

Лабораторный комплекс для испытания на стойкость к линейным и угловым перегрузкам элементной базы и изделий электроники

© В.А. Токарев², Е.Е. Шестаков², В.А. Брагунец², В.А. Борисенко¹,
Д.И. Баклашов², С.С. Крюченков², В.Г. Симаков²

¹Саровский физико-технический институт — филиал Национального
исследовательского ядерного университета «МИФИ»,

Саров, Нижегородская обл., 607186, Российская Федерация

²Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский

научно-исследовательский институт экспериментальной физики

(РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров, Нижегородская обл., 607188, Российская Федерация

Приведено описание лабораторного комплекса на основе легкогазовой пушки (рабочий газ — гелий) калибром 40 мм для проведения испытаний элементной базы и отдельных модулей электронных взрывательных устройств в условиях, приближенных к реальному артиллерийскому выстрелу. Комплекс формирует импульс линейного ускорения снаряда-контейнера с исследуемыми объектами с амплитудой до 70 000g и полушириной $\geq 0,6$ мс, а также обеспечивает синхронное вращение снаряда со скоростью не менее 75 об/с. Представлены результаты экспериментов по активации ампульных источников тока марок СДС-1М и СДС-3 разработки НИИХИТ-2; испытания проведены при следующих параметрах воздействия: линейное ускорение с максимальной амплитудой 22 000g, полушириной ~ 1 мс; угловое ускорение $\sim 3 \cdot 10^5$ рад/с².

Ключевые слова: электронные взрывательные устройства, перегрузки, лабораторный комплекс

Введение. Один из основных факторов, определяющих эффективность боеприпаса, — эффективность работы взрывательного устройства (ВУ), которое входит в состав всех артиллерийских, минометных, гранатометных и реактивных снарядов. Взрывательные устройства могут быть построены на разных принципах, но в последнее время наибольший приоритет получило развитие электронных ВУ. Созданные на новейшей элементной базе микроэлектроники с использованием современных химических источников электрического питания, такие ВУ могут существенно улучшить тактико-технические характеристики боеприпаса [1, 2]. К настоящему времени за рубежом разработаны и уже производятся электронные ВУ, позволяющие совмещать в одной конструкции контактное, неконтактное и дистанционное действие, а также корректировать траекторию полета снаряда. Многофункциональные электронные ВУ там интенсивно разрабатывают с начала 1990-х годов, а в России — с 2000-х годов. При разработке электронных ВУ, кроме прочего, необходимы данные

по стойкости элементной базы и электронных узлов ВУ к перегрузкам. С целью участия в решении этой задачи в СарФТИ НИЯУ МИФИ совместно с РФЯЦ-ВНИИЭФ разработан, изготовлен и введен в эксплуатацию лабораторный комплекс для испытаний электронных устройств на стойкость к перегрузкам на основе баллистической трубы (легкогазовой пушки) калибром 40 мм [3–6]. Импульсы линейных перегрузок в широком диапазоне амплитуд и длительностей формируется за счет торможения снаряда — контейнера с исследуемыми объектами о крешер специальной конструкции. Достигнутые максимальные параметры импульса: пиковая перегрузка ~70 000g, полуширина ~0,6 мс. Параметры импульса перегрузок определяются подлетной скоростью снаряда-контейнера, его массой и конструкцией крешера [3–6].

Комплекс оснащен методиками для измерения скорости снаряда (радиоинтерферометром, лазерным измерителем) и методиками тестирования режимов работы объекта в динамическом режиме. В качестве последних используются проводная методика (одноканальная система) и энергонезависимый ударопрочный FLASH-носитель информации, размещаемый в снаряде-контейнере. Вместе с постопытным тестированием работоспособности применяемые методики позволяют получать всю требуемую информацию об объекте исследования в динамическом режиме [7].

При артиллерийском выстреле снаряд вращается, следовательно, ВУ испытывает наряду с линейными и угловые перегрузки. Кроме того, вращение снаряда используется для активирования источника электрического тока (ИТ) и предварительно-взводящего механизма (ПВМ), входящих в состав ВУ.

Для создания условий испытаний, приближенных к реальному артиллерийскому выстрелу, лабораторный комплекс был модернизирован путем введения в его состав устройства для вращения крешера с блоком автоматического управления.

Цель настоящей работы — описание модернизированного лабораторного комплекса и представление результатов проведенных на нем экспериментов по активации ампульных источников тока российского производства. Следует отметить, что в России такие эксперименты проведены впервые.

Описание комплекса. В состав модернизированного комплекса входят:

- стенд для формирования перегрузок, включающий легкогазовую пушку калибром 40 мм (рабочий газ — гелий), крешер, устройство для вращения крешера и снаряд-контейнер объемом $\varnothing 36 \times 50$ мм для размещения исследуемых объектов;
- лазерный измеритель скорости снаряда;

- радиointерферометр;
- осциллографический комплекс.

Описание всех функциональных составляющих комплекса, за исключением устройства для вращения крешера, приведено в [3, 4].

Функциональное назначение устройства для вращения заключается в следующем. До старта снаряда-контейнера крешер должен быть раскручен до заданного числа оборотов. Взаимодействие снаряда с вращающимся крешером приводит к его торможению в направлении движения (линейные перегрузки) и вращению вместе с крешером (угловые перегрузки). Управление процессом осуществляет система автоматического управления (САУ).

В устройстве крешер закреплен в подшипниках, с одной из сторон на нем установлен шкив. Фото такого сборочного модуля приведено на рис. 1. Модуль крешера вместе с двигателем и ременной передачей размещен в стальном корпусе (рис. 2). Используется синхронный (коллекторный) двигатель переменного тока типа ДК 10-1000. Максимальная мощность двигателя 1 кВт, максимальное число оборотов на холостом ходу 500 об/с.

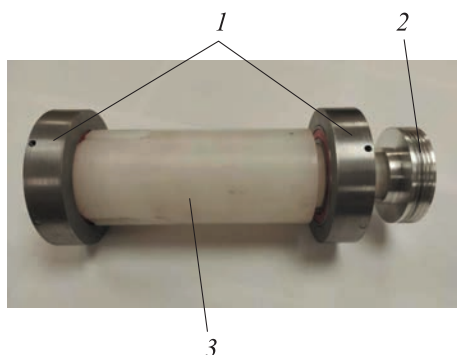


Рис. 1. Сборочный модуль:
1 — подшипники; 2 — шкив; 3 — крешер



Рис. 2. Устройство для вращения крешера

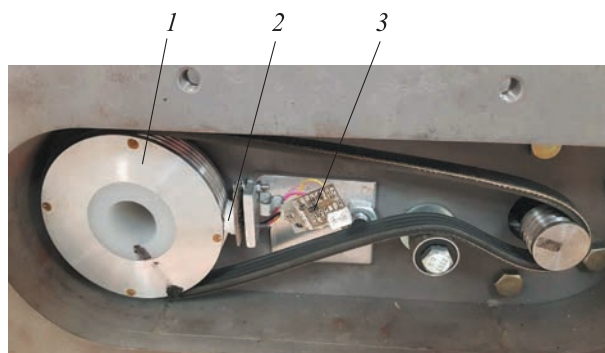


Рис. 3. Система измерения скорости:
1 — магнит; 2 — датчик Холла; 3 — электрическая схема

Скорость вращения крешера измеряется системой, состоящей из четырех неодимовых магнитов размерами $\varnothing 2 \times 2$ мм и датчика Холла. Система измерения скорости представлена на рис. 3, типичная осциллограмма сигналов с датчика Холла — на рис. 4.

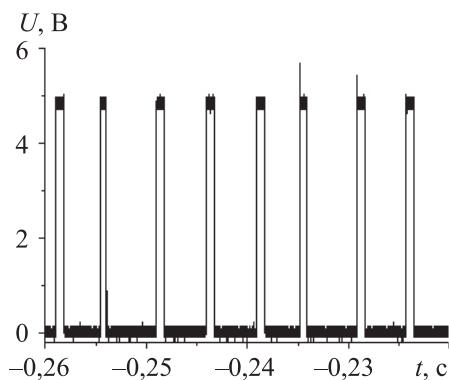


Рис. 4. Осциллограмма сигналов с датчика Холла

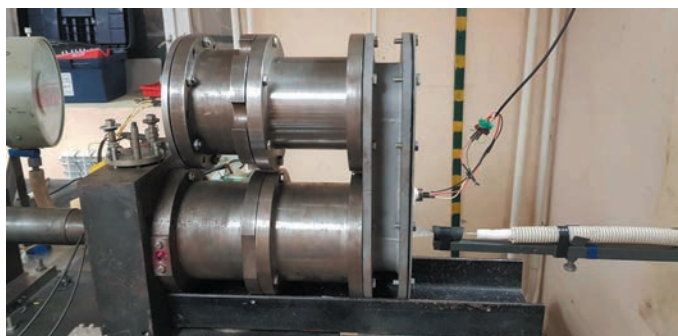


Рис. 5. Смонтированный механизм вращения крешера на стенде

Смонтированное на стенде устройство вращения приведено на рис. 5. Для синхронизации работы всех устройств комплекса при проведении эксперимента разработана САУ, алгоритм ее работы приведен далее. В момент запуска САУ выдает команду на включение электродвигателя устройства вращения крешера. После того как скорость его вращения достигнет ~ 50 об/с, формируется команда на разрушение мембраны, разделяющей камеру высокого давления и ствол легкогазовой пушки. Вследствие этого происходит старт снаряда-контейнера. В момент его старта включается FLASH-носитель (регистратор) информации, и через ~ 1 с после старта выдается команда на выключение двигателя.

Эксперименты с ампульными источниками тока. От обычных гальванических элементов и аккумуляторов ампульные источники тока (АИТ) отличаются тем, что в нерабочем состоянии электролит

хранится отдельно от электродов в герметичном сосуде-ампуле и подается к электродам непосредственно перед использованием.

Проведены эксперименты с АИТ двух типов — СДС-3 и СДС-1М, разработанными в АО НИИХИТ-2 [8]. Эти источники предназначены для применения в электронных ВУ артиллерийских снарядов. Электролит в них хранится в стеклянной ампуле. При выстреле по достижении пороговой линейной перегрузки ампула разрушается и электролит под действием центробежной силы вращения снаряда попадает в межэлектронные промежутки. В результате электрохимического взаимодействия электродов и электролита вырабатывается электрический ток. По данным разработчика, рабочий диапазон перегрузок для СДС-3 составляет 1100...25 000g, для СДС-1М — 5000...34 000g, рабочее напряжение 13,5...22 В (СДС-3) и 9...14 В (СДС-1М).

Результаты эксперимента с АИТ СДМ-1М ниже приведены. Масса снаряженного снаряда-контейнера составила 126 г, в камере высокого давления пушки было установлено давление 20 атм. Временные зависимости скорости снаряда $v(t)$ на финишном отрезке траектории, линейного ускорения $a(t)$ при торможении снаряда, числа оборотов крешера $n(t)$ и напряжения на АИТ $U(t)$ показаны на рис. 6.

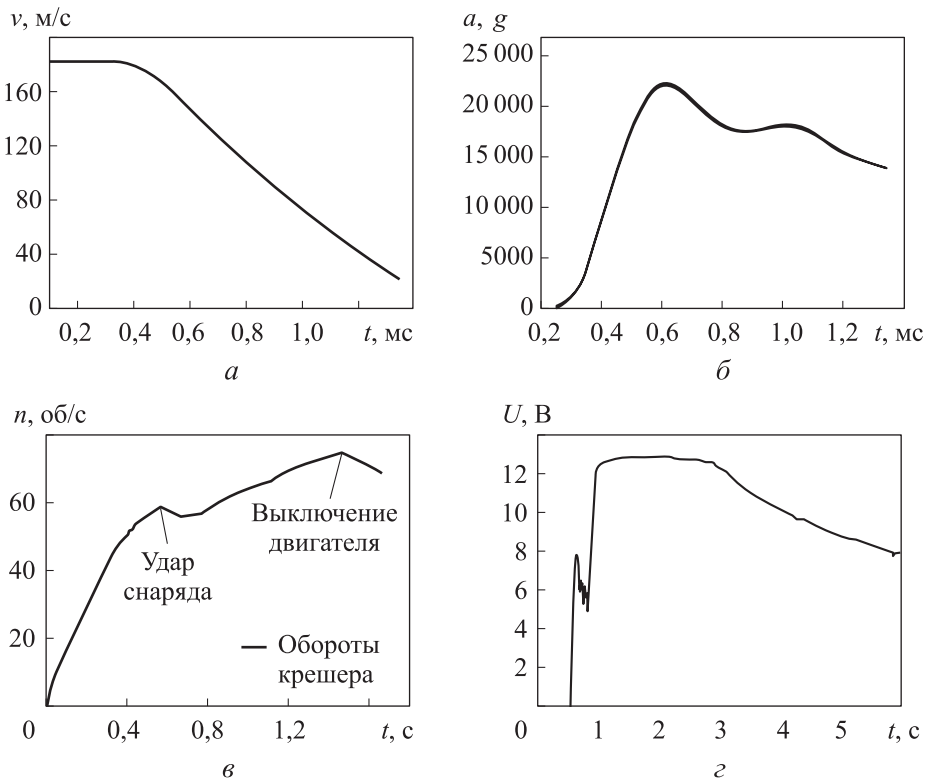


Рис. 6. Зависимости от времени скорости (а) и линейного ускорения (б) снаряда, числа оборотов крешера n (в) и напряжения с СДС-1М (г)

Зависимости $v(t)$ и $a(t)$ определены по результатам измерения сигналов радиointерферометром, $n(t)$ — датчиком Холла, $U(t)$ измерено FLASH-регистратором, который после проведения опыта был извлечен из снаряда вместе с АИТ посредством демонтажа крешера и снаряда. Фото снаряда в демонтированном крешере дано на рис. 7, фото АИТ до и после опыта — на рис. 8.



Рис. 7. Внешний вид постопытного снаряда



СДС-3

СД1-М

Рис. 8. Внешний вид ампульных источников тока типов СДС-3 и СДС-1М

Анализ приведенных результатов показал следующее. Подлетная скорость снаряда составила 182 м/с (см. рис. 6, *а*). Независимое измерение скорости с помощью лазерной методики [7] дало 180 м/с. Максимальное ускорение снаряда (пиковая линейная перегрузка) составила величину 22 000g, полуширина импульса перегрузок — 1 мс (см. рис. 6, *б*). Внедрение снаряда в крешер началось при скорости вращения 57 об/с, максимальная угловая скорость вращения достигла 75 об/с, после взаимодействия снаряда с крешером скорость набора оборотов уменьшилась (см. рис. 6, *в*). Величина угловой перегрузки достигала $\sim 3 \cdot 10^5$ рад/с². Практически одновременно с началом внедрения на АИТ зарегистрировано напряжение. Рабочий режим на АИТ

при напряжении 12,3 В установился через 0,45 с после начала внедрения снаряда при частоте вращения крешера 65 об/с. Следует отметить, что по данным разработчиков [8], время активации АИТ СДС-1М должно составлять не более 0,1 с. Объяснение такому расхождению и «двухступенчатому» профилю $U(t)$ (см. рис. 6, з) пока не найдено.

В опыте АИТ СДС-3 активирован на комплексе при аналогичном воздействии. Напряжение составило 16 В, что согласуется с данными разработчиков [8].

Постопытный осмотр АИТ типов СДС-3 и СДС-1М показал, что во время опыта источники не подверглись деформации.

Таким образом, результаты экспериментов с АИТ свидетельствуют, что лабораторный комплекс СарФТИ формирует как линейную, так и угловую перегрузку с параметрами, достаточными для испытаний элементной базы и узлов электронных ВУ, а также исследований работоспособности АИТ и ПВМ.

Заключение. Модернизированный лабораторный комплекс, разработанный СарФТИ на основе легкогазовой пушки калибром 40 мм (рабочий газ — гелий), формирует импульс линейного ускорения снаряда-контейнера с исследуемыми объектами, имеющий амплитуду до 70 000g и полуширину $\geq 0,6$ мс, а также обеспечивает синхронное вращение снаряда со скоростью до 75 об/с. Соответствующее угловое ускорение составляет $\sim 3 \cdot 10^5$ рад/с². Комплекс позволяет проводить испытания элементной базы и изделий электроники на стойкость к перегрузкам, а также исследовать работоспособность ампульных источников тока и предварительно взводящих механизмов. Эффективность комплекса подтверждена результатами экспериментов по активации ампульных источников тока типов СДС-1М и СДС-3.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Меркулова И.И., Козлов В.И. Тенденции и перспективы развития взрывательных устройств боеприпасов. *Инженерный вестник*, 2014, № 10, с. 633–640.
- [2] Коленкин А.В., Гогин В.В., Стецкевич А.Д. Состояние и направление работ многофункциональных взрывательных устройств за рубежом. *Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы*, 2016, вып. 2, с. 1–16.
- [3] Евланов К.И., Токарев В.А., Борисенок В.А., Брагунец В.А., Баклашов Д.И., Симаков В.Г. Стенд для испытаний на стойкость к перегрузкам. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-5-1875>
- [4] Токарев В.А., Борисенок В.А., Евланов К.И. и др. Лабораторный комплекс для испытания элементов электроники на стойкость к перегрузкам. *Вопросы оборонной техники*, 2019, № 135–136, с. 96–104.
- [5] Токарев В.А., Борисенок В.А., Евланов К.И. и др. Лабораторный комплекс для испытания элементов электроники на стойкость к перегрузкам. *Сб. докладов Междунар. конф. «XXI Харитоновские тематические научные чтения»*. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2019, т. 2, с. 241–249.

- [6] Евланов К.И., Токарев В.А., Борисенко В.А., и др. Стенд для испытаний элементов электроники на стойкость к перегрузкам. Методики испытаний. *Сб. докладов XXVIII Всерос. науч.-техн. конф. «Передача, прием, обработка и отображение информации о быстропотекающих процессах»*. Сочи, 2017, с. 175–182.
- [7] Токарев В.А., Борисенко В.А., Евланов К.И., Брагунец В.А. и др. Лабораторный комплекс для испытания элементов электроники на стойкость к перегрузкам. Методики испытаний. *Сб. докладов XXX Всерос. науч.-техн. конф. «Передача, прием, обработка и отображение информации о быстропотекающих процессах»*. Сочи, 2019, с. 695–714.
- [8] *Акционерное общество НИИХИТ*. Сайт. URL: Niihit.ru

Статья поступила в редакцию 19.03.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Токарев В.А., Шестаков Е.Е., Брагунец В.А., Борисенко В.А., Баклашов Д.И., Крюченков С.С., Симаков В.Г. Лабораторный комплекс для испытания на стойкость к линейным и угловым перегрузкам элементной базы и изделий электроники. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 5.

Токарев Владимир Анатольевич — д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ; автор более 30 научных работ в области лазерной и радиационной физики. e-mail: tokarev.vl@mail.ru

Шестаков Евгений Евгеньевич — научный сотрудник ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ; автор трех научных работ в области физики ударных волн. e-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

Брагунец Вячеслав Алексеевич — ведущий инженер ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ; автор более 20 научных работ в области ударных волн, динамической прочности материалов. e-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

Борисенко Валерий Аркадьевич — д-р физ.-мат. наук, заместитель руководителя СарФТИ НИЯУ МИФИ; автор более 60 научных работ в области ударных волн, динамической прочности материалов и радиационной физике. e-mail: vaborisenok@mephi.ru

Баклашов Дмитрий Иванович — ведущий инженер-исследователь ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ. e-mail: Baklashov@inbox.ru

Крюченков Сергей Степанович — ведущий инженер-исследователь ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ. e-mail: Kryuchenkov@mail.ru

Симаков Владимир Геннадиевич — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ; автор более 20 научных работ в области ударных волн, динамической прочности материалов. e-mail: vgsimakov@hotmail.com

Laboratory complex to test the element base and electronic products resistance to linear and angular overloads

© V.A. Tokarev², E.E. Shestakov², V.A. Bragunets², V.A. Borisenok²,
D.I. Baklashov², S.S. Kryuchenkov², V.G. Simakov²

¹Sarov State Physics and Technical Institute, Branch of the National Research Nuclear University MEPhI, Sarov, Nizhny Novgorod region, 607186, Russian Federation

²Russian Federal Nuclear Center, All-Russian Research Institute of Experimental Physics (RFNC-VNIIEF), Sarov, Nizhny Novgorod region, 607188, Russian Federation

The paper describes a laboratory system based on the 40-mm light gas gun (working gas is helium) to test the element base and separate modules of the explosive devices under conditions close to a real gunshot. The system generates a linear acceleration pulse of the container projectile with the objects under study at amplitude of up to 70,000 g and a half-width of ≥ 0.6 ms, and additionally it ensures synchronous rotation of the projectile at a speed of at least 75 rps. Experiment results are presented on activation of the SDS-1M and SDS-3 ampoule current sources developed by the NIIKhIT-2. The experiments were carried out under the following impact parameters: linear acceleration maximum amplitude 22,000 g, half-width ~ 1 ms, angular acceleration $\sim 3 \cdot 10^5$ rad/s².

Keywords: *electronic explosive devices, overloads, laboratory system*

REFERENCES

- [1] Merkulova I.I., Kozlov V.I. Tendentsii i perspektivy razvitiya vzryvatelnykh ustroystv boepripasov [Trends and prospects in the ammunition fuses development]. *Inzhenerny vestnik — Engineering Bulletin*, 2014, no. 10, pp. 633–640.
- [2] Kolenkin A.V., Gogin V.V., Stetskevich A.D. Sostoyanie i napravlenie razrabotok mnogofunktsionalnykh vzryvatelnykh ustroystv za rubezhom [The state and direction of the multifunctional explosive devices development abroad]. *Boepripasy i vysokoenergeticheskie kondensirovannye sistemy — Ammunition and high-energy condensed systems*, 2016, iss. 2, pp. 1–16.
- [3] Evlanov K.I., Tokarev V.A., Borisenok V.A., Bragunets V.A., Baklashov D.I., Simakov V.G. Stend dlya ispytaniy na stoykost k peregruzkam [Bench for overload endurance test]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 5, pp. 1–10.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-5-1875>
- [4] Tokarev V.A., Borisenok V.A., Evlanov K.I. et al. Laboratornyi kompleks dlya ispytaniya elementov elektroniki na stoykost' k peregruzkam [Laboratory complex for testing electronic elements for resistance to overloads]. *Voprosy oboronnoy tekhniki (Defence Technology Issues)*, 2019, no. 135–136, pp. 96–104.
- [5] Tokarev V.A., Borisenok V.A., Evlanov K.I., Bragunets V.A. et al. Laboratornyi kompleks dlya ispytaniy elementov elektroniki na stoykost k peregruzkam [Laboratory complex for testing electronic elements for resistance to overloads]. In: *Sb. dokladov Mezhdunar. konf. "XXI Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya"* [Coll. of reports at the XXI Intern. Conf. "Kharitonov thematic scientific readings"]. Sarov, RFYaTs–VNIIEF Publ., 2019, vol. 2, pp. 241–249.
- [6] Evlanov K.I., Tokarev V.A., Borisenok V.A. et al. Stend dlya ispytaniy elementov elektroniki na stoykost k peregruzkam [Stand for testing electronic elements for resistance to overloads]. In: *Sb. dokladov XXVIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Peredacha, priem, obrabotka i oobra-*

- zhenie informatsii o bystroprotekayushchikh protsessakh*” [Coll. of reports at the XXVIII All-Russian Scientific and Technical Conference “Transmission, reception, processing and display of information on fast processes”]. Sochi, 2017, pp. 175–182.
- [7] Tokarev V.A., Borisenok V.A., Evlanov K.I., Bragunets V.A., et al. Laboratornyi kompleks dlya ispytaniy elementov elektroniki na stoykost k peregruzkam. Metodiki ispytaniy [Laboratory complex for testing electronic elements for resistance to overloads. Test methods]. In: Sb. dokladov Yubileynoy XXX Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Peredacha, priem, obrabotka i otobrazhenie informatsii o bystroprotekayushchikh protsessakh” [Coll. of reports at the XXX All-Russian scientific and technical conference “Transmission, reception, processing and display of information on fast processes”]. Sochi, 2019, pp. 695–714.
- [8] *Aktsionernoe obshchestvo NIIKhIT* [NIIKhIT Joint Stock Company]. Available at: www.niihit.ru

Tokarev V.A., Dr. Sc. (Phys.-Math.), Chief Researcher, FSUE RFNC-VNIIEF; author of more than 30 scientific papers in laser and radiation physics. e-mail: tokarev.vl@mail.ru

Shestakov E.E., Researcher, FSUE RFNC-VNIIEF; author of 3 scientific papers in shock wave physics. e-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

Bragunets V.A., Leading Engineer, FSUE RFNC-VNIIEF; author of more than 20 scientific papers in shock waves and dynamic strength of materials. e-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

Borisenok V.A., Dr. Sc. (Phys.-Math.), Deputy Director, Sarov State Physics and Technical Institute, Branch of the National Research Nuclear University MEPhI; author of more than 60 scientific papers in of shock waves, dynamic strength of materials and radiation physics. e-mail: vaborisenok@mephi.ru

Baklashov D.I., Leading Research Engineer, FSUE RFNC-VNIIEF. e-mail: Baklashov@inbox.ru

Kryuchenkov S.S., Leading Research Engineer, FSUE RFNC-VNIIEF. e-mail: Kryuchenkov@mail.ru

Simakov V.G., Cand. Sc. (Phys.-Math.), Leading Researcher, FSUE RFNC-VNIIEF; author of more than 20 scientific papers in shock waves and dynamic strength of materials. e-mail: vgsimakov@hotmail.com