождении α -частиц в контролируемой жидкости и в защитной пленке прямо пропорциональны средним тормозным способностям вещества в контролируемой

жидкости $\left[\frac{dE}{dx} \right]$ и защитной пленке $\left[\frac{dE}{dx} \right]_1$,

соответственно.

В качестве среднего пробега α -частиц с энергией E для какого-либо вещества принимается толщина слоя поглотителя из этого вещества, при которой поток α -частиц, нормально падающих к поверхности поглотителя, уменьшается в два раза по сравнению с первоначальным значением.

Альфа-частица, образовавшаяся в жидкости на расстоянии x от поверхности сцинтиллирующей пластины (рис. 2) и движущаяся в направлении поверхности пластины с вектором скорости, составляющим с нормалью к поверхности пластины угол θ_x , попадает в слой ZnS(Ag), если суммарные потери энергии α -частицы в контролируемой жидкости и

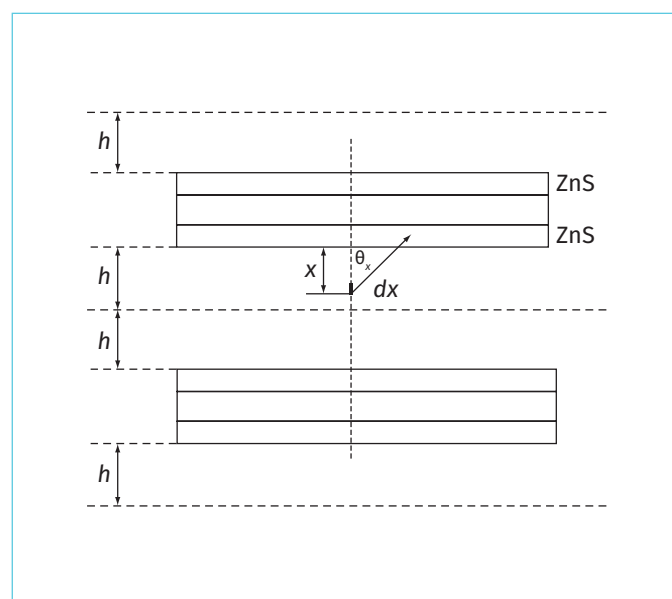


Рис. 2. Элементарная сцинтиллирующая ячейка (α -излучение)

защитном покрытии не превышают энергию α -частицы E :

$$\frac{x}{\cos\theta_x} \left[\frac{dE}{dx} \right] + \frac{h_1}{\cos\theta_x} \left[\frac{dE}{dx} \right]_1 \leq E. \quad (3)$$

Из выражения (3) с учетом формул (1) и (2) имеем:

$$\cos\theta_x \geq \frac{x}{R} + \frac{h_1}{R_1}. \quad (4)$$

Из неравенства (4) с учетом того, что максимальное значение $\cos\theta_x$ равно 1 (при $\theta_x=0$), следует ограничение на максимальную толщину слоя жидкости h_{\max} , из которого возможна регистрация α -частиц:

$$h_{\max} = R \left(1 - \frac{h_1}{R_1} \right). \quad (5)$$

При $x < h_{\max}$ наибольшему значению угла θ_x и, соответственно, максимальному пробегу в жидкости, при котором α -частица может быть зарегистрирована в слое ZnS(Ag), в формуле (3) отвечает знак равенства. При этом, строго говоря, энергия α -частицы, попавшей в слой ZnS(Ag), будет равна 0, т.е. не может быть зарегистрирована. В дальнейшем будем полагать, что формальное равенство потерь энергии и начальной энергии α -частицы на самом деле означает, что оно соблюдается с точностью до некоторого малого значения энергии, обеспечивающего регистрацию α -частицы.

Очевидно, что если векторы скоростей α -частиц, образовавшихся в рассматриваемой точке жидкости, направлены к детектору и находятся внутри конуса с углом раствора θ_x , то все испущенные α -частицы могут попасть в слой ZnS(Ag). Этому конусу отвечает телесный угол Ω_x , равный:

$$\Omega_x = 2\pi(1 - \cos\theta_x). \quad (6)$$

При изотропном угловом распределении α -частиц в телесный угол Ω_x будет испущено $\Omega_x/4\pi$ α -частиц из числа образовавшихся в рассматриваемой точке жидкости. Из числа α -частиц, образующихся в единицу времени в элементе d_x линейного источника длиной x , расположенного по нормали к поверхности пластины, в слой ZnS(Ag) может попасть часть (доля) α -частиц k_x , равная:

$$\begin{aligned} \bar{k}_x &= \frac{1}{h} \int_0^h \frac{2\pi}{4\pi} \cdot (1 - \cos\theta_x) dx = \\ &= \frac{1}{2h} \int_0^h \left(1 - \frac{x}{R} - \frac{h_1}{R_1} \right) dx = \\ &= \frac{1}{2} \left(1 - \frac{h}{2R} - \frac{h_1}{R_1} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

При выводе формулы (8) использован способ, аналогичный предложенному в работе [8].

Традиционно пробеги α -частиц и толщины счетного образца, слоя воздуха и входного окна детектора выражают в единицах поверхностной плотности с размерностью мг/см². В дальнейшем изложении при описании зависимости эффективности регистрации от геометрических параметров примем следующие обозначения поверхностных плотностей: слоя жидкости – d , мг/см²; защитного слоя – l_1 , мг/см²; вещества (произведение плотности вещества ρ на его толщину h).

С учетом принятых обозначений, имеем:

$$\bar{k}_x = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{2R} - \frac{l_1}{R_1} \right), \quad (8)$$

где

$$\frac{d}{2R} + \frac{l_1}{R_1} = \cos\theta_x. \quad (9)$$

Из условия (5) следует, что наибольшему значению расстояния от поверхности сцинтиллирующей пластины h_{\max} при котором вылетающие из слоя жидкости α -частицы могут быть зарегистрированы в слое ZnS(Ag), отвечает поверхностная плотность слоя жидкости d_{\max} (далее – предельный слой), равная:

$$d_{\max} = R \left(1 - \frac{l_1}{R_1} \right). \quad (10)$$

Для поверхностной плотности слоя жидкости, равной d_{\max} , среднее значение $\cos\theta_x$, обозначим его $\cos\theta(d_{\max})$, с учетом формулы (9) имеем:

$$\cos\theta(d_{\max}) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{l_1}{R_1} \right). \quad (11)$$

При значениях поверхностной плотности счетного образца $d > d_{\max}$ могут быть зарегистрированы только те α -частицы, которые образовались в предельном слое d_{\max} .

Формально эффективность регистрации α -частиц для слоя жидкости толщиной, равной половине расстояния между пластинами, может быть определена как произведение эффективности регистрации для предельного слоя $\varepsilon(R_i, d_{\max}, l_i)$ на d_{\max} , деленое на поверхностную плотность слоя жидкости в элементарной ячейке d_h . Тогда для эффективности регистрации α -частиц от всего слоя жидкости элементарной ячейки $\varepsilon(R_i, d_h, l_i)$, прилегающего к одной поверхности сцинтиллирующей пластины, получаем:

$$\begin{aligned} \varepsilon(R_1, d_h, l_1) &= \\ &= 0,25 \left(1 - \frac{l_1}{R_1} \right) \frac{R \left(1 - \frac{l_1}{R_1} \right)}{d_h} = \\ &= 0,25 \frac{R}{d_h} \left(1 - \frac{l_1}{R_1} \right)^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Элементарная ячейка включает сцинтиллирующую пластину с двумя поверхностями, покрытыми ZnS(Ag), и два слоя воды, прилегающие к этим поверхностям. По этой причине эффективность регистрации элементарной ячейки $\varepsilon_0(R_i, d_h, l_i)$ будет равна удвоенной эффективности регистрации $\varepsilon(R_i, d_h, l_i)$:

$$\begin{aligned} \varepsilon_0(R_1, d_h, l_1) &= \\ &= 2 \cdot 0,25 \frac{R}{d_h} \left(1 - \frac{l_1}{R_1} \right)^2 = \\ &= 0,5 \frac{R}{d_h} \left(1 - \frac{l_1}{R_1} \right)^2. \end{aligned} \quad (13)$$

В качестве R_1 при проведении модельных расчетов принят пробег в поликарбонатной пленке.

Для регистрации частицы необходимо, чтобы активной поверхности достиг, как минимум, один фотоэлектрон. Для образования одного фотоэлектрона на фотокатод в среднем должно падать N_1 фотонов:

$$N_1 = \frac{1}{\Omega_G \cdot \eta_k \cdot \eta_c \cdot \eta_\phi \cdot \gamma}, \quad (14)$$

где Ω_G – среднее значение телесного угла от точки вспышки в сцинтилляторе на фотокатод; η_k – конверсионная эффективность сцинтиллятора ZnS(Ag); η_c – доля

фотонов, достигающих фотокатода; γ – коэффициент выхода фотоэлектронов в объем ФЭУ; η_{ϕ} – коэффициент собирания фотоэлектронов ФЭУ.

Числовые значения коэффициентов можно взять в работе [16].

Числовое значение Ω_G можно оценить, полагая его равным значению телесного угла на фотокатод, с вершиной в точке на прямой, проходящей через центры фотокатодов и являющейся пересечением этой прямой с плоскостью, проходящей через торцы сцинтиллирующих пластин на наибольшем расстоянии от поверхности одного из фотокатодов:

$$\Omega_G = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{L}{\sqrt{L^2 + r_{\text{фк}}^2}} \right), \quad (15)$$

где $r_{\text{фк}}$ – радиус фотокатода ФЭУ; L – максимальное расстояние от точки вспышки до поверхности фотокатода, равное сумме длины пластины и расстояния от торца пластины до поверхности фотокатода.

Если принять, что зазор между торцами пластин и прозрачным окном измерительной камеры примерно 0,5 см; толщина прозрачного окна измерительной камеры 0,6...0,8 см; зазор между стенкой измерительной камеры и внешним корпусом 0,2...0,5 см; толщина внешнего корпуса 0,7...1,0 см, тогда $L \approx 13$ см, а $\Omega_G = 0,0256$.

Если в качестве η_c в формуле (14) принять долю фотонов, достигаемых фотокатода в телесном угле Ω_G , то значение η_c целесообразно принять равным максимальному значению из указанного выше интервала, т.е. 0,7 [9]. Основанием для этого является то, что в этом случае потери света (фотонов) могут быть только за счет его отражения от поверхности окна измерительной камеры и фотокатода и по этой причине не могут быть велики. Фактически, это коэффициент пропускания света двумя параллельными прозрачными пластинами. Тогда получаем, что для образования одного фотоэлектрона на первом диноде на фотокатод в среднем должно падать $N_1 = 0,8 \cdot 10^4$ фотонов. Следует отметить, что оцениваемое таким способом значение Ω_G может быть сильно занижено. В действительности свет распространяется внутри пластины, фактически являющейся световодом, за счет отражения на границе сцинтиллятора и оргстекла, а также в контролируемой жидкости в промежутке между пластинами внутри телесных углов, значительно меньших угла 4π , на который производится нормировка в формуле (15).

Принимая во внимание, что в формуле (8) величина k_x есть также среднее значение соотношения энергии, теряемой α -частицей в слое $\text{ZnS}(\text{Ag}) \Delta E(\text{ZnS})$, к энергии α -частицы E_α при толщине слоя жидкости, равной d_{max} , получаем, что эта доля равна:

Формально эффективность регистрации α -частиц для слоя жидкости толщиной, равной половине расстояния между пластинами, может быть определена как произведение эффективности регистрации для предельного слоя, деленное на поверхностную плотность слоя жидкости в элементарной ячейке.

$$\frac{\Delta E(\text{ZnS})}{E_\alpha} = 0,25 \cdot \left(1 - \frac{l_1}{R_1}\right). \quad (16)$$

С учетом числовых значений величин, входящих в формулу (13), получаем, что эта доля равна примерно 22% начальной энергии α -частицы. При конверсии этой энергии в световую вспышку число образовавшихся при этом фотонов $N(E_\alpha, h\nu)$ можно оценить по формуле:

$$N(E_\alpha, h\nu) = 10^6 \cdot \bar{k}_x \cdot \frac{E_\alpha}{h\nu}, \quad (17)$$

где $\bar{k}_x = 0,22$; $E_\alpha = 5,48$ МэВ; $h\nu$ – средняя энергия фотонов, образовавшихся в слое ZnS(Ag), $h\nu = 2,8$ эВ.

При данных значениях величин $N(E_\alpha, h\nu) = 0,43 \cdot 10^6$. Полученное значение более чем в 50 раз превышает число фотонов $N_1 = 0,8 \cdot 10^4$, необходимых для образования одного электрона, попадающего на первый диод ФЭУ. Это означает, что факт попадания α -частицы в слой ZnS(Ag) будет установлен с вероятностью, равной 1, корректирующий множитель k_g окажется равным 1, а эффективность регистрации α -частиц для блока детектирования α -излучения ε_α будет равна эффективности регистрации α -частиц для элементарной ячейки $\varepsilon_0(R, d_h, l_1)$:

$$\varepsilon_\alpha = \varepsilon_0(R, d_h, l_1) = 0,5 \cdot \frac{R}{d_h} \left(1 - \frac{l_1}{R_1}\right)^2. \quad (18)$$

При $R = 4,06$ мг/см², $R_1 = 4,48$ мг/см², $l_1 = 0,6$ мг/см² (≈ 5 мкм), $d_h = 100$ мг/см² получаем $\varepsilon_\alpha = 0,0152$ или $0,0168$ при $l_1 = 0,4$ мг/см² ($\approx 3,3$ мкм).

Аналогично рассмотренному выше случаю регистрации α -частиц в жидкости эффективность регистрации β -частиц ε_β

Бета-частица, попавшая в сцинтиллирующую пластину, может быть зарегистрирована, если число фотонов достаточно для образования одного фотоэлектрона на первом диноде фотоумножителя.

также можно представить в виде произведения двух сомножителей: эффективности регистрации β -частиц для элементарной сцинтиллирующей ячейки $\beta\varepsilon_0$ и некоторого корректирующего множителя k_g . Числовое значение k_g зависит от следующих параметров:

геометрических размеров измерительной камеры;

расстояния от поверхности измерительной камеры до поверхности фотокатода;

диаметра фотокатода;

поглощения образовавшихся в сцинтиллирующей пластине и в объеме жидкости фотонов и их рассеяния в измерительной камере;

толщины и размеров сцинтиллирующих пластин.

Бета-частица, попавшая в сцинтиллирующую пластину, может быть зарегистрирована, если число фотонов, образовавшихся в результате взаимодействия частицы с атомами вещества пластины, достаточно для образования одного фотоэлектрона на первом диноде фотоумножителя. Очевидно, что в среднем число образующихся в сцинтиллирующей пластине фотонов пропорционально средней энергии, теряемой β -частицами в пластине. В свою очередь, средняя энергия пропорциональна средней энергии β -спектра. Средней

энергии β -спектра, в случае измерения активностей β -излучающих радионуклидов в воде, может быть сопоставлена некоторая величина, называемая пробегом в воде, выраженная в сантиметрах, которая соответствует поглощению 90% энергии – R_{90} . Пробег R_{90} равен радиусу сферы, описанной вокруг точечного источника, находящегося в однородной среде. Внутри этой сферы поглощается 90% полной энергии.

Предполагаемое к разработке устройство детектирования должно обеспечить измерение удельной активности радионуклидов, испускающих β -частицы со средними энергиями в диапазоне значений от нескольких единиц (десятков) кэВ до 1500...2000 кэВ. Оценка нижней границы энергетического диапазона регистрации позволит судить о возможности обнаружения трития, средняя энергия β -частиц которого составляет 5,7 кэВ. Пробег R_{90} β -частиц в воде для этой средней энергии составляет $2,2 \cdot 10^{-5}$ мм.

Пробег R_{90} для материала пластины грубо можно считать равным пробегу в воде, деленному на отношение плотности материала сцинтиллирующей пластины ρ к плотности воды.

В табл. 1 приведены значения R_{90} для различных значений средних энергий [10].

Таким образом, можно считать, что максимальная толщина слоя воды, пройдя который β -частица еще может быть зарегистрирована в сцинтиллирующей пластине, равна примерно R_{90} . Для пластин с плотностью ρ в качестве ее максимальной толщины $d_n(\max)$ можно принять толщину, в которой поглощается 90% полной энергии β -частицы, тогда $d_n(\max)$ грубо может быть оценена как:

$$d_n(\max) = R_{90} \cdot \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho} \quad (19)$$

Использование сцинтиллирующих пластин с толщиной больше, чем $d_n(\max)$, нецелесообразно, т.к. потеря энергии в пластике при данной толщине близка к максимально возможному значению и поэтому практически не будет увеличиваться с ростом его толщины. Соответственно, не будет увеличиваться световыход и скорость счета β -частиц от контролируемой жидкости, при этом фоновая скорость счета будет расти с ростом толщины пластика и ухудшать соотношение

Таблица 1

Значения пробега β -частиц в воде для различных значений средних энергий

Радионуклид	Средняя энергия β -частиц, кэВ	R_{90} , мм
^3H	5,7	$2,2 \cdot 10^{-5}$
^{60}Co	95,9	0,31
^{137}Cs	174,0	0,70
То же	204,0	0,82
То же	491,8	2,26
То же	606,0	3,24
^{144}Pr	1240,0	6,70
^{40}K	1432,0	8,30

сигнал/фон, что неприемлемо. Таким образом, получаем, что максимальная суммарная толщина слоя воды и пластины $d_{\Sigma}(\max)$ не должна превышать значения, равного:

$$d_{\Sigma}(\max) = R_{90} + d_n(\max). \quad (20)$$

Значение суммарной толщины слоя воды между пластинами и толщины сцинтиллирующей пластины, равное $d_{\Sigma}(\max)$, можно считать оптимальным с точки зрения достижения максимума отношения сигнал/фон.

Поскольку оптимальная толщина $d_{\Sigma}(\max)$ зависит от средней энергии бета-спектра, то при наличии нескольких β -излучающих радионуклидов с произвольным соотношением их удельных активностей в контролируемой жидкости для выбора значений толщин слоя воды и сцинтиллирующих пластин необходимо вводить дополнительные критерии. Например, ориентироваться на наиболее вероятный радионуклид и отвечающее ему значение средней энергии β -спектра. Желательно, чтобы это значение было как можно ниже, тогда для всех радионуклидов с большими значениями средних энергий β -спектра соотношение сигнал/фон будет не хуже, чем для выбранного радионуклида.

Метрологические характеристики β -радиометров обычно нормируются для ${}^3\text{H}$, ${}^{137}\text{Cs}$ и смеси ${}^{90}\text{Sr} + {}^{90}\text{Y}$. Толщины слоя воды и пластины, отвечающие $d_{\Sigma}(\max)$ для трития, технически сложно реализуемы для проточного радиомет-

ра. ${}^{137}\text{Cs}$ является радионуклидом, наиболее удовлетворяющим сформулированным выше критериям. Для этого случая $d_{\Sigma}(\max) = 0,70 + 0,70 \cdot \rho_{\beta} / \rho$. При использовании в качестве материала пластин оргстекла $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$ получаем толщину пластины $d_n(\max) = 0,58 \text{ мм}$ и, соответственно, $d_{\Sigma}(\max) = 1,28 \text{ мм}$. Приведенная оценка является довольно грубой, поскольку остается незатронутым вопрос о влиянии расстояния между пластинами и толщины пластины на выход света в сторону ФЭУ. Из общих соображений выход света должен падать с уменьшением $d_{\Sigma}(\max)$ вследствие затухания, возникающего при многократных отражениях от поверхностей пластин на границе раздела с водой.

При заданных значениях толщины сцинтиллирующих пластин и расстояния между ними эффективность регистрации $\beta\epsilon_0$ для конкретного β -излучающего радионуклида можно оценить, используя R_{90} . Рис. 3 демонстрирует, что потери энергии в пластине происходят, если расстояние точки возникновения β -частицы от пластины меньше R_{90} , а область энергетических потерь в пластине ограничена объемом шарового сегмента. Для β -частиц, вылетающих из точки x в направлении сцинтиллирующей пластины, средняя доля энергии β -частиц, потерянной в пластине, пропорциональна отношению объема шарового сегмента к объему шара радиусом R_{90} . Для всех точек линейного источника длиной R_{90} , расположенного перпендикулярно поверхности пластины, средний объем шарового сегмента

Толщины слоя воды и пластины, отвечающие $d_{\Sigma}(\max)$ для трития, технически сложно реализуемы для проточного радиометра. ${}^{137}\text{Cs}$ является радионуклидом, наиболее удовлетворяющим заданным критериям.

$\overline{V}_{\text{шс}}$, в котором происходят потери энергии, равен:

$$\overline{V}_{\text{шс}} = \frac{1}{R_{90}} \int_0^{R_{90}} \pi \cdot h^2 \times \left(R_{90} - \frac{1}{3}h \right) dh = \frac{\pi \cdot R_{90}^3}{4}, \quad (21)$$

где h – высота шарового сегмента.

Средняя доля энергии, потерянной в пластине, для всех точек линейного источника длиной $l = R_{90}$ пропорциональна отношению $\overline{V}_{\text{шс}}$ к объему сферы радиусом R_{90} . Если предположить, что потери энергии в элементарном объеме dv по радиусу сферы R_{90} являются константой, то это отношение может быть принято в качестве эффективности регистрации β -частиц $\beta \varepsilon_0(R_{90})$ для слоя жидкости толщиной R_{90} :

$$\beta \varepsilon_0(R_{90}) = \frac{\pi \cdot R^3 \cdot 3}{4 \cdot 4 \cdot \pi \cdot R^3} = \frac{3}{16} = 0,187. \quad (22)$$

Из формулы (22) следует, что для толщины слоя воды, прилегающего к сцинтиллирующей пластине, равной R_{90} , и толщине пластины $h_c > d_n(\text{max})$, величина $\beta \varepsilon_0(R_{90})$ является константой для любой средней энергии β -спектра.

По аналогии с эффективностью регистрации α -частиц эффективность регистрации β -частиц для элементарной ячейки с толщиной прилегающих слоев воды $h_b \beta \varepsilon_0(R_{90}, h_b, h_c)$ может быть представлена в виде:

$$\beta \varepsilon_0(R_{90}, h_b, h_c) = 2 \frac{R_{90}}{h_c} \times \times_{\beta} \varepsilon_0(R_{90}) = 0,374 \frac{R_{90}}{h_b}. \quad (23)$$

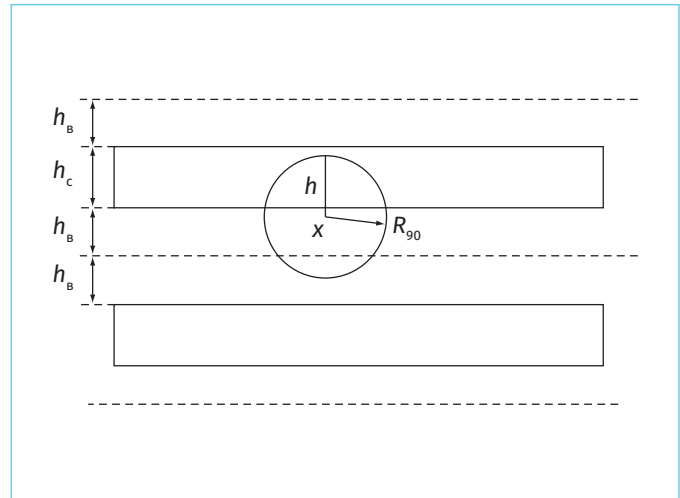


Рис. 3. Элементарная сцинтиллирующая ячейка (β -излучение): h_b – толщина слоя воды; h_c – толщина сцинтиллирующей пластины; h – высота шарового сегмента

Для радионуклида ^{137}Cs $R_{90} = 0,7$ мм, при $h_b = 1$ мм, $h_c = 2$ мм получаем $\beta \varepsilon_0(R_{90}, h_b, h_c) = 0,262$. Аналогично для радионуклида ^{60}Co , при $R_{90} = 0,31$ мм, получаем $\beta \varepsilon_0(R_{90}, h_b, h_c) = 0,116$. Отметим, что вычисленные значения эффективностей регистрации для элементарной ячейки являются оценкой снизу, потому что реальный радиус сферы, в котором β -частицы теряют энергию до значений больше 90%, например, до уровня 99%, больше R_{90} . Кроме того, некоторый вклад вносят и γ -кванты за счет фотоэффекта в пластинах и эффекта комптоновского рассеяния в жидкости и пластинах.

С учетом способа определения эффективности регистрации β -частиц $\beta \varepsilon_0(R_{90})$ средняя потеря энергии β -частиц в сцинтиллирующей пластине $\Delta \overline{E}_{\beta}$ равна:

$$\Delta \overline{E}_{\beta} = \overline{E}_{\beta} \cdot \beta \varepsilon_0(R_{90}). \quad (24)$$

Тогда среднее число фотонов, возникающих в сцинтиллирующей пластине при попадании в нее β -частицы, можно оценить по формуле:

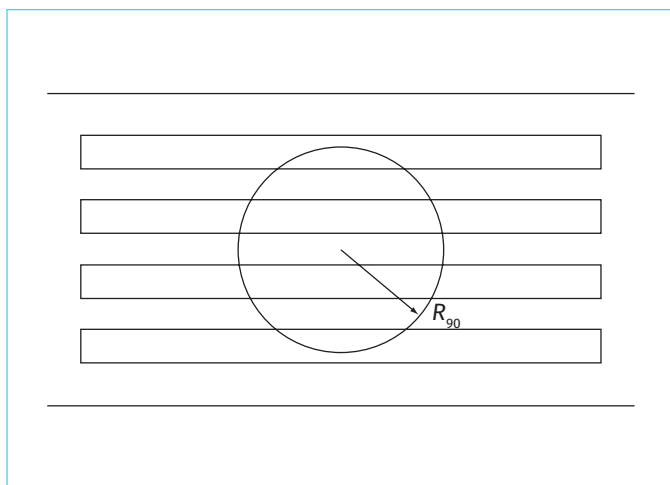


Рис. 4. Элементарная сцинтилирующая ячейка (β -излучение) при $R_{90} > (h_s + h_c)$

$$N(\bar{E}_\beta, h\nu) = 10^3 \cdot \frac{\bar{E}_\beta}{h\nu} \cdot \beta \cdot \epsilon_0(R_{90}), \quad (25)$$

где \bar{E}_β – средняя энергия бета-спектра; $h\nu$ – средняя энергия фотонов, образовавшихся в сцинтилирующей пластине, $h\nu = 3,0$ эВ.

Для радионуклида ^{137}Cs $\bar{E}_\beta = 174$ кэВ, тогда $N(\bar{E}_\beta, h\nu) = 1,2 \cdot 10^4$. Число фотонов, необходимых для образования одного электрона, попадающего на первый динод фотоумножителя, можно вычислить по формуле (14), полагая конверсионную эффективность сцинтиллятора $\eta_k = 0,032$. Это среднее значение конверсионной эффективности для органических сцинтилляторов [17]. Получаем $N_1 = 2,5 \cdot 10^4$.

Использованное в расчетах значение $\Omega_G = 0,0256$ является сильно заниженным, фактически оценкой снизу. В качестве оценки сверху можно принять значение, полученное следующим способом. Полагаем, что пластина обеспечивает 100% передачу света в обе стороны. Это означает, что через торец пластины выходит 50% фотонов. Предположим, что выходящие из торца пластины фотоны исходят из

точки, находящейся на осевой линии, соединяющей центры фотокатодов, и распространяются изотропно в пределах телесного угла 2π относительно осевой линии. Как было принято выше, расстояние от торца пластины до поверхности фотокатода в этом случае составляет 3 см. Тогда для оценки максимального значения телесного угла $\max \Omega_G$, подставляя в формулу (15) в качестве L значение 3 см, получим $\max \Omega_G = 0,148$. Это значение в 4,6 раза больше использованного в расчетах. Для значения $\max \Omega_G = 0,148$ число фотонов, необходимых для образования одного фотоэлектрона, попадающего на первый динод ФЭУ, соответственно, составит $(2,5 \cdot 10^4) / 4,6 = 0,54 \cdot 10^4$. Это также означает, что эффективность регистрации для элементарной ячейки можно вычислить по формуле (23), начиная с минимальной средней энергии β -спектра $\min \bar{E}_\beta$, равной:

$$\begin{aligned} \min \bar{E}_\beta &= \bar{E}_\beta \left(^{137}\text{Cs} \right) \frac{0,54}{1,2} = \\ &= 0,45 \bar{E}_\beta \left(^{137}\text{Cs} \right), \end{aligned} \quad (26)$$

где $\min \bar{E}_\beta = 78,3$ кэВ.

В случаях, когда R_{90} превышает суммарную толщину слоя воды между пластинами и самой пластины, для вычисления среднего объема области энергетических потерь в пластинах, попадающих в объем сферы радиусом R_{90} , необходимо суммировать объемы шаровых слоев и шаровых сегментов, принадлежащих пластинам, с коэффициентом, равным отношению плотности пластины к плотности воды. Технически это можно сделать в эквивалентной расчетной модели, в которой толщина пластин увеличивается в ρ/ρ_w раз. Например, для случая, изображенного на рис. 4, необходимо суммировать

объемы двух шаровых слоев и двух шаровых сегментов.

Расчетная эффективность регистрации α - и β -частиц для элементарной ячейки составила 1,52 и 26,2% соответственно.

Расчетные значения эффективности регистрации фактически являются максимально возможными значениями эффективностей регистрации указанных типов излучения – для объема измерительной камеры порядка 1 дм³ при принятых размерах сцинтиллирующих пластин и расстояний между ними.

Числовое значение нижней границы диапазона измеряемых суммарных удельных активностей (порогов чувствительности) для переносных радиометров жидкости спектрометрического типа зависит от эффективности регистрации, фоновой скорости счета радиометра и продолжительности измерения. Оценка числового значения нижней границы диапазона измеряемых удельных активностей может быть выполнена с использованием формулы относительной погрешности скорости счета импульсов от контролируемой жидкости. На нижней границе диапазона удельных активностей радионуклидов определяющей является случайная статистическая погрешность измерения скорости счета импульсов n_0 от контролируемой жидкости δn_0 для доверительной вероятности $P = 0,95$, равная:

$$\delta n_0 = 1,96 \frac{\sqrt{\varepsilon \cdot a \cdot V + n_\phi \cdot t}}{\varepsilon \cdot a \cdot V \cdot t}, \quad (27)$$

где ε – эффективность регистрации ионизирующего излучения; a – удельная активность радионуклида в жидкости, Бк/кг; V – объем измерительной камеры, дм³; t – продолжительность измерения, с; n_ϕ – скорость счета фоновых импульсов, равная:

$$n_\phi = N_\phi / t; \quad (28)$$

$$n_0 = (N/t) - n_\phi. \quad (29)$$

При заданном значении максимальной относительной погрешности измерения $\delta n_0 = 0,5$ из формулы (27) получается квадратичное уравнение для определения значения нижней границы удельной активности a как функции от фоновой скорости счета, продолжительности измерения, эффективности регистрации и объема измерительной камеры:

$$a(\delta n_0) = \left(\frac{1,96}{\delta n_0} \right)^2 \times \frac{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot \left(\frac{\delta n_0}{1,96} \right)^2 \cdot n_\phi \cdot t}}{2 \cdot \varepsilon \cdot V \cdot t}. \quad (30)$$

В табл. 2 представлены результаты модельных расчетов по определению порогов чувствительности α - и β -активных радионуклидов для заданной относительной погрешности результата измерения 50% (доверительная вероятность $P = 0,95$).

В качестве эффективностей регистрации α - и β -частиц соответствующих блоков детектирования взяты рассчитанные выше значения. В качестве скоростей счета фоновых импульсов приняты скорости счета импульсов, полученные ранее

Расчетные значения эффективности регистрации фактически являются максимальными для излучения α - и β -частиц при объеме измерительной камеры порядка 1 дм³.

Значения порогов чувствительности α -излучения радионуклида ^{241}Am и β -излучения радионуклида ^{137}Cs в зависимости от продолжительности измерения

Продолжительность измерения, с	Порог чувствительности, Бк/кг	
	$\epsilon_{\alpha}(\text{Am}) = 1,52\%$; $n_{\text{ф}\alpha} = 0,009$ имп/с; $V_p = 0,2 \text{ дм}^3$	$\epsilon_{\beta}(\text{Cs}) = 26,2\%$; $n_{\text{ф}\beta} = 6,24$ имп/с; $V_p = 0,2 \text{ дм}^3$
1	5057,7	384,2
5	1013,9	117,9
10	508,4	75,5
20	255,7	49,8
40	129,3	33,4
50	104,0	29,5
100	53,4	20,2
200	28,0	14,0
400	15,1	9,7
1000	7,1	6,1
1800	4,6	4,5
4000	2,7	3,0

в экспериментах с прототипами детекторов α - и β -частиц на основе ZnS(Ag) и полистирола соответственно.

Необходимо отметить, что в случае уменьшения прозрачности измеряемой водной среды в результате загрязнения (т.е. ухудшения светосбора за счет потерь вспышек сцинтиллятора, соответствующих малым амплитудам непрерывного спектра излучения радионуклида) реальные значения порогов чувствительности могут сильно отличаться от расчетных в худшую сторону.

Выводы

Оценки порогов чувствительности блока детектирования, полученные для радионуклидов естественного происхождения, требуют экспериментального

уточнения на долгоживущих радионуклидах из целевого ряда основных потенциальных источников загрязнения воды антропогенного происхождения.

Теоретически показано, что ожидаемые значения характеристик чувствительности (пороги детектирования) блока детектирования значительно лучше существующих на данный момент аналогов, но не обеспечивают выполнение действующих нормативных требований санитарных правил и норм, которые рассчитаны на длительное (годовое) потребление питьевой воды. Вместе с тем реализация новых технологических принципов и конструктивных решений в перспективном образце позволит эффективно предупреждать об опасности персонал и население при разовых аварийных выбросах радионуклидов в питьевую воду.

Список литературы

1. Сердюкова А.С., Капитанов Ю.Т. Изотопы радона и продукты их распада в природе. М: «Атомиздат», 1975.
2. Исаев А.Г., Бабенко В.В. Минимальная детектируемая активность. Основные понятия и определения // «АНРИ» 2010. № 2. С. 15–20.
3. ГОСТ Р 51635-2000. Мониторы радиационные ядерных материалов. Общие технические условия. М: «ИПК Издательство стандартов», 2000.
4. МР 2.6.1.0064-12. Радиационный контроль питьевой воды методами радиохимического анализа. М: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 2013. 74 с.
5. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). М: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 2010.
6. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). М: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 2009.
7. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения. М: «Информационно-издательский центр Минздрава России», 2000.
8. Описание технических характеристик радиационного монитора α -, β - и γ -излучающих радионуклидов в воде NEX-BETA-ABG. URL: <http://www.tech-associates.com/product-info/nex-beta-abg.pdf/> (дата обращения: 18.07.2023).
9. Описание технических характеристик радиационного монитора α -, β - и γ -излучающих радионуклидов в воде NEXGEN-SSS. URL: <http://www.tech-associates.com/product-info/nexgen-sss.pdf> (дата обращения: 18.07.2023).
10. Описание технических характеристик радиационного монитора трития в воде NEX-Tritium. URL: <http://www.tech-associates.com/product-info/Nex-Tritium.pdf/> (дата обращения 18.07.2023).
11. Описание технических характеристик портативной счетной системы на жидком сцинтилляционном детекторе SSS-22-PAL. URL: <http://www.tech-associates.com/product-info/sss-12p.pdf/> (дата обращения: 18.07.2023).
12. Описание технических характеристик радиационного монитора для воды MEDA-SP. URL: [http://www.tech-associates.com/product-info/MEDA-SPnt\[ybrj\].htm/](http://www.tech-associates.com/product-info/MEDA-SPnt[ybrj].htm/) (дата обращения: 18.07.2023).
13. Описание технических характеристик спектрометрических радиометров α -, β -излучения Tri-Carb. URL: <http://www.perkinelmer.com/product/tri-carb-4810tr-110-v-a481000/> (дата обращения: 18.07.2023).
14. Описание технических характеристик радиометра портативного спектрометрического Triathler. URL: <http://www.hidex.com/products/liquid-scintillation-counters/triathler-lsc/> (дата обращения: 18.07.2023).
15. Аглинцев К.К. Дозиметрия ионизирующих излучений. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1957.
16. Ляпидевский В.К. Методы детектирования излучений. М.: Энергоатомиздат, 1987.
17. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике. Киев: Наукова думка, 1975. 258 с.

References

1. Serdyukova A.S., Kapitanov Yu.T. Izotopy` radona i produkty` ix raspada v prirode. M: «Atomizdat».1975.
2. Isaev A.G., Babenko V.V. Minimal` naya detektiruemaya aktivnost`. Osnovny` e ponyatiya i opredeleniya // «ANRI» 2010. № 2. S. 15–20.
3. GOST R 51635-2000. Monitory` radiacionny` e yaderny` x materialov. Obshhie texnicheskie usloviya. M: «IPK Izdatel` stvo standartov», 2000.
4. MR 2.6.1.0064-12. Radiacionny` j kontrol` pit` evoj vody` metodami radioximicheskogo analiza. M: Federal` ny` j centr gigieny` i e` pidemiologii Rospotrebnadzora. 2013. 74 s.
5. SP 2.6.1.2612-10. Osnovny` e sanitarny` e pravila obespecheniya radiacionnoj bezopasnosti (OSPORB-99/2010). M: Federal` ny` j centr gigieny` i e` pidemiologii Rospotrebnadzora. 2010.
6. SanPiN 2.6.1.2523-09. Normy` radiacionnoj bezopasnosti (NRB-99/2009). M: Federal` ny` j centr gigieny` i e` pidemiologii Rospotrebnadzora. 2009.
7. SanPiN 2.1.4.1074-01. Pit` evaya voda. Gigienicheskie trebovaniya k kachestvu vody` centralizovanny` j sistem pit` evogo vodosnabzheniya. Kontrol` kachestva. Gigienicheskie trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti sistem goryachego vodosnabzheniya. M: «Informacionno-izdatel` skij centr Minzdrava Rossii». 2000.
8. *Opisanie texnicheskix xarakteristik radiacionnogo monitora α -, β - i γ -izluchayushhix radionuklidov v vode NEX-BETA-ABG* [Description of technical characteristics of the radiation monitor of α -, β - and γ -emitting radio-

nuclides in water NEX-BETA-ABG]. Available at: <http://www.tech-associates.com/product-info/nex-beta-abg.pdf/> (accessed: 18 July 2023). (In Russ.).

9. *Opisanie texnicheskix xarakteristik radiacionnogo monitora α -, β - i γ -izluchayushhix radionuklidov v vode NEXGEN-SSS* [Description of technical characteristics of the radiation monitor of α -, β - and γ -emitting radionuclides in NEXGEN-SSS water]. Available at: <http://www.tech-associates.com/product-info/nexgen-sss.pdf/> (accessed: 18 July 2023). (In Russ.).

10. *Opisanie texnicheskix xarakteristik radiacionnogo monitora tritiya v vode NEX-Tritium* [Description of technical characteristics of the NEX-Tritium radiation monitor in water]. Available at: <http://www.tech-associates.com/product-info/Nex-Tritium.pdf/> (accessed: 18 July 2023). (In Russ.).

11. *Opisanie texnicheskix xarakteristik portativnoj schetnoj sistemy` na zhidkom scintillyacionnom detektore SSS-22-PAL* [Description of technical characteristics of a portable counting system based on a liquid scintillation detector SSS-22-PAL]. Available at: <http://www.tech-associates.com/product-info/sss-12p.pdf/> (accessed: 18 July 2023). (In Russ.).

12. *Opisanie texnicheskix xarakteristik radiacionnogo monitora dlya vody` MEDA-SP* [Description of the technical characteristics of the radiation monitor for water MEDA-SP]. Available at: [http://www.tech-associates.com/product-info/MEDA-SPnt\[ybrj.htm/](http://www.tech-associates.com/product-info/MEDA-SPnt[ybrj.htm/) (accessed: 18 July 2023). (In Russ.).

13. *Opisanie texnicheskix xarakteristik spektrometricheskix radiometrov α -, β -izlucheniya Tri-Carb* [Description of technical characteristics of Tri-Carb α -, β -radiation spectrometric radiometers]. Available at: <http://www.perkinelmer.com/product/tri-carb-4810tr-110-v-a481000/> (accessed: 18 July 2023). (In Russ.).

14. *Opisanie texnicheskix xarakteristik radiometra portativnogo spektrometricheskogo Triathler* [Description of technical characteristics of Portable Spectrometric Triathler Radiometer]. Available at: <http://www.hidex.com/products/liquid-scintillation-counters/triathler-lsc/> (accessed: 18 July 2023). (In Russ.).

15. Aglintsev K.K. *Dozimetriya ioniziruyushhix izluchenij* [Dosimetry of ionizing radiation]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo texniko-teoreticheskoy literatury Publ., 1957 (In Russ.).

16. Liapidevskii V.K. *Metody detektirovaniia izlucheniia* [Methods of radiation detection]. Moscow, E`nergoatomizdat Publ., 1987 (In Russ.).

17. Nemezc O.F., Gofman Yu.V. *Spravochnik po yadernoj fizike* [Handbook of Nuclear Physics]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1975, 258 p. (In Russ.).

Поступила в редакцию: 22.05.2023

Одобрена рецензентами: 25.06.2023

Принята к печати: 04.12.2023

Об авторах

Сергей Павлович Никитаев – доктор технических наук, профессор ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики».

Sergey P. Nikitaev – Grand PhD Engineering sciences, Professor SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics».

Сергей Александрович Чернов* – кандидат химических наук, старший научный сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики». Адрес для почтовых отправок: 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А. E-mail: mail@cniihm.ru.

Sergey A. Chernov* – PhD Chemical sciences, senior researcher SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics». Postal address: 16A Nagatinskaya str., Moscow, 115487. E-mail: mail@cniihm.ru.

Марта Борисовна Казакова – ведущий научный сотрудник ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики».

Marta B. Kazakova – leading researcher SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics».

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

СОЗДАН МАТЕРИАЛ, СПОСОБНЫЙ ГЕНЕРИРОВАТЬ ТОПЛИВО ИЗ ВОДЫ

Разработка ученых Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (ИНЭП ЮФУ) потенциально может найти применение в производстве экологически чистого топлива и накопления энергии. Кроме того, технология может значительно повысить эффективность расщепления воды, способствуя переходу к устойчивой энергетике.

Злободневным вопросом современного мира является поиск новых энергетических технологий, которые не принесут ущерб климату, будут полезны и эффективны для экономики. Решением проблемы могут стать катализаторы – вещества или материалы, которые ускоряют электрохимические реакции.

Для восстановления кислорода и выделения водорода чаще всего электрокатализатором выступала платина и ее производные. Однако этот благородный металл весьма дорог и не всегда обеспечивает защиту от химических веществ, окисляющих топливо. В связи с этим ученые ИНЭП ЮФУ под руководством ведущего научного сотрудника «Научно-исследовательской лаборатории технологии функциональных наноматериалов» Татьяны Мясоедовой создали новый материал, который может помочь более эффективно генерировать водород и кислород из воды – сульфид меди-молибдена (CuMoS). При этом электрод, состоящий из сульфидов меди и молибдена микростержневой структуры на пеноникеле, может быть использован в качестве активного и надежного бифункционального электрокатализатора для расщепления воды.

Данная работа – реализация идеи старшего научного сотрудника института, участника программы постдоков ЮФУ в рамках Программы развития «Приоритет-2030» (нацпроект «Наука и университеты») Раджатсинга Калисулингам. Результаты исследования опубликованы в журнале «Chemistry Europe».

«Практическая значимость наших результатов заключается в потенциале производства экологически чистого водорода и накопления энергии. Эта технология могла бы значительно повысить эффективность расщепления воды, способствуя переходу к устойчивой энергетике», – отметила Татьяна Мясоедова.

Специалисты отмечают, что в будущем перед коллективом стоит задача оптимизации процесса синтеза микростержней CuMoS, расширение масштабов производства и тестирование материала в реальных условиях.

Источник: sfeedu.ru

Изображение: фотобанк ЛОРИ

ИНЖЕНЕРНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОГО ХРАНЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ

ENGINEERING AND ANALYTICAL MODELING OF SYSTEMS FOR THE SAFE STORAGE OF EXPLOSIVE MATERIALS

В.А. ЗАЛОЗНЫЙ, Я.И. ЗАПОРОЖЧЕНКО,
ФГУП «Специальное конструкторско-
технологическое бюро «Технолог»

V.A. ZALOZNYI, YA.I. ZAPOROZHCHENKO,
FSUE «Special Construction and Technological
Bureau «Technologist»

Аннотация. Предложена методика расчета норм загрузки и прочности стальных кабин для хранения в них взрывчатых материалов. Представлена инженерно-аналитическая модель воздействия детонирующего заряда на стены изготовленных образцов. Расчеты успешно верифицированы экспериментом. Сравнение с известной инженерной методикой показало более широкую область применения представленных изысканий.

Abstract. A method for calculating the loading rates and strength of steel cabins for storing explosive materials in them is proposed. An engineering and analytical model of the impact of a detonating charge on the walls of manufactured samples is presented. The calculations were successfully verified by experiment. Comparison with the well-known engineering methodology showed a wider scope of application of the presented research.

Ключевые слова: СТАЛЬНЫЕ КАБИНЫ;
НОРМА ЗАГРУЗКИ; ХРАНЕНИЕ ВЗРЫВЧАТЫХ
МАТЕРИАЛОВ; ПРОГИБ СТЕНКИ; ФОРМУЛЫ
САДОВСКОГО.

Keywords: STEEL CABINS; LOADING RATE;
STORAGE OF EXPLOSIVE MATERIALS; WALL
DEFLECTION; SADOVSKY FORMULAS.

Для цитирования: Залозный В.А., Запорожченко Я.И. Инженерно-аналитическое моделирование систем безопасного хранения взрывчатых материалов // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 2. С. 116–128.

For citation: Zaloznyy V.A., Zaporozhchenko Ya.I. Engineering and analytical modeling of systems for the safe storage of explosive materials. *Perspektivnye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti* [Promising technologies for security systems], 2023, N 2, pp. 116–128 (In Russ.).

Введение

Расширение производства на предприятиях ОПК часто требует использования быстровозводимых, легких, дешевых и при этом безопасных помещений (кабин) для работы со взрывчатыми материалами (ВМ). Наиболее привлекательным в этом плане является сталь. Однако такие кабины необходимо предварительно рассчитать на безопасность при нештатном или запланированном взрыве ВМ. Основной выступает проверка на прочность ее стенок. Известные методики, как правило, работают в отношении железобетонных помещений. Представленная же в работе модель предназначена исключительно для расчета кабин из стали, то есть для узкого диапазона задач.

Она может быть использована как для прямого, так и обратного расчета нормы загрузки. Модель позволяет учитывать геометрические параметры кабины и свойства материала ее стен. Она также дает более точные и детализированные результаты по сравнению с инженерной методикой.

Расчет

Описание модели – полуаналитический метод. Для определения характера и величины воздействия взрыва на стенки конструкции сравниваются две величины:

нагрузка, которую может принять стена до наступления некоторого предела (предел текучести, предел прочности, допустимый прогиб и т.п.);

импульс воздушной ударной волны (ВУВ), приходящий на стену при взрыве заряда.

Методику можно привести к двум функциям: функции величины предельного импульса стены и функции величины импульса, создаваемого ВУВ:

$$i = f(a, b, h, E, \sigma, \nu, \rho);$$

$$i_{\text{ВУВ}} = f(a, b, c, Q, k_3),$$

где a, b, c – ширина, высота и глубина кабины, м; h – толщина пластины, м; E – модуль упругости, Па; σ – предельное напряжение в материале стены, Па; ν – коэффициент Пуассона; ρ – плотность материала стены, кг/м³; Q – масса ВМ, кг; k_3 – тротильный коэффициент.

Выполнение условия $i_{\text{ВУВ}} \leq i$ позволяет определить максимальную норму загрузки ВМ для стальных кабин заданной геометрии.

Нахождение предельного импульса для стены. Для определения предельного напряжения изгиба на плите решается двумерная задача изгиба стены, описанная в работах [1, 2].

Для нахождения предельного прогиба плиты, соответствующего предельному напряжению, решены уравнения равновесия:

$$\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = 0; \quad (1)$$

$$U = \frac{Eh^2}{8(1-\nu^2)} \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right]; \quad (2)$$

$$\sqrt{2EU} \leq \sigma, \quad (3)$$

w – функция прогиба пластины: $w(x, y) = f(x) \cdot f(y)$, где $f(x)$, $f(y)$ – моды функции прогиба; U – потенциальная энергия, Дж; E – модуль упругости, Па; h – толщина пластины, м; ν – коэффициент Пуассона.

Решение уравнения (1) позволяет подобрать уравнения мод для граничных условий. Подстановка мод в уравнение (2) и решение (3) дает уравнение зависимости величины максимального прогиба от геометрии плиты и ее механических свойств:

$$w(x,y) = A(a,b,h,E,\sigma,\nu) \cdot f(x) \cdot f(y). \quad (4)$$

Зная уравнение прогиба плиты и характер закрепления, можно найти погонные моменты, действующие на продольных опорах плиты:

$$M_x = -\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right);$$

$$M_y = -\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right). \quad (5)$$

Дальнейшие расчеты ведутся с использованием уравнений энергетического метода, приведенного в работе [3]. Суть метода заключается в замене сложного объекта одномерным осциллятором, имеющим эквивалентные массу и жесткость (рис. 1).

При известных погонных моментах M_x и M_y , дальнейшие расчеты проводятся с использованием следующих формул:

$$R_{II} = 4(M_x \lambda + M_y \tan(\gamma));$$

$$\tan(\gamma) = \frac{\lambda}{\sqrt{k \cdot (3\lambda^2 + k)}}, \quad (6)$$

где R_{II} – реакция эквивалентной опоры, Н; $\lambda = a/b$; $k = M_x/M_y$, причем $a > b$, $M_x > M_y$.

Кинетическая энергия плиты:

$$T_k = \frac{R_{II}^2}{2k_3}, \quad (7)$$

где

$$k_3 = \frac{0,723\pi^4 Eh^3}{12ab(1-\nu^2)} \left(\frac{a^4 + b^4}{a^2b^2} + 0,606 \right).$$

Допустимый импульс эквивалентного осциллятора и распределенный импульс, приходящий на стену:

$$I_3 = \sqrt{2m_3 T_k}, \quad (8)$$

где

$$m_3 = \frac{9}{64} \mu ab; \quad i = \frac{4I_3}{ab}. \quad (9)$$

Нахождение импульса ВУВ, создаваемой зарядом ВМ. Величина импульса ВУВ, приходящей на поверхность стены, определяется по формулам Садовского в постановке задачи с разбиением поверхности стены на секторы. Схема разбиения представлена на рис. 2.

На рисунке стена имеет размеры a и b , размеры сектора равны $a/3$ и $b/3$. Заряд расположен на высоте b_{vv} , отстоит от ле-

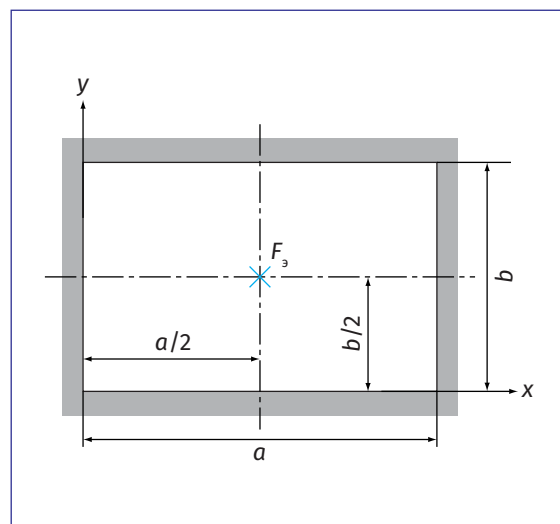


Рис. 1. Схема эквивалентного осциллятора для заземленной по контуру плиты, где F_3 – эквивалентная нагрузка, приложенная к центру плиты

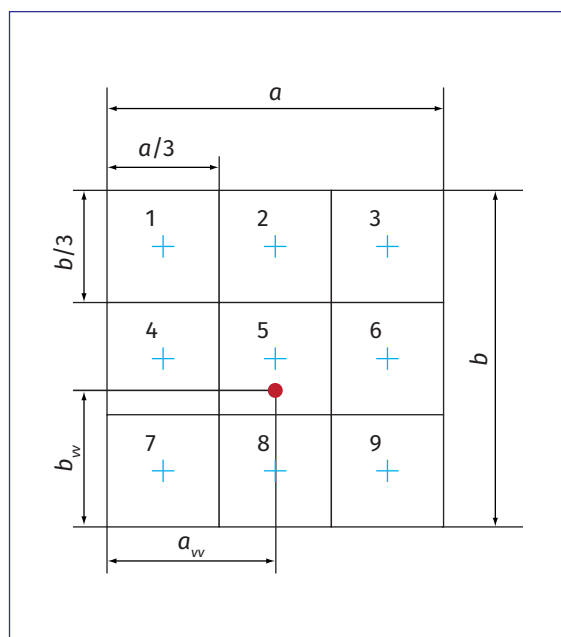


Рис. 2. Схема разбиения стены на секторы

вой границы стены на расстоянии a_w , и отстоит от листа на расстоянии c_w .

Для каждого сектора высчитывается расстояние до заряда и приходящий на него импульс ВУВ. Полученные величины импульсов усредняются, и проверяется влияние отраженной ВУВ.

Когда координаты центров секторов (табл. 1) найдены, расстояние высчитывается по формуле:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

Импульс ВУВ, приходящий на центр сектора, равен:

$$i = 350 \frac{Q_3^{\frac{2}{3}}}{R}; Q_3 = k_{\text{эКВ}} m_{\text{чЗ}}, \quad (10)$$

где $k_{\text{эКВ}}$ – тротильный эквивалент; $m_{\text{чЗ}}$ – масса заряда.

Учет влияния вторичной ВУВ происходит через коэффициент k_2 , который высчитывается с условием [4]:

$$\begin{cases} k_2 = 8,5 - \frac{V}{2Q_3}, & \text{при } 7 < \frac{V}{Q_3} < 15 \\ k_2 = 1, & \text{при } 15 < \frac{V}{Q_3} \end{cases}. \quad (11)$$

Итоговое значение импульса для сектора равно:

$$i_{\text{ВУВ}} = k_2 i.$$

Общий импульс ВУВ, действующий на поверхность плиты:

$$i_{\text{ВУВ}} = \frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 i_{\text{max},i,j}}{9}.$$

Сравнивая предельный импульс с импульсом ВУВ, можно подобрать норму загрузки ВМ для кабины.

Описание модели – инженерный метод. Здесь используется методика, представленная в работе [5]. С ее помощью рассчитывается масса ВМ, приводящая к предельному прогибу стены, величина которого равна 1% от длины большей стороны стены. Методику можно привести к функции массы заряда от геометрии стены, плотности и модуля упругости:

$$Q = f(a, b, h, E, \rho).$$

В отличие от предыдущей методики здесь не учитывается глубина кабины, предельное напряжение σ и коэффициент Пуассона ν .

Характеристики материала заданы коэффициентом ξ , который равен:

$$\xi = \sqrt{\frac{E \cdot \rho}{10g}}, \quad (12)$$

Таблица 1

Уравнения координат центров секторов

x	y	z	x	y	z	x	y	z
$\frac{1}{6}a - a_w$	$\frac{1}{6}b - b_w$	c_w	$\frac{1}{2}a - a_w$	$\frac{1}{3}b - b_w$	c_w	$\frac{5}{6}a - a_w$	$\frac{1}{3}b - b_w$	c_w
1 сектор			2 сектор			3 сектор		
$\frac{1}{6}a - a_w$	$\frac{1}{2}b - b_w$	c_w	$\frac{1}{2}a - a_w$	$\frac{1}{2}b - b_w$	c_w	$\frac{5}{6}a - a_w$	$\frac{1}{2}b - b_w$	c_w
4 сектор			5 сектор			6 сектор		
$\frac{1}{6}a - a_w$	$\frac{5}{6}b - b_w$	c_w	$\frac{1}{2}a - a_w$	$\frac{5}{6}b - b_w$	c_w	$\frac{5}{6}a - a_w$	$\frac{5}{6}b - b_w$	c_w
7 сектор			8 сектор			9 сектор		

где E – модуль упругости, Па; ρ – плотность, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с.

Лимитирование нагрузки задается коэффициентом прогиба k_{II} :

$$k_{II} = a_{max}/5000, \quad (13)$$

где a_{max} – наибольшая сторона стены, м.

Расстояние от заряда до стены берется по нормали к плите и считается перпендикулярным.

Для учета закрепления стены берется коэффициент β , значения которого приведены в табл. 2.

Формула для нахождения нормы нагрузки выглядит следующим образом:

$$Q = \frac{\xi}{\beta} k_{II} \frac{r^2 h^2 b}{a^2} \text{ при } a \geq b. \quad (14)$$

Решение модельной задачи. Исходные данные для модельной задачи приведены в табл. 3 и 4.

Сборка кабины осуществляется путем приваривания листов к каркасу из уголков. Согласно работе [6], предельная прочность шва составляет 0,85 от про-

Таблица 2

Коэффициент закрепления

a/b	Плита, свободно опертая по контуру	Плита, защемленная по контуру
1	0,288	0,266
2	0,115	0,100
3	0,069	0,058

чности стали, следовательно разрушение кабины начнется с разрыва швов.

Предельное напряжение шва будет равно:

$$\sigma_{III} = 0,85\sigma_b.$$

И для материала стены равно 323...416 МПа.

Решение модельной задачи – полуналитический метод. Так как кабина представляет собой куб с зарядом, расположенным по центру, выбор стены для расчета не важен. Возьмем стену со сторонами a и b .

Стены кабины сварены с внутренним каркасом и считаются заземленными по периметру. Граничные условия представлены в следующем виде:

Таблица 3

Геометрические параметры кабины

Параметр, м	Обозначение	Величина
Ширина	a	2
Высота	b	2
Глубина	c	2
Толщина	h	0,003
Положение заряда по ширине кабины	a_{vv}	1
Положение заряда по высоте кабины	b_{vv}	1
Положение заряда по глубине кабины	c_{vv}	1

Таблица 4

Параметры стали СтЗсп5 (ГОСТ 380–2005, ГОСТ 14637–89)

Параметр	Обозначение	Величина
Предел текучести, МПа	$\sigma_{0,2}$	245*
Временное сопротивление, МПа	σ_b	380...490
Модуль упругости, ГПа	E	200
Коэффициент Пуассона	ν	0,28
Плотность, кг/м ³	ρ	7800

*Для низкоуглеродистой стали типа СтЗ [7] характерен большой разброс по величине $\sigma_{0,2}$.

при $y = 0, b : w = 0; \frac{\partial w}{\partial y} = 0;$

при $x = 0, b : w = 0; \frac{\partial w}{\partial x} = 0.$

Решение уравнения (1) для этих граничных условий позволяет функцию прогиба $w(x,y)$ записать:

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^k \sum_{n=1}^k A_{m,n} \frac{1}{4} \left(1 - \cos\left(\frac{2m\pi x}{a}\right) \right) \times \left(1 - \cos\left(\frac{2n\pi y}{b}\right) \right). \quad (15)$$

В данной задаче для упрощения расчета учитывается только одно слагаемое, поэтому функция (15) принимает вид:

$$w(x, y) = A \frac{1}{4} \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right) \right) \times \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi y}{b}\right) \right). \quad (16)$$

Частные производные этой функции подставляются в уравнение (2), которое, в свою очередь, подставляется в условие (3). Из полученного отношения выводится параметр амплитуды, который равен прогибу в центре стены (табл. 5).

Таблица 5

Параметры, полученные в ходе расчета предельно допустимого импульса

Параметр	Формула	Значение	
		$\sigma = 245$ МПа	$\sigma_{ш} = 323...416$ МПа
Прогиб $w(a/2, b/2)$, м	(4)	99	131...169
Продольные моменты M_x и M_y , Н	(5)	153,1	201,9
Реакция эквивалентной опоры R_n , Н	(6)	1225	1615
Кинетическая энергия осциллятора T_n , Дж	(7)	33,5	58,2
Эквивалентный импульс $I_{э}$, кг-м/с	(8)	29,7	39,1
Предельный импульс, действующий на стену i , кг-м/с	(9)	29,7	39,1

Таблица 6

Расстояние от заряда до центра каждого сектора

Расстояние, м		
1,37	1,2	1,37
Сектор 1	Сектор 2	Сектор 3
1,2	1	1,2
Сектор 4	Сектор 5	Сектор 6
1,37	1,2	1,37
Сектор 7	Сектор 8	Сектор 9

Таким образом, для исходных данных в табл. 3 и 4 величина прогиба, соответствующая максимальному прогибу в упругой зоне, равна 95 мм, а максимальному прогибу в пределах прочности – 147...189 мм.

Соответствующие этим величинам прогиба предельные импульсы высчитываются по формулам (5)–(9).

Для расчета импульса, создаваемого зарядом, в табл. 4 подставляются размеры стены и расстояние от заряда до стены по нормали, после чего высчитывается расстояние от заряда до центра каждого из 9 секторов (рис. 2). Эти расстояния приведены в табл. 6.

Для нахождения импульса ВУВ от заряда подобраны массы VM , соответствующие предельным напряжениям передела текучести и предела прочности швов. Подобранные массы приведены в табл. 7.

Расчет по формуле (10) дает значения импульсов, приходящих на каждый сектор, указанные в табл. 8.

Результат: для сварной кабины размерами $2000 \times 2000 \times 2000$ мм из стали Ст3, с толщиной стенки 3 мм и расположением заряда в геометрическом центре кабины масса заряда, при взрыве которого деформации стенок кабины будут упругими, не должна превышать 34 г. Увеличение массы заряда приведет к пластическим

Таблица 7

Массы ВМ, эквивалентные импульсам ВУВ

Вещество	Масса для $\sigma = 245$ МПа	Масса для $\sigma_{ш} = 323...416$ МПа
Тротил	34 г	52...75 г

Таблица 8

Величины импульсов ВУВ, приходящей на секторы стены

$Q_3 = 34$ г			$Q_3 = 52...75$ г		
26,7	30,6	26,7	35,5...45,3	40,6...51,8	35,5...45,3
30,6	36,7	30,6	40,6...51,8	48,8...62,2	40,6...51,8
26,7	30,6	26,7	35,5...45,3	40,6...51,8	35,5...45,3
Среднее: 28,96			Среднее: 50,06		

Таблица 9

Параметры, полученные в ходе инженерного расчета

Параметр	Ссылка	Значение
Характеристика материала ξ	(12)	$4,09 \cdot 10^6$
Коэффициент прогиба k_n	(13)	$4 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент закрепления β	Табл. 2	0,266
Масса ВМ, кг	(14)	0,028

деформациям, а при массе заряда от 52 до 75 г будут разрушены швы кабины.

Решение модельной задачи – инженерный расчет. Данные, полученные после проведения инженерного расчета, приведены в табл. 9.

Результат: для кабины размерами $2000 \times 2000 \times 2000$ мм, с толщиной стенки 3 мм масса заряда не должна превышать 28 г.

Эксперимент

Натурные испытания – верификация методики расчета. Целью испытаний была верификация методики расчета и изучение поведения кабин при взрыве тротиловых зарядов различной

массы. Полученные результаты позволили оценить прочность и устойчивость кабины при воздействии взрыва и сравнить экспериментальные результаты с расчетными.

Были изготовлены кубические кабины размерами $2000 \times 2000 \times 2000$ мм. В испытаниях использовались тротиловые заряды различной массы. Толщины стенок – 3 мм. Исходя из габаритов изготовленных образцов по полуаналитической методике, были рассчитаны массы подрывааемых зарядов, при которых кабины достигали некоторых предельных состояний, соответствующих пределу текучести материалов и их пределу прочности.

Результаты каждого испытания были зафиксированы с помощью скоростной

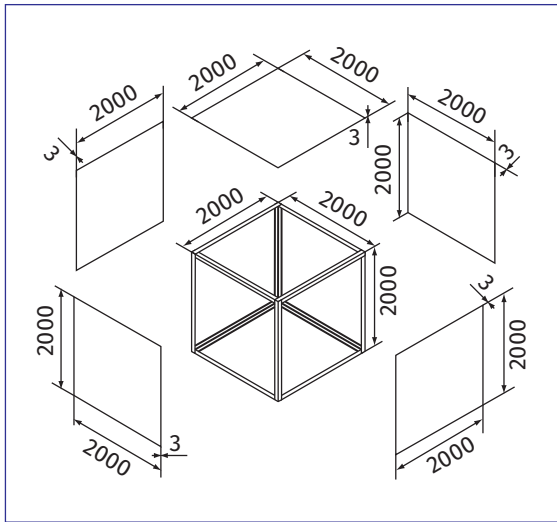


Рис. 3. Схема кабины (разнесенный вид)



Рис. 4. Кабина 2000×2000×2000 мм, вид снизу кабины

камеры. Полученные данные включают максимальные величины прогибов, фотографии состояния кабины после взрывов.

Испытания кабин. Схема испытываемой кабины представлена на рис. 3. Листы СтЗсп 3×2000×2000 мм приварены к каркасу из уголков 50×50×5 мм точечными швами. Нижняя сторона открыта (рис. 4). Закрепления кабины на площадке не предусмотрено. Масса кабины составляет 650 кг.

В геометрическом центре кабины последовательно взрываются три заряда тротила, массы которых перечислены в табл. 10.

Результаты испытаний зарядом 30 г (рис. 5). В результате взрыва кабина расширилась и вернулась в исходное состояние, остаточные деформации незначительны.

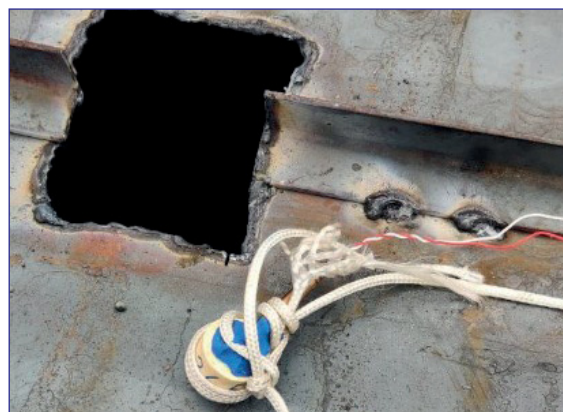


Рис. 5. Заряд ВМ с эквивалентной массой 30 г

На рис. 6 представлены фотографии кабины после испытания. На рис. 7 – кадр скоростной съемки процесса испытаний, на котором показан максимальный прогиб стенок кабины.

Таблица 10

Массы зарядов для испытаний кабин

Номер заряда	Масса тротила, г	Эквивалентная масса вместе с детонатором и навеской ПВВ, г
1	26,5	30
2	46,5	50
3	66,5	70



Рис. 6. Кабина после взрыва заряда массой 30 г



Рис. 8. Кабина после взрыва заряда массой 50 г

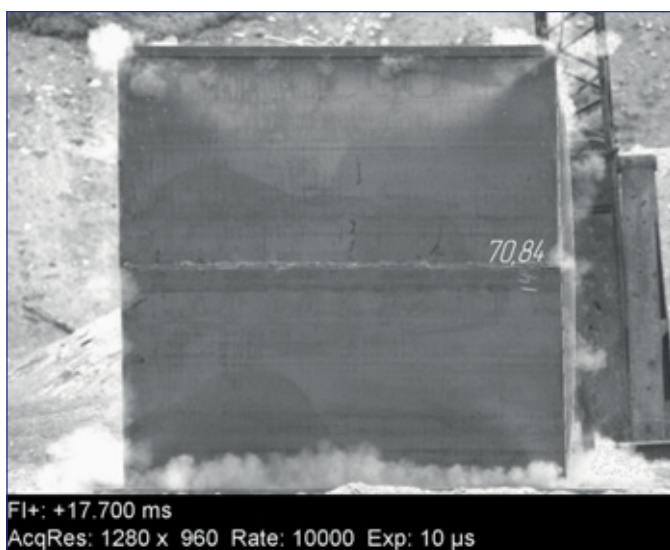


Рис. 7. Максимальная величина прогиба при взрыве заряда массой 30 г

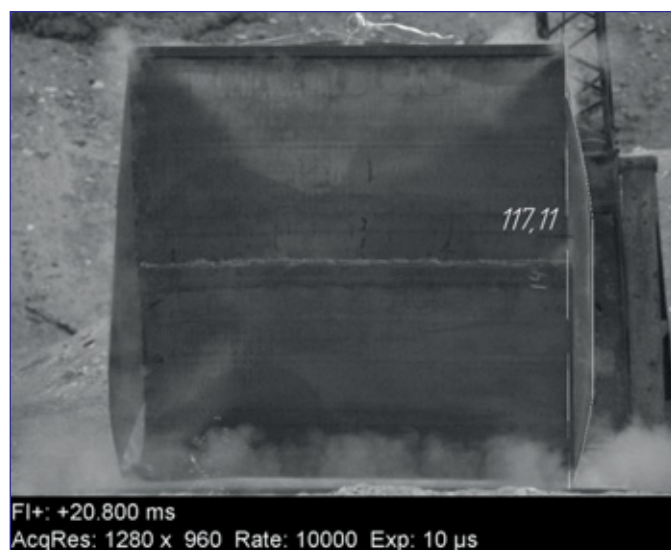


Рис. 9. Максимальная величина прогиба при взрыве заряда массой 50 г



Рис. 10. Кабина после взрыва заряда массой 70 г

Таблица 11

Сравнение величин прогибов, полученных в результате расчета по представленной методике и экспериментально

Масса заряда, г	Прогиб (мм) кабины 2000×2000×2000 мм по представленным методикам		
	Экспериментальная	Полуаналитическая	Инженерная
30	70	90 (+28%)	20
50	117	127 (+9%)	
70	Кабина разрушилась		

Результаты испытаний зарядом 50 г. В результате взрыва кабина расширилась с заметными остаточными деформациями. Произошло частичное разрушение швов. На рис. 8 представлены фотографии кабины после испытания. На рис. 9 – кадр скоростной съемки процесса испытаний, на котором показан максимальный прогиб стенок кабины.

Результаты испытаний зарядом 70 г. В результате взрыва несколько швов полностью разрушились, кабина потеряла структурную целостность и устойчивость. На рис. 10 представлены фотографии кабины после испытания.

Эксперимент позволил сделать следующие выводы: величины зарядов, подобранные в полуаналитической методике, вызвали предсказуемые разрушения; величины прогибов в эксперименте меньше, чем показали расчеты согласно полуаналитической методике, и больше, чем по инженерной.

Сравнение полуаналитической и инженерной методик

Для наглядности полуаналитические и инженерные модели были пересчитаны для зарядов, использованных в эксперименте, сравнение приведено в табл. 11.

Обе методики дали величину нормы загрузки, близкую к экспериментальной, однако следует отметить следующее:



Рис. 11. Зависимость нормы загрузки от толщины стенки для полуаналитической и инженерной методик: 1 – инженерный; 2 – $\sigma = 416$ МПа; 3 – $\sigma = 323$ МПа; 4 – $\sigma = 245$ МПа

1. Величина прогиба в инженерной методике не зависит от толщины стенки и всегда равна 1% от максимального размера, из-за чего при увеличении толщины стенки инженерная методика дает завышенные результаты относительно полуаналитической, что проиллюстрировано на рис. 11. На нем также показано, что в полуаналитической модели происходит перелом, обусловленный началом выполнения условия (11) и учетом влияния вторичной ВУВ.

2. Полуаналитическая методика позволяет произвести более тонкий подбор исходных параметров, что дает возможность оценить влияние свойств материалов и способов закрепления.

Вывод

Разработана методика расчета нормы загрузки ВМ для стальных кабин, которая позволяет определить норму загрузки по

геометрическим параметрам кабины и свойствам материала ее стен. Методика была верифицирована экспериментом и сравнена с известной инженерной методикой.

Список литературы

1. Специальные главы механики деформируемых тел: учеб. пособие / О.П. Ткаченко, В.А. Рукавишников. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2006. 60 с.
2. *Феодосьев В.И.* Сопrotивление материалов: учеб. для вузов. 10-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.
3. *Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю.* Экстремальные воздействия на сооружения. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2009. 594 с.
4. *Шамин В.М.* Расчет защитных сооружений на действие взрывных нагрузок. М.: Стройиздат, 1989.
5. *Минаев О.А.* Расчет защитных устройств на действие импульса взрыва. М.: ЦНИИНТИ, 1980. 40 с.
6. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. Пособие по обследованию и проектированию зданий и сооружений, подверженных воздействию взрывных нагрузок. М.: ЦНИИПромзданий, 2000.
7. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., переработ. и доп. / Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский [и др.] / под общ. ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко. М., 2014. 1216 с.

References

1. Tkachenko O.P., Rukavishnikov V.A. *Spetsial'nye glavy mekhaniki deformiruemykh tel: ucheb. posobie* [Special chapters of mechanics of deformable bodies: textbook]. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 2006, 60 p. (In Russ.).
2. Feodosiev V.I. *Soprotivlenie materialov: ucheb. dlia vuzov. 10-e izd., pererab. i dop.* [Resistance of materials: textbook for universities. 10th ed., revision and supplement]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 1999, 592 p. (In Russ.).
3. Birbraer A.N., Roleder A.J. *Ekstremal'nye vozdeistviia na sooruzheniia* [Extreme Actions on Structures]. St. Petersburg, Izd-vo Politekh. un-ta publ., 2009, 594 p. (In Russ.).
4. Shamin V.M. *Raschet zashchitnykh sooruzhenii na deistvie vzryvnykh nagruzok* [Calculation of protective structures for the action of explosive loads]. Moscow, Stroyizdat publ., 1989. (In Russ.).
5. Minaev O.A. *Raschet zashchitnykh ustroystv na deistvie impul'sa vzryva* [Calculation of protective devices for the action of an explosion impulse]. Moscow, CNIINTI publ., 1980. 40 p. (In Russ.).
6. SNiP II-23-81*. *Stal'nye konstruksii. Posobie po obsledovaniiu i proektirovaniu zdanii i sooruzhenii, podverzhennykh vozdeistviuu vzryvnykh nagruzok* [SNIP II-23-81*. Steel structures. Manual on the survey and design of buildings and structures exposed to explosive loads]. Moscow, TSNIIPromzdani publ., 2000. (In Russ.).
7. Dragunov Y.G., Zubchenko A.S., Kashirsky Y.V. et al. *Marochnik stalei i splavov. 4-e izd., pererabot. i dop.* [Gradebook of steels and alloys. 4th ed., revised and supplemented]. Moscow, 2014, 1216 p. (In Russ.).

Поступила в редакцию: 16.10.2023

Одобрена рецензентами: 19.10.2023

Принята к печати: 04.12.2023

Об авторах

Владимир Андреевич Залозный* – сотрудник ФГУП «СКТБ «Технолог». Адрес для почтовых отправлений: Россия, 192076, Санкт-Петербург, проспект Советский, д. 33а. E-mail: ZaloznyyVA@yandex.ru.

Vladimir A. Zaloznyy* – employee of the FSUE «SKTB «Technolog». Postal address: 33a Sovetsky Ave, St. Petersburg, Russia, 192076. E-mail: ZaloznyyVA@yandex.ru.

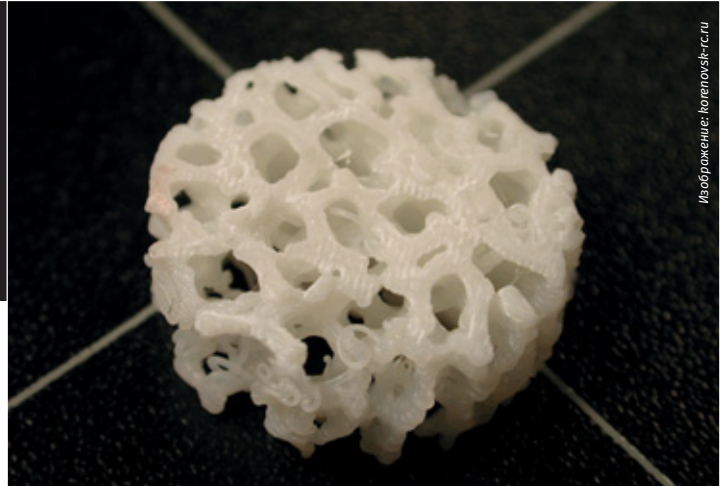
Ярослав Игоревич Запорожченко – сотрудник ФГУП «СКТБ «Технолог». Россия, Санкт-Петербург.

Yaroslav I. Zaporozhchenko – employee of the FSUE «SKTB «Technolog». St. Petersburg, Russia.

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

«ЖИВУЮ» ТКАНЬ ЧЕЛОВЕКА ТЕПЕРЬ МОЖНО РАСПЕЧАТАТЬ НА ПРИНТЕРЕ

Ученые Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ) спроектировали уникальную структуру скаффолдов для регенерации костей человека. Восстановить целостность ткани или заменить утраченную помогли аддитивные технологии.



Изображение: kopevsk-rs.ru

Как известно, качество любого имплантата определяется тем, насколько он стабилен при контакте с окружающими тканями, вызывает ли патологические реакции организма. Аддитивные технологии (создание изделий слой за слоем) позволяют производить такие имплантаты для костей – скаффолды. Их задача – имитировать структуру, свойства и функции живой ткани, а также оказывать механическую поддержку для клеток.

Эти требования накладывают ограничения на имплантаты: они должны обладать нужной пористостью и свойствами, аналогичными человеческой кости. Ученые ПНИПУ разработали градиентные структуры скаффолдов, предназначенные для замещения поврежденных костных тканей. Преимущество их подхода заключается в том, что он позволяет настраивать свойства скаффолда таким образом, чтобы имплантат в наибольшей степени соответствовал участку, которому требуется замена.

Исследование опубликовано в журнале *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, выпуск 147. Разработка проведена в рамках программы мегагрантов, соглашение № 075-15-2021-578.

Форма скаффолдов, разработанных учеными Пермского Политеха, способст-

вует созданию условий для наилучшего прикрепления, миграции и деления клеток. Структуры хорошо имитируют естественную кость по характеристикам пористости, коэффициентам сжатия и проницаемости. Они сочетают низкий модуль упругости с высоким пределом текучести.

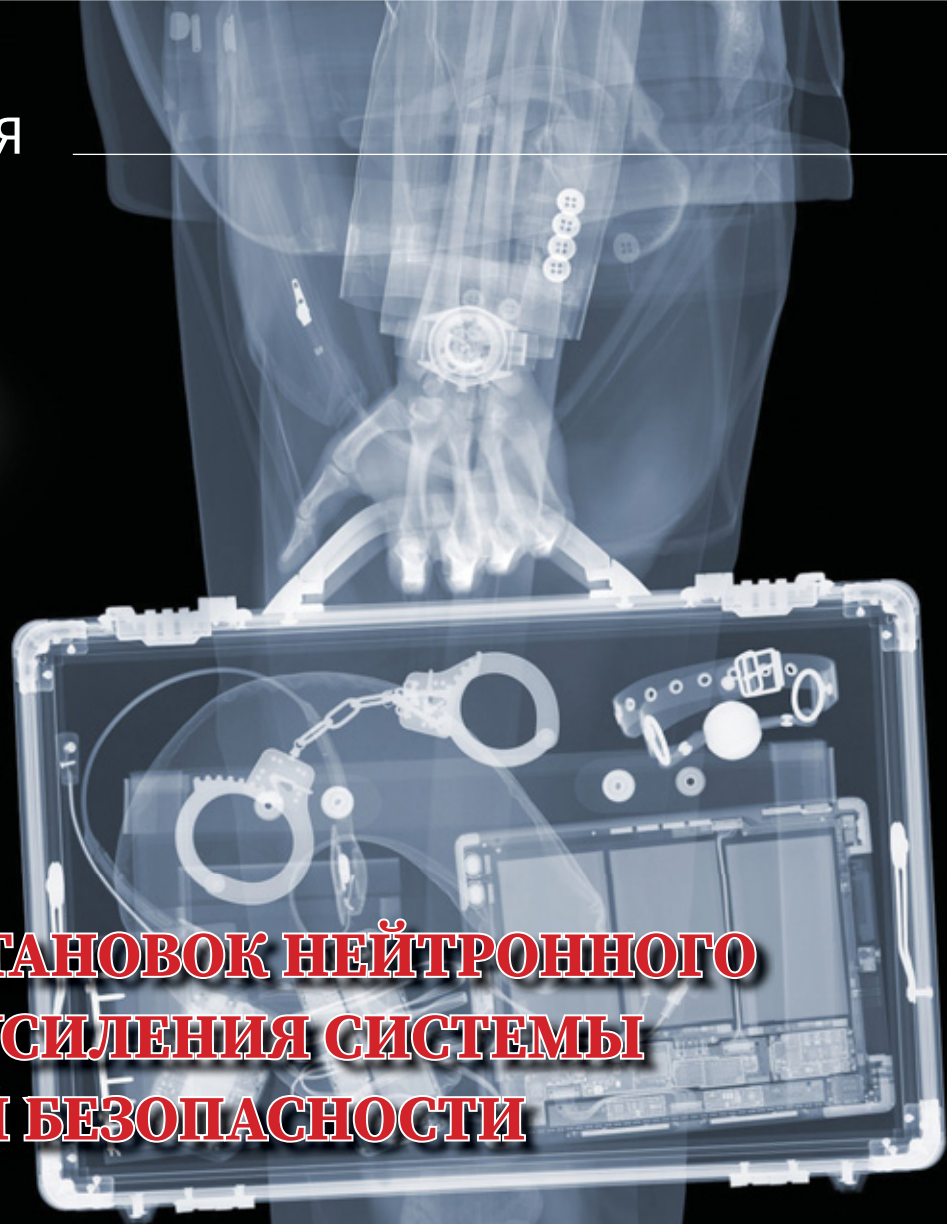
Сложное строение костной ткани достигается в разработанных скаффолдах за счет градиентной структуры с непрерывным изменением механических свойств. Это позволяет избежать зон концентрации напряжений, которые могут привести к разрушению костной ткани.

Скаффолды пермских ученых эффективны на границе раздела различных типов тканей. Например, при восстановлении поврежденного участка, включающего трабекулярную и кортикальную костные ткани. Трабекулярную ткань по-другому называют губчатой, она нужна для укрепления органов. А вот кортикальная – более прочная, отвечает за опору и защиту органов.

Источник: scientificrussia.ru

ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ

Изображение: catherineasquithgallery.com



УДК 519.72

ВНЕДРЕНИЕ УСТАНОВОК НЕЙТРОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ УСИЛЕНИЯ СИСТЕМЫ 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. Представлено решение задачи по идентификации взрывчатых веществ с помощью технологии досмотра на основе метода нейтронно-радиационного анализа. Полученные результаты позволяют считать внедрение предложенного подхода целесообразным для повышения уровня транспортной безопасности.

Ключевые слова: МЕТОД НЕЙТРОННОГО АНАЛИЗА; ВЗРЫВЧАТОЕ ВЕЩЕСТВО; ТРАНСПОРТНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ; ДОСМОТР; РЕНТГЕНОТЕЛЕВИЗИОННАЯ УСТАНОВКА; ТРАНСПОРТНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА.

Для цитирования: Илькухин Н.Ю. Внедрение установок нейтронного анализа для усиления системы транспортной безопасности / Н.Ю. Илькухин, С.М. Яковлев, Д.В. Бармашова, А.С. Козлов // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 2. С. 130–136.

INTRODUCTION OF NEUTRON ANALYSIS UNITS TO STRENGTHEN THE TRANSPORT SECURITY SYSTEM

N.Yu. ILKUKHIN, PhD in Engineering,
LLC «Elemental 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 solution of the problem of identifying explosives using inspection technology based on the method of neutron radiation analysis is presented. The results obtained allow us to consider the implementation of the proposed approach appropriate for improving the level of transport security.*

Keywords: NEUTRON ANALYSIS METHOD; EXPLOSIVE; TRANSPORT SECURITY; INSPECTION;
X-RAY TELEVISION INSTALLATION; TRANSPORT INFRASTRUCTURE.

For citation: *Ilkukhin N.Yu., Yakovlev S.M., Barmashova D.V., Kozlov A.S. Introduction of neutron analysis units to strengthen the transport security system. Perspektivnye tekhnologii dlia sistem bezopasnosti [Promising technologies for security systems], 2023, N 2, pp. 130–136 (In Russ.).*

Введение

Среди возможных потенциальных способов осуществления террористического акта (с применением биологического, химического, радиационного оружия и т.д.) проблема обнаружения взрывчатых веществ (ВВ) является одной из самых злободневных и трудно разрешаемых вследствие относительной легкости изготовления ВВ и сложности их обнаружения. В целях повышения антитеррористической защищенности объектов инфраструктуры различных видов транспорта в 2007 г. был принят 16-ФЗ «О транспортной безопасности» [1], в соответствии с которым Приказом Минтранса от 23.07.2015 г. были утверждены «Правила проведения досмотра, дополнительного досмотра, основного досмотра в целях обеспечения транспортной безопасности» [2].

Катализатором принятия 16-ФЗ «О транспортной безопасности» стали теракты по подрыву двух воздушных судов, вылетевших 25 августа 2004 г. из аэропорта Домодедово по направлению Москва–Волгоград и Москва–Сочи. Теракт показал, что аэропорты в условиях реализации мер авиационной безопасности «прозрачны» для террористов. Для повышения уровня безопасности на объектах транспортной инфраструктуры в рамках нового законодательства допускается использовать только сертифицированные технические средства, которые должны в том числе производить процедуру идентификации ВВ.

Оценка состояния авиационной безопасности на объектах транспортной инфраструктуры воздушного транспорта, которая основана на результатах инспекционных проверок Росавиации, пока-

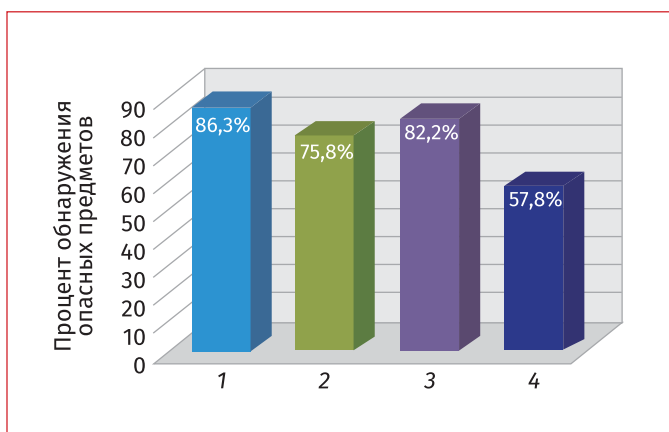


Рис. 1. Статистические данные по обнаружению запрещенных предметов в аэропорту «Шереметьево»:

- – скрытые взрывные устройства;
- – огнестрельное оружие; ■ – холодное оружие;
- – другие опасные предметы



Рис. 2. УВП-3102CR.01 на объекте транспортной инфраструктуры

зывает наличие серьезных недостатков, к основным из которых стоит отнести: человеческий фактор при принятии решения о наличии или отсутствии ВВ и недостаточную компетентность, квалификацию и опыт сотрудников транспортной безопасности в выявлении замаскированных ВВ и вскрытых взрывных устройств (ВУ).

На рис. 1 приведены данные по выявлению запрещенных предметов и веществ в аэропорту Шереметьево в течение одного среднестатистического года в рамках проведения инспекций, учений и тренировок [3].

Представленные данные по вероятности выявления опасных агентов показывают актуальность совершенствования технологий досмотра, которые позволили бы надежно обнаруживать ВВ и ВУ. В первую очередь акцент в этом направлении необходимо сделать на автоматизацию процесса принятия решения и минимизацию человеческого фактора.

В рамках реализации дополнительного досмотра в целях обнаружения замаскированных, герметизированных ВВ и ВУ, в том числе размещенных в неразборных предметах и в электронных устройствах, в соответствии с требованиями



Рис. 3. Установка нейтронного анализа для досмотра грузового транспорта

16-ФЗ «О транспортной безопасности» от 09.02.2007 г., 270-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «О транспортной безопасности» и отдельные законодательные акты Российской Федерации по вопросам обеспечения транспортной безопасности» от 02.08.2019 г., Приказом Минтранса № 227 от 23.07.2015 г. уже в настоящее время разработан ряд установок серии УВП на основе нейтронно-радиационного анализа (НРА). УВП-3102CR.01 (рис. 2) – единственная сертифицированная по Постановлению Правительства № 969 от 26.09.2016 г. [4] модель, относящаяся по международной классификации к классу EDS (explosive detection systems), в который не входят установки анализа паров и следов ВВ (ETD – explosive trace detection). Кроме того, существуют ее модификации для досмотра грузовых транспортных средств (рис. 3).

Описания метода работы установки нейтронного анализа

Принцип работы установок основан на реализации метода НРА, который позволяет обнаруживать ВВ в автоматическом режиме в контролируемых предметах независимо от вида, формы, агрегатного состояния ВВ, а также возможных мер маскировок ВВ. Анализатор предназначен для использования в ходе второго этапа досмотра предметов, с подозрением на возможное присутствие ВВ, после их предварительного контроля с помощью рентгенотелевизионных установок.

Известно, что рентгеновские установки не могут отличить взрывчатку от органики с близкой плотностью и атомным номером (сыр, мед, мясо и др.), а также надежно справиться с задачей обнаружения ВВ в электронных устройствах. Поэтому при обнаружении подозрительных предметов, в том числе в которые потенциально

возможно замаскировать ВВ, необходимо производить их размещение в досмотровую камеру установки НРА (рис. 4) для проведения дополнительного обследования. В процессе досмотра на ядерном уровне происходит исследование объекта и автоматическое определение наличия или отсутствия ВВ.

Апробация установок нейтронного анализа на объектах транспортной инфраструктуры показала, что они надежно решают задачи обнаружения ВВ различных типов. Вместе с тем одной из главных проблем для соответствия требованиям транспортной безопасности является необходимость идентификации ВВ. Для этого при реализации спектрометрического режима работы нейтронного анализа предлагается воспользоваться критерием Кульбака при проверке гипотез [5] и табличными данными для ВВ, в отношении которого проводится процедура идентификации.

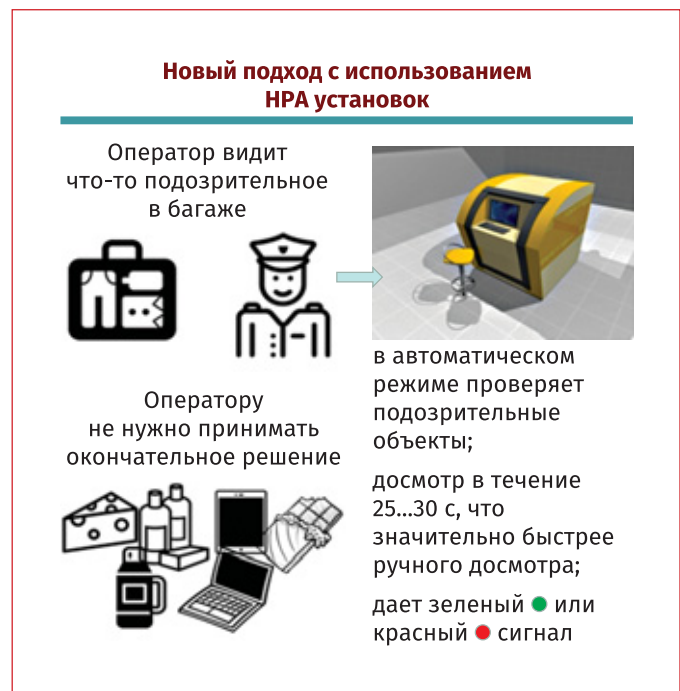


Рис. 4. Двухступенчатая схема досмотра на основе рентгеновской установки и установки НРА

К примеру, рассмотрим случай проверки соответствия масс элементов N, O, C в объекте досмотра содержанию этих элементов в тринитротолуоле (ТНТ).

Допустим: x_i – отсчеты детектора в i -м канале энергетического спектра (всего n каналов) объекта досмотра; $\bar{x}_{i\Phi}$ – среднее число отсчетов детектора в i -м канале энергетического спектра при регистрации фона.

Рассмотрим значения «чистого» отклика детектора:

$$x_{i\Theta} = x_i - \bar{x}_{i\Phi}.$$

При этом пусть

$$x_{i\Theta} = m_N \cdot k_{iN} + m_O \cdot k_{iO} + m_C \cdot k_{iC}, \quad (1)$$

где m_N, m_O, m_C – массы элементов N, O, C, соответственно; k_{iN}, k_{iO}, k_{iC} – среднее число отсчетов детектора в i -м канале энергетического спектра от 1 г, соответственно N, O, C.

В ТНТ массы элементов N, O, C связаны соотношениями:

$$m_O = m_N \cdot k_{ON}; m_C = m_N \cdot k_{CN}, \quad (2)$$

где k_{ON}, k_{CN} – известные, исходя из табличных данных по концентрациям N, O, C в ТНТ, коэффициенты.

Подставляя выражение (2) в формулу (1) и просуммировав $x_{i\Theta}$ по n каналам, получаем:

$$x_{\Theta} = m_N \cdot \sum_{i=1}^n (k_{iN} + k_{ON} \cdot k_{iO} + k_{CN} \cdot k_{iC}). \quad (3)$$

Находим массу m_N и, подставляя полученное значение в формулу (2), вычисляем значения масс m_O, m_C .

Подставляя полученные значения оценок масс m_N, m_O, m_C в формулу (1), находим $x_{i\Theta}$ в i -м канале энергетического спектра при предположении, что получаемые в процессе досмотра отсчеты детектора соответствуют ТНТ.

Обозначим величину при данном предположении:

$$x_{i\Theta_ТНТ} = x_{i\Theta}. \quad (4)$$

В процессе решения с использованием критерия Кульбака происходит проверка следующих альтернативных гипотез:

H_1 – показания детекторов x_i ($i = 1 \dots n$, n – число каналов) связаны с регистрацией гамма-излучения фона и регистрацией излучений, не соответствующих условиям выражений (2) и (4);

H_2 – показания детектора x_i , связанные с регистрацией гамма-излучения фона и гамма-излучения от N, O, C в соответствии с соотношениями (2) и (4).

$$\bar{I}(H_1 : H_2) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \left[x_i \cdot \ln \frac{x_i}{x_{i\Theta_ТНТ} + \bar{x}_{i\Phi}} + (x_{i\Theta_ТНТ} + \bar{x}_{i\Phi} - x_i) \right], & x_i \neq x_{i\Theta_ТНТ} + \bar{x}_{i\Phi} \\ 0, & x_i = x_{i\Theta_ТНТ} + \bar{x}_{i\Phi} \end{cases}.$$

Т а б л и ц а

Вероятности идентификации в зависимости от состава объекта досмотра

Состав ТНТ, %	$P_{\text{идент}} (900 \text{ с})$	$P_{\text{идент}} (1800 \text{ с})$	$P_{\text{идент}} (5000 \text{ с})$
N – 18,5, С – 37, О – 42,3	0,975	0,975	0,975
N – 18,5, С – 42,3, О – 37	0,94	0,89	0,681
N – 18,5, С – 46, О – 33,4	0,74	0,52	0,064

Если гипотеза H_2 верна, то:

$$P[2\bar{I}(H_1 : H_2) > \chi_{2\alpha}^2] < \alpha,$$

где $\chi_{2\alpha}^2$ – значение в таблицах χ^2 , соответствующее уровню 2α для n степеней свободы, где n – количество каналов, то есть анализируемое вещество соответствует по спектру ТНТ.

Для моделирования работы установки нейтронного анализа на основе использования алгоритма принятия решения по критерию Кульбака исходными данными были эталонные спектры углерода, кислорода и азота.

Известны табличные данные ВВ ТНТ по содержанию углерода, кислорода и азота (N – 18,5%, С – 37%, О – 42,3%) [6]. В качестве первого объекта досмотра выбираем ТНТ. Его спектр моделируется на основе эталонных спектров углерода, кислорода и азота. Последующие объекты досмотра выбираются с содержанием углерода и кислорода, отличных от ТНТ. С каждым объектом досмотра проводится 10000 испытаний. Время анализа 900, 1800 и 5000 с.

Оценки получены при использовании одного блока детектирования. Порог выбран таким образом, чтобы ошибка второго рода при инспектировании ТНТ была 2,5%. В таблице представлены данные по вероятностям обнаружения при различном времени анализа, указанном в скобках.

Как следует из представленных данных, вероятность идентификации соответствует при моделировании заданным значениям ошибки второго рода. При концентрациях углерода, кислорода и азота в объекте досмотра, отличных от ТНТ, вероятность идентификации объекта как ВВ ТНТ резко снижается.

Вывод

Внедрение в практику обеспечения безопасности инновационных установок обнаружения ВВ на основе метода НРА позволит снизить влияние человеческого фактора при проведении процедуры досмотра и значительно повысить эффективность обнаружения и идентификации замаскированных ВВ.

Список литературы

1. Федеральный закон «О транспортной безопасности» от 09.02.2007 г. № 16-ФЗ (последняя редакция) [Электронный ресурс] // СПС «КонсультантПлюс». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_66069 (дата обращения: 30.06.2023).
2. Приказ Минтранса РФ от 23. 07. 2015 г. № 227 «Об утверждении Правил проведения досмотра, дополнительного досмотра, повторного досмотра в целях обеспечения транспортной безопасности». URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71260968/?ysclid=lji9yj294k178500272> (дата обращения: 30.06.2023).

3. Волков А.К. Методы мониторинга деятельности операторов досмотровой техники службы авиационной безопасности аэропорта: дис. ... канд. тех. наук. Ульяновск: УИ ГА, 2018. 138 с.

4. Постановление Правительства № 969 от 26.09.2016 г. «Требования к функциональным свойствам технических средств обеспечения транспортной безопасности и правила проведения обязательной сертификации технических средств обеспечения транспортной безопасности». URL: <https://base.garant.ru/71500596/?ysclid=ljia13ekf634717353> (дата обращения: 30.06.2023).

5. Кульбак С. Теория информации и статистика. М.: Наука, 1967.

6. Шагов Ю.В. Взрывчатые вещества и пороха. М.: Воениздат, 1976. 120 с.

References

1. *Federal'nyi zakon «O transportnoi bezopasnosti» ot 09.02.2007 g. No 16-FZ (posledniaia redaktsiia)* [Federal Law «On Transport Security» dated 09.02.2007 N 16-FZ (latest edition)]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_66069 (accessed: 30 June 2023). (In Russ.).

2. *Prikaz Mintransa RF ot 23. 07. 2015. no 227 «Ob utverzhdenii Pravil provedeniia dosmotra, dopolnit'nogo dosmotra, povtornogo dosmotra v tseliakh obespecheniia transportnoi bezopasnosti»* [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 23. 07. 2015. N 227 «On approval of the Rules of inspection, additional inspection, re-inspection in order to ensure transport security»]. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71260968/?ysclid=lji9yj294k178500272> (accessed: 30 June 2023). (In Russ.).

3. Volkov A.K. *Metody monitoringa deiatel'nosti operatorov dosmotrovoi tekhniki sluzhby aviatsionnoi bezopasnosti aeroporta: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Methods of monitoring the activities of operators of inspection equipment of the airport aviation security service: dis. ... candidate of technical sciences]. Ulyanovsk, UI GA Publ., 2018, 138 p. (In Russ.).

4. *Postanovlenie Pravitel'stva no 969 ot 26.09.2016 g. «Trebovaniia k funktsional'nym svoistvam tekhnicheskikh sredstv obespecheniia transportnoi bezopasnosti i pravila provedeniia obiazatel'noi sertifikatsii tekhnicheskikh sredstv obespecheniia transportnoi bezopasnosti»* [Government Resolution No. 969 of 26.09.2016. «Requirements for the functional properties of technical means of ensuring transport security and rules for mandatory certification of technical means of ensuring transport security»]. Available at: <https://base.garant.ru/71500596/?ysclid=ljia13ekf634717353> (accessed: 30 June 2023). (In Russ.).

5. Kul'bak S. *Teoriia informatsii i statistika* [Information theory and Statistics]. Moscow, Nauka Publ., 1967. (In Russ.).

6. Shagov Yu.V. *Vzryvchatye veshchestva i porokha* [Explosives and gunpowder]. Moscow, Voenizdat Publ., 1976, 120 p. (In Russ.).

Поступила в редакцию: 20.05.2023

Одобрена рецензентами: 25.06.2023

Принята к печати: 04.12.2023

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 отправок: 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».

Sergey M. Yakovlev – leading engineer-technologist FSUE «Special Design and Technology Bureau «Technologist».

Дарина Викторовна Бармашова – инженер-технолог 1 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». Адрес для почтовых отправок: 192076, г. 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». Postal address: 33-A, Sovetsky Ave., St. Petersburg, 192076. E-mail: TOOL999@yandex.ru.

* Автор, ведущий переписку (corresponding author).

АВТОРЕМОНТНЫЙ ЦЕНТР ФГУП «ЦНИИХМ»

Оператор технического осмотра – аккредитованная линия проведения технического осмотра транспортных средств.*



Авторемонтный центр ФГУП «ЦНИИХМ» оказывает спектр услуг юридическим и физическим лицам по ремонту легковых и грузовых автомобилей отечественного и зарубежного производств, спецтехники, квадроциклов, снегоходов и снегоболотоходов.



АВТОРЕМОНТНЫЙ ЦЕНТР ФГУП «ЦНИИХМ» предлагает:

- компьютерную диагностику, сход-развал 3D, проверку и обслуживание кондиционеров, промывку инжектора и топливных форсунок;
- слесарные и кузовные работы;
- шиномонтаж;
- ремонт и восстановление колесных дисков;
- ответственное хранение автошин и автотранспорта;
- автомойку.



**Тел.: 8 (499) 616-77-56;
8 (905) 547-22-68;
8 (962) 364-66-06
E-mail: oto@cniihm.ru**



**Адрес: Москва, Нагатинская ул., д. 16А,
корп. 240 (въезд с ул. Хлебозаводский проезд)**

**Аттестат оператора технического осмотра № 10468 от 19.10.2021 г.*

ПОДГОТОВКА КАДРОВ ВЫСШЕЙ КВАЛИФИКАЦИИ В АСПИРАНТУРЕ ФГУП «ЦНИИХМ»



С.В. ПАХОМЕНКОВА, начальник аспирантуры и докторантуры
ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики»

Представлена история создания аспирантуры в ФГУП «ЦНИИХМ». Отмечается роль Героя Социалистического Труда, члена-корреспондента РАН, доктора технических наук, профессора К.Н. Шамшева, который стоял у истоков обновленной аспирантуры предприятия после распада СССР. Приводятся данные по современной структуре подготовки научных кадров высшей квалификации в институте.

Аспирантура, как институт подготовки научных кадров, впервые была организована в 1925 г. в молодом Советском государстве. Ее открыли при Наркомате просвещения, а в 1930-х гг. она распространилась в вузах и НИИ. Публичная защита кандидатских диссертаций практикуется с 1934 г. В том же году при президиуме Академии Наук СССР создается первая докторантура.

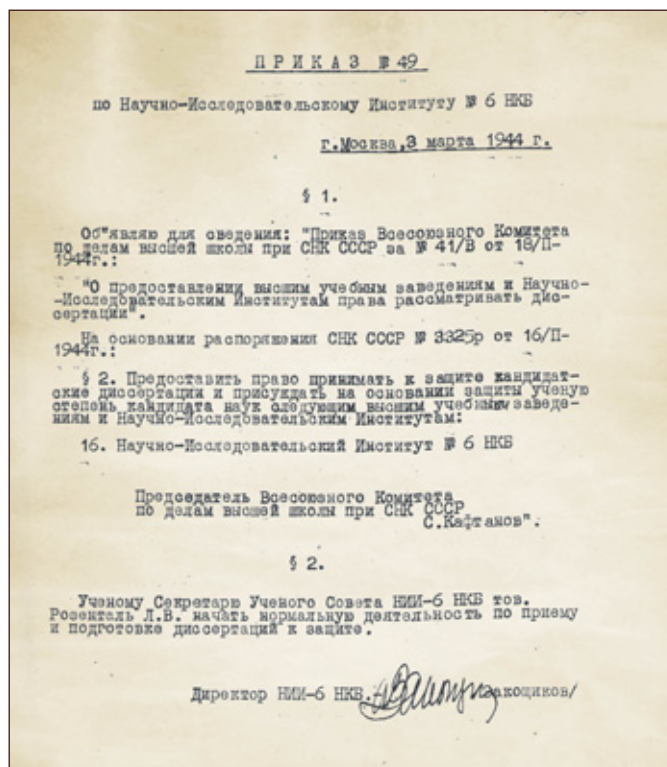
В Постановлении Совнаркома СССР «О подготовке научных и научно-педагогических работников» отмечалось, что аспирантура может быть открыта только в тех высших учебных заведениях и научно-исследовательских институтах, которые наиболее обеспечены высококвалифицированными научными кадрами и располагают соответствующим оборудованием. Сейчас такие требования предъявляются к государственным научным центрам, к которым относится и ФГУП «ЦНИИХМ».

Перед войной вопрос обеспеченности кадрами высшей квалификации в нашем институте, тогда НИИ-6, как и в других научных организациях, стоял крайне остро. В 1940 г. на предприятии работал всего 1 доктор и 20 кандидатов наук (для сравнения: сейчас в ФГУП «ЦНИИХМ» 26 докторов и 117 кандидатов наук). Приказом Всесоюзного комитета по делам высшей школы при Совнаркоме СССР 18 февраля 1944 г. нашему предприятию было предоставлено право принимать к защите кандидатские диссертации и присуждать ученую степень кандидата наук.

В сентябре 1945 г., практически сразу после войны, была создана аспирантура – единственная в отрасли. Ее основной задачей стала подготовка научных кадров не только для собственных нужд, но и всех предприятий в сфере боеприпасов и спецхимии. Основной вклад в организацию аспирантуры внес директор НИИ-6 А.П. Закощиков.



А.П. Закощиков, директор НИИ-6 НКБ



Приказ НИИ-6 о создании аспирантуры в институте

Изображение: фотобанк ЛОРИ



Реактивные системы залпового огня «Смерч»

380 человек
защитили кандидатские
диссертации в период
с 1945 по 1990 г.

За 45 лет, в период с 1945 по 1990 г., из стен аспирантуры вышло около 800 выпускников, из них почти половина (380 человек) защитили кандидатские диссертации. Это в значительной мере способствовало повышению научного уровня отраслевых предприятий, например, НИИ полимерных материалов (г. Пермь), АО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай» (г. Бийск) и др. Аспиранты в разные годы принимали участие в разработ-

ке элементов таких образцов вооружения, как: ЗПРК «Тунгуска», ЗРК «Бук», «Куб», «С-300», «С-400», ПЗРК «Игла», РСЗО «Град», «Смерч», РПГ-26 и многих других.

Целый ряд выпускников аспирантуры впоследствии стали именитыми учеными оборонно-промышленного комплекса, например, О.Т. Чижевский, доктор технических наук, профессор, академик РАН – возглавлял НПО «Прибор»; А.В. Воронов (выпуск 1951 г.) возглавлял отдел боевых частей, которые использовались практически во всех ракетах сухопутных войск, ПВО, ВВС и ВМФ; В.В. Мошев (выпуск 1958 г.) стал крупнейшим специалистом в области твердых топлив; И.И. Томашевич (выпуск 1968 г.)

Изображение: фотобанк ЛОРИ



Зенитно-ракетный комплекс «С-400»

являлся ведущим специалистом покумуляции; Н.К. Рогов (выпуск 1973 г.) был ведущим специалистом страны, лауреатом многочисленных премий за работы в области объемно-детонирующих систем, в последние годы был членом экзаменационных комиссий нашей аспирантуры.

Однако в годы социально-экономических катаклизмов наука и, в том числе, институт подготовки кадров высшей квалификации переживали кризис. Интерес к обучению в аспирантуре и защите диссертаций падал. С 1990 по 2000 г. выпустилось всего 10 человек. Аспирантура прекратила свое существование.

В 2005 г. ФГУП «ЦНИИХМ» было передано в ведомственное подчинение Федеральной службе по техническому и эк-



Изображение: фотобанк ЛОРИ

Зенитный противоракетный комплекс «Тунгуска»

Изображение: фотобанк ЛОРИ



Зенитно-ракетный комплекс «Бук»

В 2005 г. ФГУП «ЦНИИХМ» было передано в ведомственное подчинение Федеральной службе по техническому и экспортному контролю.

Также Кирилл Николаевич возглавлял Совет по защите докторских и кандидатских диссертаций. Трудно переоценить вклад К.Н. Шамшева в дело воспитания молодого поколения ученых.

Сегодня вопросы подготовки кадров высшей квалификации курирует советник генерального директора, доктор технических наук, профессор, академик РАН И.Н. Торгун. Он возглавляет Диссертационный совет, а также является председателем всех экзаменационных и аттестационных комиссий аспирантуры.

Федеральным законом ФЗ-273 от 28 декабря 2012 г. «Об образовании в Российской Федерации» аспирантура была отнесена к третьему уровню высшего образования. Был осуществлен комплексный переход с послевузовского образования на высшее. Однако научное сообщество страны находило изъяны в новой модели аспирантуры, например, отмечалась излишняя бюрократизация процесса обучения, увеличение учебного компонента в программе подготовки аспирантов, необходимость готовить педагогические кадры в НИИ, а также необходимость защиты диссертации.

Под давлением научной общественности и по решению Президента РФ В.В. Путина Министерством науки и высшего образования Российской Федерации были пересмотрены принципы подготовки кадров высшей квалификации. Сейчас аспирантура возвращается к лучшим традициям советской системы и обучение в ней уже на законодательном уровне должно заканчиваться защитой диссертации.

На сегодняшний день в ФГУП «ЦНИИХМ» обучаются 33 аспиранта. Молодые ученые решают научно-технические задачи в области



*Кирилл Николаевич Шамшев,
Герой Социалистического Труда,
член-корреспондент РАН, академик РАН,
доктор технических наук, профессор*



Иван Николаевич Торгун, доктор технических наук, профессор, академик РАН



Учебные занятия в аспирантуре ФГУП «ЦНИИХМ»

перспективных видов вооружения, военной и специальной техники, нового поколения микро- и нанотехнологий, робототехнических комплексов, беспилотных аппаратов и космических технологий.

Основным результатом обучения была и остается защита кандидатской диссертации. В ФГУП «ЦНИИХМ» для этого созданы все необходимые условия. Под руководством ведущих ученых в институте функционируют научные школы. Создана обширная экспериментальная и научно-производственная база с современным оборудованием.

За 15 лет существования аспирантуры выстроена и отлажена последовательная система подготовки молодых ученых:

ежегодно осуществляется прием абитуриентов из числа работников, наиболее способных к научной деятельности, как нашего НИИ, так и других оборонных предприятий;

организовано проведение учебных занятий для аспирантов на территории института, прием зачетов и кандидатских экзаменов осуществляется силами ведущих научных сотрудников предприятия и выездных экзаменационных комиссий из МГТУ им. Н.Э. Баумана;

с целью методической помощи аспирантам регулярно проводятся аттестации.

Штат аспирантуры укомплектован преподавателями из ведущих технических вузов Москвы.

На предприятии функционирует научно-техническая библиотека с доступом к отечественным и зарубежным научным электронным ресурсам, есть возможность запроса литературы в крупнейших научных библиотеках страны, оборудован интернет-класс, печатные работы аспиранты могут выполнить в типографии института.

Аспиранты имеют возможность публиковать материалы исследования в сборнике «Боеприпасы», а также в новом журнале «Перспективные технологии для систем безопасности». А «Труды ФГУП «ЦНИИХМ» и «Боеприпасы XXI век» входят в перечень, рекомендованный Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования России.

При ФГУП «ЦНИИХМ» действует специальный Диссертационный совет. За успешную защиту кандидатской диссертации предусмотрена премия по 100 000 рублей аспиранту и его научному руководителю. Реализуется преимущественное право назначения на вышестоящую должность после защиты диссертации.



Ученый секретарь кандидат технических наук О.Н. Козлова



Генеральный директор С.А. Бобков вручает выпускнику аспирантуры диплом кандидата наук

Многие выпускники аспирантуры ФГУП «ЦНИИХМ» занимают высокие должности в своих организациях, некоторые сами уже набирают учеников.

ФГУП «ЦНИИХМ» доктора технических наук, доцента, академика РАН С.А. Бобкова. Стремление аспирантов и совместные усилия руководства предприятия, научных руководителей и преподавателей аспирантуры дают стабильный рост кадров высшей квалификации.

В ФГУП «ЦНИИХМ», который работает на острие новейших достижений науки и техники, направленных на обеспечение обороноспособности страны, создаются новейшие образцы, разрабатываются новые технологии при выполнении НИОКР. Подготовка кадров высшей квалификации в аспирантуре является основой для повышения научного потенциала нашего института, как ГНЦ. Неслучайно институт перешагнул уровень подготовки кандидатов наук, и в ноябре 2023 г. в докторантуру предприятия зачислен первый докторант.

С 2008 по 2022 г. в аспирантуре проходили подготовку более 100 человек, в основном сотрудники ФГУП «ЦНИИХМ», ФГУП «Гостехстрой», ФКП «Завод имени Я.М. Свердлова», ФГУП «НИИПА», АО «НИМИ имени В.В. Бахирева», АО «КНИИМ». Успешно окончили аспирантуру 87 человек, из них с защитой диссертации – 45 аспирантов. В настоящее время многие из них занимают высокие должности в своих организациях, некоторые сами уже набирают учеников.

Многие годы аспирантура ФГУП «ЦНИИХМ» сотрудничает с ведущими учеными института, они принимают экзамены у аспирантов, оказывают помощь в подготовке диссертаций.

Безупречную организацию заседаний Диссертационного совета и последующее оформление аттестационных дел для передачи в ВАК обеспечивает ученый секретарь кандидат технических наук О.Н. Козлова.

Высокие результаты в подготовке кадров высшей квалификации достигнуты при активном участии, научно-методической помощи и благодаря авторитету в научных кругах ученого секретаря института доктора технических наук, профессора, члена-корреспондента РАН А.М. Аверченко, имеющего многолетний опыт члена экспертного совета ВАК России.

Отдельно хочется отметить всестороннюю поддержку в деле подготовки научных кадров генерального директора

АСПИРАНТУРА ФГУП «ЦНИИХМ»

осуществляет обучение по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров

6.2.1. «Вооружение и военная техника»

6.2.9. «Средства поражения и боеприпасы»

ФОРМА ОБУЧЕНИЯ: ОЧНАЯ – 3 года, ЗАОЧНАЯ – 4 года

Для штатных сотрудников обучение осуществляется за счет средств предприятия с обязательством отработки на предприятии в течение трех лет, для аспирантов сторонних организаций – на договорной основе.

Научный компонент программы включает:

- Научную деятельность, направленную на подготовку диссертации к защите
- Подготовку публикаций, в которых излагаются основные научные результаты диссертации и (или) заявок на патенты
- Промежуточные аттестации

Образовательный компонент включает примерный список дисциплин:

1. Иностранный язык;
2. История и философия науки;
3. Специальность;
4. Основы методологии научного исследования;
5. Методика подготовки диссертации;
6. Основы профессиональной риторики;
7. Научно-исследовательская практика.



Обучение в аспирантуре ФГУП «ЦНИИХМ» осуществляется в соответствии с Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров (приказ Министерства науки и высшего образования от 20.10.2021 № 951).

КОНТАКТЫ:

115487, Москва, ул. Нагатинская, д. 16А

E-mail: aspirant@cniihm.ru

Телефоны: 8 (499) 611-89-84 (внутр. 18-984)

8 (499) 611-60-64 (внутр. 16-064)

У ИСТОКОВ КЛИМАТИЧЕСКОГО ОРУЖИЯ

А.Х. АДЖИЕВ, д.ф.-м.н., проф.,
ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»

Автор делится своими воспоминаниями о совместной работе с выдающимся советским и российским ученым-физиком, Героем Социалистического Труда Кириллом Шамшевым над созданием уникальных методов и средств воздействия на гидрометеорологические явления и процессы на основе объемно-детонирующих составов. Приводятся ранее не публиковавшиеся факты о деятельности Шамшева на Кавказе.

Исследования атмосферных процессов и явлений, направленных на повышение эффективности использования вооружения и военной техники, особенно интенсивно начали развиваться во второй половине прошлого столетия. Наибольшее развитие эти работы в тот период получили в США. В арсенале средств «холодной войны» появился новый термин «метеорологическая война». Так, еще в 1953 г. в Бюллетене американского метеорологического общества было опубликовано выступление некоего Гугеснгейма о возможности искусственно создать засуху на территории СССР,

используя его географическое положение, или, наоборот, залить дождями, не рискуя получить в ответ что-либо подобное.

К концу 1960-х гг. появились новые, более совершенные методы, реагенты и технические средства воздействия на процессы развития облаков, особенно тропических, и вызывания из них ливневых осадков. Соединенные Штаты незамедлительно использовали эту возможность для применения во время войны во Вьетнаме в семидесятые годы.

В нашей стране также в 1960–1980-е гг. интенсивно развивались исследования по активным воздействиям на гидрометеорологические и другие геофизические процессы. Сложность и многогранность рассматриваемых процессов требовала привлечения больших и разноплановых научных сил. В СССР эти исследования проводились, главным образом, НИИ Госкомгидромета (в настоящее время Росгидромет), где, в свою очередь, привлекали необходимых специалистов из других министерств и ведомств. Среди них был и Высокогорный геофизический институт (ВГИ).

ВГИ выполнял работы в интересах НТК ВВС, и в целом заказчик был доволен ходом работ и планировал их расширить. В один из моих приездов в Москву на сдачу этапа очередной работы Сергей Григоров – в то время молодой сотрудник НТК ВВС, капитан, а впоследствии – российский военный и государственный деятель, ученый, генерал-полковник, Герой Российской Федерации – предложил поехать с ним в Центральный научно-исследовательский институт химии и механики (ЦНИИХМ) к Кириллу Николаевичу Шамшеву и рассказать о возможностях института в области геофизики.

Григоров предупредил, что Шамшев является ученым-физиком, специалистом в области специального машиностроения, физики горения, взрыва, заместителем генерального директора по научной работе ЦНИИХМ.

«И главное, – пояснил мой товарищ, – от его (К.Н. Шамшева) интереса к возможностям ВГИ будут зависеть перспективы сотрудничества с Министерством обороны».

К концу 1960-х гг. появились новые, более совершенные методы, реагенты и технические средства воздействия на процессы развития облаков и вызывания ливневых осадков.





Рис. 1. Два друга, Герои Социалистического Труда: член-корреспондент РАН К.Н. Шамшев (справа) и академик М.Ч. Залиханов (слева) в Госдуме РФ после обсуждения вопросов, связанных с созданием новых образцов боеприпасов (фото из книги «Россия академика М.Ч. Залиханова»)

Мне дали время на подготовку доклада (пока оформляли пропуск). К счастью, прошло больше часа. За это время я набросал кое-какие мысли. После тщательной проверки документов, меня, наконец, пропустили в святая святых. Так, весной 1982 г. я впервые оказался на самом закрытом этаже в здании ЦНИИХМ, в кабинете Кирилла Николаевича. Там присутствовала группа специалистов, среди которых были тогда такие же молодые, как и я, «зеленые» кандидаты наук в своих областях – Николай Рогов, Игорь Кулаков, Вадим Воронцов и др. Кирилл Николаевич после моего доклада, дав каждому высказаться, подытожил выступления, поражая своим научным предвидением: «ЦНИИХМ совместно с ВГИ разработают уникальные методы и средства воздействия на гидрометеорологические явления и процессы на основе объемно детонирующих составов для решения специальных

задач». Им были предложены и сформулированы по тем временам революционные проекты НИР, на стыке гидрометеорологии и физики горения (взрыва).

Его предложение создать совместную (ЦНИИХМ и ВГИ) рабочую группу для реализации озвученных проектов поддержал Михаил Чоккаевич Залиханов, тогда директор ВГИ, член корреспондент РАН. Впоследствии Залиханов и Шамшев стали друзьями и долгое время поддерживали самые теплые отношения (рис. 1).



Рис. 2. Снимок на память у шахского дворца в Кабуле. На бронетранспортере руководитель научной группы ученых ВВС СССР член-корреспондент АН СССР М.Ч. Залиханов и его заместитель доктор технических наук К.Н. Шамшев (фото из книги «Россия академика М.Ч. Залиханова»)

Руководителями направлений от ВГИ тогда стали Владислав Болов, Хажбара Калов, Азрет Беккиев и я. От ЦНИИХМ – Игорь Кулаков, Николай Рогов, Александр Прищепенко.

Для проведения опытных и производственных работ были созданы уникальная материально-техническая база и специализированные подразделения в ВГИ и ЦНИИХМ. Результаты исследовательских, опытно-конструкторских и производственных работ, проведенные за 15 лет, до сих пор считаются уникальными.

В этот период под руководством Шамшева и при непосредственном его участии были разработаны не имеющие мировых аналогов боевые части ракет для комплексов Сухопутных войск, ВВС

и ВМФ, включая средства ПВО, создано новое поколение кумулятивных боевых частей, авиационно-бомбовых средств поражения и минного оружия. Некоторые разработки были использованы и в Афганистане (рис. 2).

Много раз Шамшев приезжал на Кавказ, в ВГИ, на испытания и для решения технических и научных вопросов (рис. 3, 4). Он сумел привлечь ряд ведущих институтов страны к работам в ВГИ. Учитывая их важность в интересах народного хозяйства и обороны страны, была создана Межведомственная комиссия во главе с Председателем Госкомгидромета СССР академиком Ю.А. Израэлем.

Учитывая особую важность и актуальность этих работ, требовалось постоянное внимание и поддержка как со стороны Гидрометеослужбы, так и Министерства машиностроения СССР. И это позволило реализовать крупные разработки для активных воздействий на гидрометеорологические процессы (туманы, грозы, снежные лавины и др.).

Кирилл Николаевич Шамшев запомнился мне как высоко эрудированный ученый и глубоко добропорядочный человек. Вспоминается такой случай. В один из его приездов в ВГИ у меня возникла проблема с подачей заявки на изобретение по вызыванию молнии с помощью плазменного образования. Заявка не была поддержана специальной комиссией ВГИ. Узнав об этом, Шамшев захотел ознакомиться с ней. Мне казалось, что он далек от электродинамических процессов в облаках и без особого оптимизма показал ему заявку. На удивление Кирилл Николаевич согласился с моими расчетами и предложил директору ВГИ Михаилу Чоккаевичу Залиханову отправить заявку в комитет по изобретениям под его (Шамшева) личную ответственность. Вскоре я получил патент.

Благодаря сотрудничеству двух выдающихся личностей – Залиханова и Шамшева – получили развитие несколько направлений в рамках объединенной научной школы двух институтов по использованию объемно-детонирующих составов при решении некоторых геофизических задач. В частности, был наработан обширный материал по созданию: зон просветления в облаках с целью оптимизации работы оптико-электронных систем наведения и



Рис. 3. К.Н. Шамшев во время испытаний на одном из полигонов ВГИ (1985)



Рис. 4. После успешных испытаний осенью 1987 г. и подписания протокола представителем Министерства машиностроения Л.И. Чебоненко. На фото (слева направо): А.Х. Аджиев, В.Р. Болов, М.Ч. Залиханов, Л.И. Чебоненко, К.Н. Шамшев, Н.К. Rogov

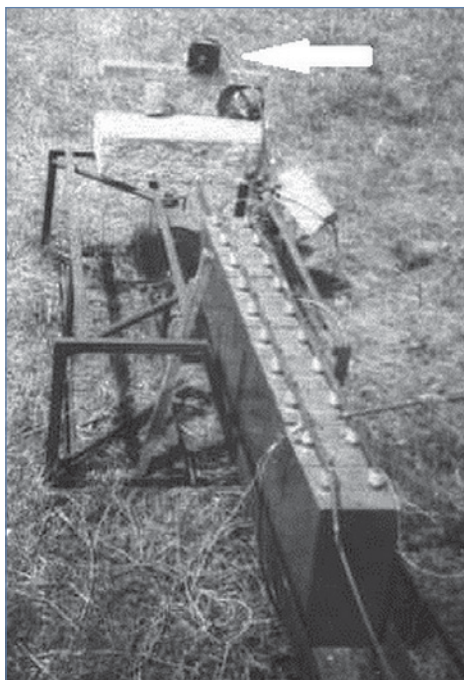


Рис. 5. Макет ГРЧЭМИ (обозначен стрелкой), подключенный к батарее высоковольтных конденсаторов



Рис. 6. Ударно-волновая ГРЧЭМИ с автономной системой энергообеспечения. Слева – головная часть метеорологической ракеты

поражения; боеприпасов по снежным лавинам; искусственных неоднородностей в атмосфере.

По каждому из этих направлений были получены уникальные результаты и их руководители (И. Кулаков, В. Болов, Х. Калов, А. Беккиев, А. Аджиев, Н. Рогов, А. Прищепенко и др.) достойно защитили докторские диссертации. Научным консультантом в ряде работ выступал К.Н. Шамшев.

Одним из направлений стало изучение электричества приземной атмосферы. В 1981–1984 гг. были заложены теоретические основы нового класса генераторов радиочастотного электромагнитного излучения (ГРЧЭМИ), в которых происходило прямое, без применения сильноточной электроники, преобразование химической энергии, содержащейся во взрывчатом веществе, в энергию электромагнитного излучения. В ходе натурных испытаний макетов ГРЧЭМИ была подтверждена их работоспособность. Заместитель директора Центрального НИИ химии и механики К.Н. Шамшев считал необходимым интенсифицировать разработку ГРЧЭМИ в интересах обороны страны.

Используя тесное научное сотрудничество с коллегами из ВГИ, он договорился о создании экспериментальной базы на полигоне института «Кызбурун-3», близ г. Баксан. Первые опыты с макетами ГРЧЭМИ были проведены там летом 1985 г. Несмотря на тогда недостаточное оснащение полигона средствами измерений, полученными результатами была подтверждена перспективность применения ГРЧЭМИ для решения широкого круга оборонных задач. В то же время на пути создания на основе ГРЧЭМИ готовых к боевому применению изделий было несколько препятствий. Основным требованием являлось обеспечение автономности устройств, их независимость от внешних источников энергии.

В макетах ГРЧЭМИ формирование «затравочного» тока, необходимого для запуска процесса преобразования, происходило при помощи батареи высоковольтных конденсаторов, размеры которой значительно превосходили размеры источника (рис. 5).

Задача реализации автономного энергообеспечения ГРЧЭМИ была весьма сложной, и К.Н. Шамшев предложил подключить к ее решению ученых из ВНИИ экспериментальной физики, оказав содействие в оформлении необходимых разрешений. По резуль-

татам совместных работ, весной 1988 г. был подписан «Приказ двух министров» (среднего машиностроения и машиностроения), позволивший существенно интенсифицировать исследования и создать систему автономного энергообеспечения ГРЧЭМИ, в которой первичная энергия генерировалась при ударе метаемой взрывом оболочки по сборке неодим-железоборных магнитов (рис. 6).

Ухудшение в начале 1990-х гг. ситуации с финансированием оборонных исследований грозило приостановкой работ, и К.Н. Шамшевым с М.Ч. Залихановым было принято единственно верное решение: получить финансирование при выполнении работ с иностранными заказчиками, предлагая конверсионные варианты применения ГРЧЭМИ, в частности – для провоцирования молниевых разрядов в грозовых облаках. Соответствующие разрешения от контролирующих органов были оформлены и в ходе натурных пусков метеорокетов на полигоне «Кызбурун-3» получены положительные результаты (рис. 7).

На полигон прибыла делегация ученых из США. Совместные работы освещались в прессе Кабардино-Балкарии (рис. 8).

Конверсионные работы проходили весьма успешно, и, получив информацию о них, совместную делегацию ученых принял председатель правительства Кабардино-Балкарии Х.Д. Чеченов.

Продолжались работы и по оборонной тематике, о ходе которых было доложено первому вице-премьеру Правительства России О.И. Лобову (рис. 9). В совещании принял участие К.Н. Шамшев.

К.Н. Шамшевым было предложено применение для разработанных ГРЧЭМИ малого калибра: в 40-мм гранате, предназначенной для преодоления активной защиты танков. Такой гранатой предполагалось комплектовать ручной противотанковый гранатомет – «двустволку» (рис. 10).



Рис. 7. Зарядка метеорологической ракеты с головной частью на основе ГРЧЭМИ для пуска по грозовому облаку

В 1981–1984 гг. были заложены теоретические основы нового класса генераторов радиочастотного электромагнитного излучения.

ИССЛЕДОВАНИЯ БУДУТ ПРОДОЛЖЕНЫ

Предложение американских ученых о сотрудничестве было более чем неожиданным для их коллег из Высокогорного геофизического института. Оказалось, что американцев заинтересовали публикации кабардино-балкарских ученых в научных журналах, и они разыскали их. Мы попросили доктора физико-математических наук, профессора, академика Петровской Академии наук, заведующего отделом ВГИ Анатолия АДЖИЕВА рассказать о недавней поездке их заокеанских коллег в Кабардино-Балкарию.

— В течение трех недель группа ученых из Америки и Австралии находилась в г. Нальчике. Эту поездку они совершили в рамках реализации контракта, заключенного в феврале нынешнего года между Высокогорным геофизическим институтом и американской фирмой «Сайентифик Ютилитаеши Корпорейшна». Делегацию наших гостей возглавлял известный исследователь в области физики плазмы из Атланты Ларри Альтгильберс. Ученые ВГИ представляли академика Михаила Залиханов — научный руководитель проекта, его заместитель, доктор технических наук Александр Прищепенко, ваш покорный слуга — ответственный исполнитель проекта и другие специалисты института.

Работы ученых ВГИ в сфере управления электрическим состоянием атмосферы и облаков, которые имеют большое значение для ряда отраслей народного хозяйства, в частности, авиации, энергетики, телекоммуникации, хорошо известны не только в Российской Федерации. Свидетельством тому — интерес американской стороны, пожелавшей финансировать эти исследования.

Гости привезли с собой уникальную измерительную аппаратуру, чтобы про-

верить потенциальные возможности методов и средств, разработанных нами. Отрадно отметить, что итог нынешней встречи весьма обнадеживает: разработаны все намеченные позиции. Наши исследования получили высокую оценку. Укрепилось желание сторон их продолжить. Кроме того, зарубежные ученые убедились в том, что вопреки слухам и публикациям в средствах массовой информации, в республике царит мирная, созидательная атмосфера. Их уверенность укрепилась еще больше после того, как руководителем делегации принял Премьер-министр республики, Хусейн Джабраилович Чеченов обещал оказать содействие в реализации проекта.

Восторженными были их впечатления от поездки в Приэльбрусье и на Чеченские водопады, которые они признали уникальными уголками природы.

Это первый реальный контракт, заключенный нами с зарубежным партнером, который уже дал финансовый результат. В наших планах — посещение Института стратегических исследований в штате Алабама, обмен специалистами, продолжение совместных исследований. Недавно по факсу пришло сообщение из Германии. Желание подключиться к проекту выразили и немецкие ученые. При этом они также обещают не остаться в стороне от финансирования.

Время для института сейчас очень тяжелое. И хотя контракт с американцами не решит всех проблем ВГИ, для нас он — своеобразная первая ласточка. Хочется верить, что она не будет последней, и нам удастся выгнать Высокогорный из кризиса, вдохнуть в него новую жизнь, сохранить специалистов, многие из которых отдали институту лучшие годы жизни...

С. БЕРДОВА

Рис. 8. Статья в газете «Кабардино-Балкарская правда» от 27 июня 1997 г.

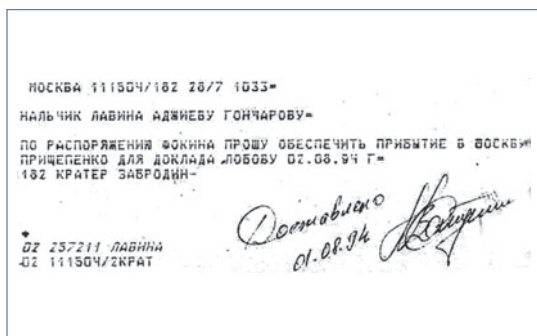


Рис. 9. Телеграмма с вызовом на совещание в правительство РФ



Рис. 10. Макет ручного противотанкового гранатомета со вспомогательной гранатой на основе ГРЧЭМИ

Испытания боевой стрельбой «двустволки» прошли успешно. Благожелательное отношение К.Н. Шамшева к работам по тематике ГРЧЭМИ позволило продолжать их и позже, после передачи в ВГИ, по распоряжению заказчика.

Правительством СССР была дана высокая оценка результатов применения в народном хозяйстве и для обороны страны разработанных методов и средств.

М.Ч. Залиханов, К.Н. Шамшев и начальник Научно-технического управления инженерных войск Минобороны генерал-майор В.В. Келпш были удостоены звания Героя Социалистического Труда.

Шестнадцать сотрудников ВГИ получили государственные награды. Среди них был и автор этих строк. Пятеро стали Лауреатами Государственных премий СССР и КБР, руководители направлений В. Болов (впоследствии директор НИИ «Антистихия» МЧС России), М. Беккиев (впоследствии гендиректор НПО «Созвездие»), И. Кулаков и др. Несомненно, большая заслуга в этих достижениях принадлежит К.Н. Шамшеву.

Однако, как пишет Михаил Чоккаевич в своей книге «Россия академика М.Ч. Залиханова», в 1990-е гг. наша страна вступила в полосу потрясений, поэтому о перспективных и очень важных разработках для обороноспособности государства на долгое время пришлось забыть...

Об авторе

Анатолий Хабасович АДЖИЕВ (27.11.1946 г.) – доктор физико-математических наук, профессор, родился в с. Этоко Зольского района Кабардино-Балкарской Республики. В 1970 г. окончил Кабардино-Балкарский университет. Прошел путь от аспиранта до заведующего отделом стихийных явлений ФГБУ «Высокогорный геофизический институт». Один из ведущих ученых в области исследования грозовых процессов и снежных лавин. Автор более 250 научных работ, включая 11 монографий и 41 изобретение.

Заслуженный метеоролог РФ, академик Петровской академии наук и искусств, академик международной Адыгской (Черкесской) академии наук, лауреат Государственной премии Кабардино-Балкарской Республики в области науки и техники Национальной экологической премии «ЭкоМир». Награжден орденом Дружбы народов, орденом Почета, тремя медалями ВДНХ, Грамотой Президента РФ за успешное выполнение работ в рамках подготовки и проведения XXII Олимпийских зимних игр и XI Паралимпийских зимних игр 2014 г., Почетной грамотой Президиума Верховного Совета КБР, Почетной грамотой Росгидромета, ему присвоено звание «Почетный работник Гидрометеослужбы».

