

УДК 629.7: 621.039.6

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ОТРАБОТКИ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ

М.В. Сахаров, А.А. Воробьев, А.В. Уткин,  
В.А. Фельдштейн, И.С. Комаров

*Разработана автоматизированная система управления, сбора и обработки данных для экспериментального стенда обработки электротермического ускорителя, построенная на базе ПЭВМ с подключёнными комбинированными устройствами, предназначенными для автоматизации измерений и управления в лабораторных исследованиях и промышленности. Приведены конструкция электротермического ускорителя, схема экспериментальной установки, методика проведения эксперимента и особенности построения автоматизированной системы управления, сбора и обработки данных для определения параметров быстротекущих процессов при высокоскоростном соударении метаемого тела с преградой. Электротермический ускоритель используется для моделирования воздействия микрометеоритов и частиц космического мусора на элементы конструкции и конструкционные материалы космических аппаратов в земных условиях. Автоматизация стенда позволила исключить возможные ошибки оператора при выполнении операций в процессе эксперимента, обезопасить работу с высоковольтной установкой, повысить надёжность и точность получаемой с датчиков информации, а также существенно сократить затраты времени на сбор, обработку данных и представление результатов экспериментов.*

**Ключевые слова:** автоматизированная система управления, сбора и обработки данных, электротермический ускоритель, высокоскоростное соударение, автоматизация физического эксперимента.

Исследуемый электротермический ускоритель (ЭТУ) (рис. 1) является разновидностью легкогазовой пушки, в которой рабочее тело образуется в результате разложения водородсодержащего вещества под воздействием плазмы, образующейся при разряде тока с ёмкостного накопителя.

Результаты проведённых ранее теоретических и экспериментальных исследований [1 – 3], а также анализ зарубежных источников [4, 5] позволяют утверждать, что электротермический принцип ускорения позволит существенно расширить диапазон достижимых скоростей ударников. Так, предварительные оценки показывают, что скорости ударников массой 100 – 200 мг могут превышать 10 км/с. При данных скоростях принципиально меняется механизм разрушения мишеней, который до сих пор экспериментально практически не исследован.

Практический интерес к данным исследованиям связан, в частности, с необходимостью адекватного моделирования высокоскоростного соударения микрометеоритов с конструкционными материалами космических аппаратов, исследования их стойкости и разработки новых эффективных средств и способов защиты [6].

Строгая последовательность подготовки ЭТУ к эксперименту, сложность синхронизации момента запуска регистрирующей аппаратуры с моментом срабатывания ЭТУ, сложные термодинамические процессы, протекающие при его срабатывании, необходимость определения высокой скорости движения ударника в вакуумной трубе и параметров его соударения с мишенью, сложная помеховая

электромагнитная обстановка, а также требования безопасности при работе с высоковольтной установкой обусловили необходимость создания автоматизированной системы на базе ПЭВМ, позволяющей осуществлять поэтапную дистанционно управляемую подготовку ЭТУ к срабатыванию, сбор и обработку данных, получаемых с датчиков. Целью данной работы являлась разработка автоматизированной системы управления, сбора и обработки данных (АСУСОД) для экспериментального стенда обработки ЭТУ, решающих перечисленные задачи.

### Экспериментальный стенд для обработки электротермического ускорителя

Для экспериментальной обработки ЭТУ создан стенд (рис. 1, а), в состав которого вошли: ЭТУ 1, накопитель 2 ёмкостью 300 мкФ, заряжаемый до напряжения 20 кВ с максимальной энергией 60 кДж, разрядник вакуумный управляемый РВУ-43 3 с рабочим напряжением до 30 кВ и рабочим током до 350 кА, вакуумная камера 4, диагностическая камера 5 с размещённой в ней мишенью, а также вспомогательные системы зарядки конденсаторов и измерения параметров разрядки накопителя.

Корпус ЭТУ содержал катод и полый анод, заполненный рабочим телом из углеводородного соединения, непосредственно за которым размещался ствол калибром 4,15 мм и длиной 40 – 80 калибров с ударником массой 100 – 300 мг. В объёме между катодом и анодом располагалась углеродная нить для инициирования высоковольтного разряда.

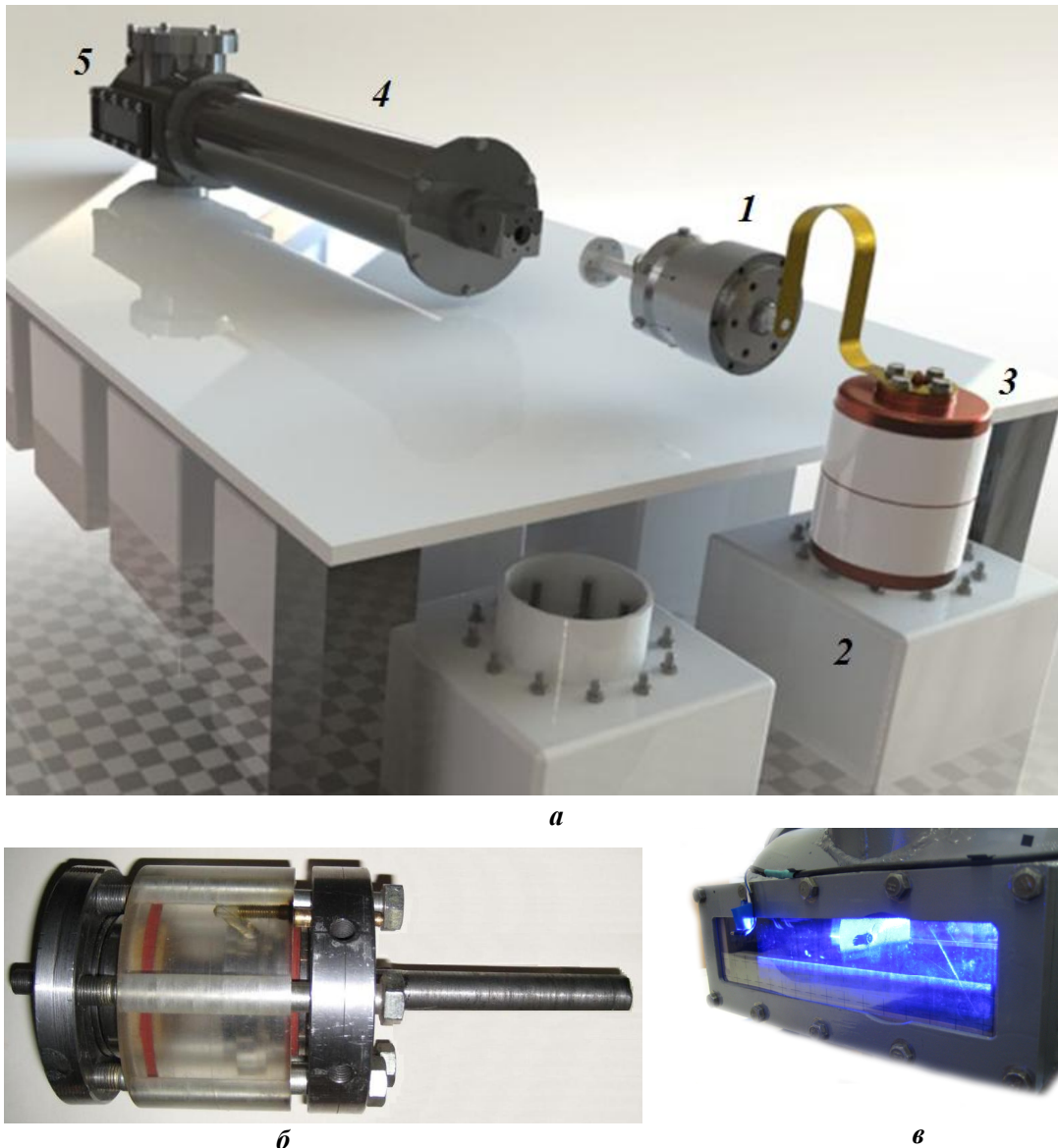


Рис. 1. Стенд для обработки ЭТУ: а – схема; б – ЭТУ; в – диагностическая камера

Общая индуктивность схемы определялась экспериментально и составляла 0,7 мкГн. Начальное сопротивление разрядного промежутка составляло 7 – 14 Ом, т. е. ёмкостный накопитель работал в режиме короткого замыкания.

Для описания процесса ускорения ударника в ЭТУ предложена следующая физическая модель. При импульсном разряде ёмкостного накопителя в промежутке катод – анод образовывалась углеродная плазма, используемая в качестве источника электронов. Далее пучок электронов, формируемый разрядной плазмой, выходил из центрального отверстия в аноде и поглощался рабочим телом из углеводородного соединения, что, в свою очередь, вызывало резкий рост внутренней энергии, импульсный нагрев рабочего тела и его переход в

газообразное состояние. Протекающие в дальнейшем физические процессы по ускорению ударника аналогичны процессам, протекающим в легкогазовых пушках. Заметим, что более высокое для ЭТУ значение показателя адиабаты смеси водорода и углерода компенсируется высокой температурой газа.

Эксперименты на стенде проводились в следующей последовательности.

1. Включался вакуумный насос, который в течение 10 – 30 минут выполнял подготовительные технологические функции по сушке и дегазации вакуумного масла. Далее открывался вакуумный клапан на насосе и производилась откачка вакуумной 4 и диагностической 5 камер. Во избежание выхода из строя вакуумных датчиков их клапан

открывался с некоторой задержкой после частичного вакуумирования камер.

2. Подавался управляющий TTL-сигнал на устройство управления твёрдотельным лазером с диодной накачкой (рабочая длина волны лазерного излучения 532 нм), осуществлявшим подсветку объёма диагностической камеры для проведения высокоскоростной (до 180 тысяч кадров в секунду) видеосъёмки. Интенсивность подсветки регулировалась амплитудой управляющего сигнала в диапазоне 1 – 5 В.

3. Подавалось питание на устройство повышения напряжения до 5 кВ и при помощи электромеханического привода происходило замыкание цепи зарядки пусковых конденсаторов, обеспечивающих включение вакуумного разрядника.

4. При помощи электромеханического привода размыкалась цепь нейтрализации заряда и аварийного сброса заряда ёмкостного накопителя.

5. Подавалось питание на устройство повышения напряжения до 20 кВ и происходила зарядка ёмкостного накопителя. При достижении требуемого уровня напряжения заряда ёмкостного накопителя в диапазоне 1 – 20 кВ размыкались электромагнитные реле коммутации линий повышения напряжения до 5 и 20 кВ в целях обеспечения гальванической развязки пульта управления от высоковольтных цепей в момент срабатывания ЭТУ.

6. При подаче управляющего импульса на электромеханический привод замыкалась цепь пусковых конденсаторов и поджигающего электрода вакуумного разрядника, в результате чего происходил разряд ёмкостного накопителя через искровой промежуток нагрузки – ЭТУ. Одновременно с подачей управляющего импульса на включение вакуумного разрядника подавался синхроимпульс на устройство высокоскоростной видеорегистрации.

7. Цифровым осциллографом регистрировалась информация о параметрах разряда ёмкостного накопителя на нагрузку от датчика тока (пояса Роговского) и омического делителя напряжения.

8. Проводилась обработка полученных данных, в результате которой вычислялись: сила тока, падение напряжения на нагрузке, мгновенная мощность электрического разряда, выделяемая энергия в разрядном промежутке, интеграл функции распределения тока во времени, производная тока, частота колебаний контура и время окончания разряда (время перехода вакуумного разрядника в вентильный режим).

9. После определения скорости метания по результатам анализа высокоскоростной видеосъёмки вычислялся КПД преобразования энергии на

различных стадиях: запасенная энергия ёмкостного накопителя – энергия электрического разряда, энергия электрического разряда – кинетическая энергия ударника, запасенная энергия ёмкостного накопителя – кинетическая энергия ударника.

Для автоматизации выполнения отдельных операций по приведённой методике, а также с целью повышения надёжности и точности получаемых с измерительных приборов данных, а также для повышения оперативности их обработки и интерпретации разработана автоматизированная система управления, сбора и обработки данных (АСУСОД).

#### **Автоматизированная система управления, сбора и обработки данных**

В настоящее время для решения задач автоматизации физических экспериментов на рынке имеется широкий спектр приборов зарубежного и отечественного производства, работающих как автономно, так и под управлением ПЭВМ. При построении АСУСОД стенда отработки ЭТУ использовались комбинированные устройства серии QMBox производства компании R-Technology, предназначенные для автоматизации измерений и управления в лабораторных исследованиях и промышленности. Исходя из спектра решаемых АСУСОД задач, в её состав кроме ПЭВМ вошли следующие устройства (рис. 2).

Устройство QMS20 (2 модуля) использовалось для преобразования с помощью встроенных 14-разрядных АЦП в цифровой вид аналоговых сигналов, снимаемых с пояса Роговского и омического делителя напряжения и несущих информацию о параметрах разряда ёмкостного накопителя на нагрузку. Оцифровка сигналов велась в режиме реального времени с накоплением соответствующих массивов данных в оперативной памяти ПЭВМ для дальнейшей обработки, представления в виде графиков и вывода на печать и в файл. Максимальная частота дискретизации одним модулем QMS20 составляла 3 МГц на канал (разрешение по времени 0,33 мкс). Учитывая характерную длительность (порядка 30 – 50 мкс) снимаемых с датчиков сигналов, реализуемое каждым модулем QMS20 разрешение по времени позволяло строить достаточно информативные графики для детального анализа динамики их изменения. Диапазон входных сигналов  $\pm 5$  или  $\pm 0,99$  В переключался программно и позволял проводить их оцифровку с разрешением 1,2 или 0,7 мВ соответственно.

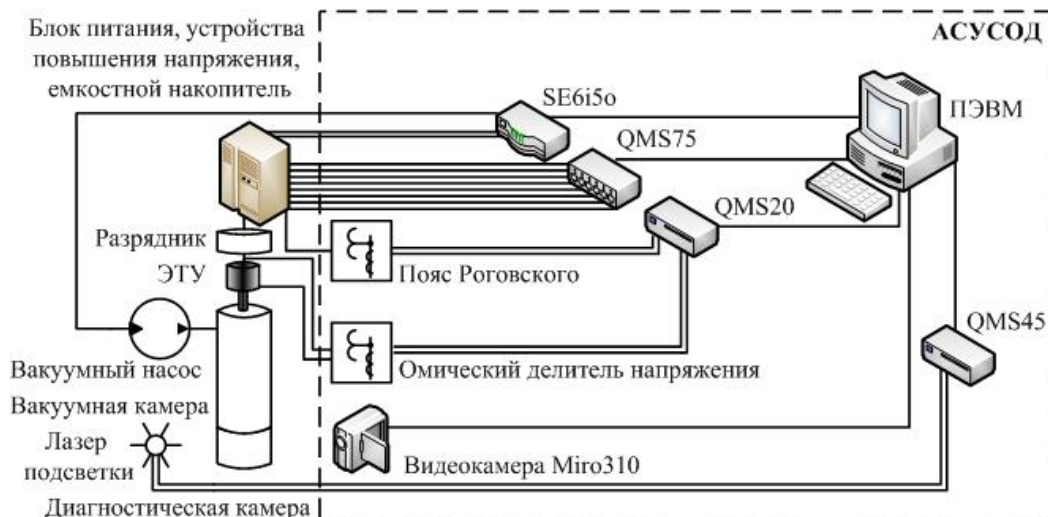


Рис. 2. Схема автоматизированной системы управления, сбора и обработки данных

Устройство QMS45 (1 модуль) использовалось для цифроаналогового преобразования напряжения управляющего сигнала, задаваемого программно (1 – 5 В) и подаваемого на устройство управления твёрдотельным лазером подсветки диагностической камеры стенда. Преобразование осуществлялось встроенным 16-разрядным ЦАП с частотой 125 кГц и разрешением по амплитуде 0,5 мВ. Рабочий диапазон выходного сигнала устройства составлял  $\pm 10$  В.

Устройство QMS75 (1 модуль) содержало 8 электромеханических реле и использовалось для коммутации сигналов и для дискретного управления силовым оборудованием. Основные технические характеристики устройства: максимально допустимый ком-

мутируемый ток составлял 3 А в течение 1 с, максимальное напряжение  $\pm 250$  В, максимальная частота переключения реле без нагрузки  $1200 \text{ мин}^{-1}$ .

Обмен данными перечисленных устройств с ПЭВМ осуществлялся по интерфейсу USB. С целью создания автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора АСУСОД на языке программирования высокого уровня C# для платформы .NET Framework разработано специализированное программное обеспечение (рис. 3). Выбор языка C# для разработки АРМ обусловлен наличием в его библиотеке нового гибкого и удобного в использовании элемента управления пользовательского интерфейса Chart, предназначенного для визуализации массивов

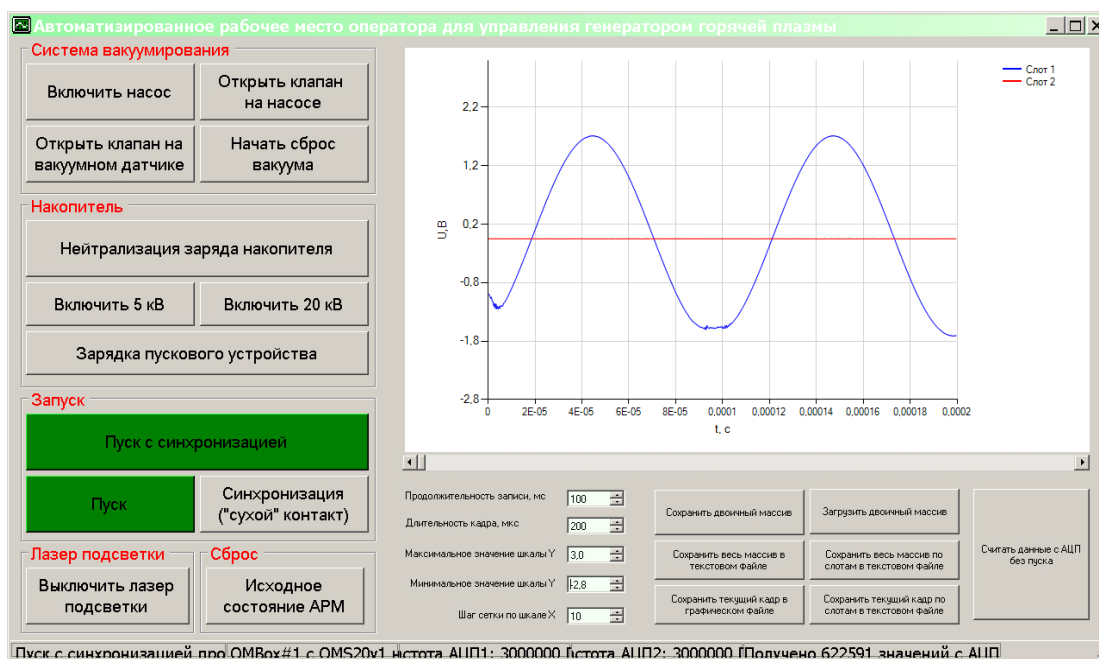


Рис. 3. Интерфейс автоматизированного рабочего места оператора

данных в виде графиков и диаграмм. Для обеспечения необходимой совместимости разработанного программного обеспечения с поставленными разработчиком в виде динамически компонуемых библиотек функций доступа к аппаратному обеспечению QMBox применён механизм маршалинга, позволивший адаптировать прототипы импортируемых библиотечных функций, определённых в стиле C++, к синтаксису C#.

В соответствии с разработанным алгоритмом перед началом работы АРМ производилось конфигурирование устройств – задавались параметры работы каждого модуля: устанавливалась частота дискретизации, количество используемых модулей и каналов; считывались калибровочные коэффициенты и др. Затем производился запуск устройства, и начинался сеанс обмена данными.

Модули QMS20 (АЦП) в процессе сеанса передачи данных с заданной скоростью в соответствии с составленной таблицей опроса каналов собирали данные с датчиков и отправляли их через интерфейсную плату в компьютер по шине USB, где данные помещались в кольцевой буфер в оперативной памяти. По мере заполнения этого буфера программное обеспечение АРМ считывало из него двоичные данные для накопления и последующей обработки. Важно отметить, что считывание данных из буфера происходило со скоростью большей, чем скорость их поступления из устройства, поэтому потери данных не происходило, а сеанс передачи данных мог продолжаться неограниченно долго.

Некоторой сложностью использования модулей QMS20 для регистрации параметров импульсных быстропротекающих процессов явилось то, что с момента выдачи команды на начало работы АЦП до момента поступления первых данных происходила слабопрогнозируемая временная задержка. По-видимому, причина этой задержки в использовании на ПЭВМ операционной системы Windows, не являющейся системой реального времени, а также в затратах некоторого времени на исполнение команды. В связи с этим после выдачи команды на начало работы АЦП программно производился циклический опрос кольцевого буфера до появления в нём первого слова данных, что позволило исключить сложную и ненадёжную внешнюю синхронизацию. С этого момента производился отсчёт длительности накопления получаемых с АЦП данных в соответствии с заданным программно значением, по окончании которого накопление двоичных данных в оперативной памяти останавливалось. Далее производилась расшифровка данных в соответствии с протоколом помещаемой в кольцевой буфер информации, согласно которому в каждом чётном

шестнадцатибитном слове элемента данных содержалась информация о номерах опрашиваемых каналов и модулей, в каждом нечётном – двоичный код амплитуды сигнала, который затем переводился с использованием массивов калибровочных коэффициентов в измеренное значение напряжения. Расшифрованные данные помещались в стек в формате структуры «время – модуль – канал – измеренное напряжение». Полученные таким образом данные визуализировались в окне АРМ в виде графиков и могли быть сохранены в файле для дальнейшего анализа и обработки во внешних приложениях.

Модуль QMS45 (ЦАП) также работал в режиме потокового вывода с использованием кольцевого буфера, при котором в процессе сеанса передачи данных модуль постоянно получал данные из оперативной памяти компьютера по интерфейсу USB. В процессе передачи очередной порции данных программа АРМ готовила следующую порцию, что также позволяло сделать сеанс сколь угодно долгим.

Программирование работы модуля QMS75 (блок реле) особых трудностей не вызвало, поскольку для замыкания/размыкания соответствующих контактов реле требовалось лишь указать номер реле и режим его срабатывания. Основное внимание было сосредоточено на реализации приведённой методики проведения эксперимента на стенде и безусловном исключении возможности изменить порядок выполнения отдельных действий оператором АРМ, что потенциально могло бы стать причиной возникновения аварийной ситуации.

Для управления работой вакуумного насоса и устройств повышения напряжения до 5 и 20 кВ использовался модуль управления SE6150, срабатывание которого осуществлялось через последовательный порт RS-232 посредством запуска пакетных файлов, содержащих вызов исполняемого файла программы-драйвера с соответствующими выполняемому действию параметрами командной строки.

Для определения скорости соударения ударника с мишенью использовалась скоростная видеокамера Mi90 310 с кадровой частотой до 750 тыс. кадров в секунду, осуществлявшая съёмку через прозрачное окно в диагностической камере при подсветке расфокусированным излучением твёрдотельного лазера с диодной накачкой и документирование видеоряда на жёсткий диск ПЭВМ. Пример результатов теневой видеорегистрации движения алюминиевого ударника перед соударением с полубесконечной алюминиевой мишенью в одном из экспериментов приведён на кадрах кинограммы (рис. 4), на которых также показаны реперные метки (квадраты 5×5 мм).

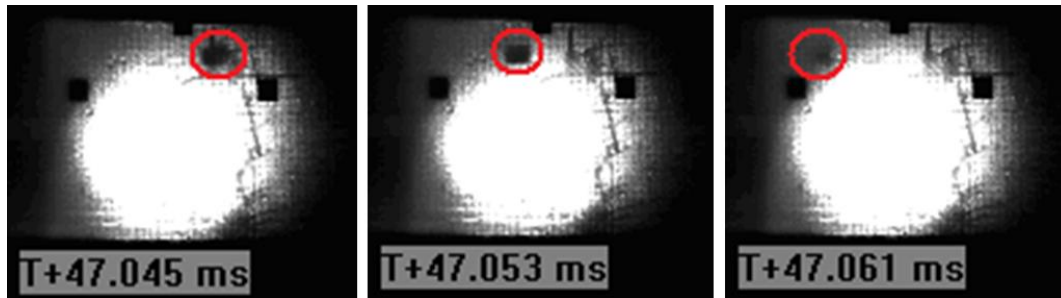


Рис. 4. Кадры кинограммы съёмки процесса высокоскоростного метания с подсветкой лазерным излучением

### Выводы

В рамках проведённых работ по автоматизации экспериментального стенда отработки ЭТУ создано АРМ оператора, представляющее собой программно-аппаратный комплекс, построенный на базе ПЭВМ с подключёнными устройствами серии QMBox и модулем SE6i50. Для управления АРМ на языке программирования С# разработано специализированное программное обеспечение, работающее на платформе .NET Framework и реализующее методику подготовки и проведения эксперимента с ЭТУ. Автоматизация стенда позволила исключить возможные ошибки оператора при выполнении операций в процессе эксперимента, обезопасить работу с высоковольтной установкой, повысить надёжность и точность получаемой с датчиков информации, а также существенно сократить затраты времени на сбор, обработку данных и представление результатов экспериментов. Проведённые тестовые испытания АРМ показали хорошую сходимость выполненных АСУСОД измерений с параллельно полученными с помощью традиционных средств измерений. С использованием стенда проведена серия экспериментов по отработке технологии высокоскоростного метания ударников электротермическим способом.

### Литература

1. Spitsin D. D., Zikova T. S., Yanevskiy V. D., Vorobiev A. A. Experimental research of micrometeorites impact on spacecrafts in laboratory environment / D. D. Spitsin etc. // Physics of Extreme States of Matter – 2011. – Chernogolovka: Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, 2011. – P. 59 – 61.
2. Спицын Д. Д., Зыкова Т. С., Сахаров М. В., Воробьёв А. А., Комаров И. С., Астраускас Й. И., Удинцев Р. Д. Генератор горячей плазмы для систем электротермического ускорения макротел // Материалы междунаучной конференции «Плазменные технологии исследования, модификации и получения материалов различной физической природы»: [Сб.]. – Казань, 2012. – С. 47 – 50.
3. Spitsin D. D., Zikova T. S., Vorobiev A. A., Komarov I. S., Chichayeva O. V., Trunilin I. B. Development of two-stage electro-thermal way to accelerate solid bodies / D. D. Spitsin etc. // Physics of Extreme States of Matter – 2013. – Moscow: Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences 2013. – P. 72 – 74.
4. Johnson G. R., Stryk R. A., Beissel S. R. SPH for high velocity impact computations / G. R. Johnson, R. A. Stryk, S. R. Beissel // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 139, 347 – 373 (1996).
5. Hayhurst C. J., Clegg R. A. Cylindrically symmetric SPH simulations of hypervelocity impacts on thin plates // Int. J. Impact Engng. – Vol. 20. – P. 337 – 348 (1997).
6. Воробьёв А. А., Зыкова Т. С., Спицын Д. Д., Удинцев Р. Д., Яневский В. Д., Казанцев С. Г. Моделирование воздействия микрометеоритов и фрагментов космического мусора на космические аппараты / А. А. Воробьёв и др. // Вопросы электромеханики. Труды НИИ ВНИИЭМ. – 2011. – Т. 120. – № 1. – С. 27 – 31.

Поступила в редакцию 12.01.2015

*Михаил Викторович Сахаров, д-р техн. наук, доцент, начальник кафедры, т. (495) 698-35-46, m\_sakharov@mail.ru.*

*Алексей Александрович Воробьёв, канд. техн. наук, начальник научно-исследовательской лаборатории, т. (495) 698-35-46, vorobevall@mail.ru.*

*Андрей Викторович Уткин, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник, т. (495) 696-34-12, Военная академия РВСН имени Петра Великого, г. Москва.*

*Валерий Адольфович Фельдштейн, д-р техн. наук, начальник отдела,*

*Илья Сергеевич Комаров, начальник сектора, ЦНИИ Машиностроения, г. Королёв, Московская обл., т. (495) 696-34-12.*

## AUTOMATION OF THE ELECTRO-THERMAL ACCELERATOR PROCESSING EXPERIMENTAL TEST BENCH

**Sakharov M.V., Vorobyev A.A., Utkin A.V.,  
Feldstein V.A., Komarov I.S.**

*A new data collection and processing automated control system has been developed for the electro-thermal accelerator processing experimental test bench, which is based on the Personal computer device chained with several combination units, and intended for the measuring procedures automation, as well as control over the laboratory researches and manufacturing industry. The following aspects are revised: Electro-thermal accelerator design, experimental installation scheme, the routine of experiment and the special features of the automated control system, information collection and processing to determine the rapid processes parameters during a high-velocity impact of the hurling object with an obstacle. The electro-thermal accelerator is used to simulate the impact of the micrometeorites and various space debris particles on the design elements, as well as the space crafts constructional material, in Earth's conditions. Test bench automation allowed eluding any potential operator mistakes during the experimentation process, to secure operations with a high-voltage unit, to increase safety and accuracy of data, received from the information sensors, and to significantly reduce time consumption for data collection and processing, as well as submitting the experimental results.*

**Key words:** Automated control, collection and processing system, electro-thermal accelerator, high-velocity impact, physical experiment automation.

### Reference

1. Spitsin D. D., Zikova T. S., Yanevskiy V. D., Vorobiev A. A. Experimental research of micrometeorites impact on space-crafts in laboratory environment / D. D. Spitsin etc. // Physics of Extreme States of Matter – 2011. – Chernogolovka: Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, 2011. – P. 59 – 61.
2. Spitsin D. D., Zykova T. S., Sakharov M. V., Vorobyev A. A., Komarov I. S., Astrauskas I. I., Udintsev R. D. Hot plasma generator for the electro-thermal macro body acceleration // Materials of the International scientific conference «Plasma technologies of research, modification and creation of materials of a various physical nature» [Sb.]. – Qazan, 2012. – P. 47 – 50.
3. Spitsin D. D., Zikova T. S., Vorobiev A. A., Komarov I. S., Chichaeva O. V., Trunilin I. B. Development of two-stage electro-thermal way to accelerate solid bodies / D. D. Spitsin etc. // Physics of Extreme States of Matter. – 2013. – Moscow: Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences 2013. – P. 72 – 74.
4. Johnson G. R., Stryk R. A., Beissel S. R. SPH for high velocity impact computations / G. R. Johnson, R. A. Stryk, S. R. Beissel // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 139, 347–373 (1996).
5. Hayhurst C. J., Clegg R. A. Cylindrically symmetric SPH simulations of hypervelocity impacts on thin plates // Int. J. Impact Engng. – Vol. 20. – P. 337 – 348 (1997).
6. Vorobyev A. A., Zykova T. S., Spitsin D. D., Udintsev R. D., Yanevskii V. D., Kazantsev S. G. Simulation of the micrometeorites and space debris impact on the space crafts / Vorobyev A. A. & others // Electromechanical matters. RPC VNIIEEM Studies. – 2011. – Vol. 120. – № 1. – P. 27 – 31.

**Sakharov Mikhail Viktorovich**, Ph. D. of Engineering, associate professor., HoD,  
tel.: (495) 698-35-46, m\_sakharov@mail.ru.

**Vorobyev Alexei Alexandrovich**, Ph. D. Candidate of Engineering, Head of the Scientific Research Laboratory,  
tel.: (495) 698-35-46, vorobeval@mail.ru.

**Utkin Andrei Victorovich**, Ph. D. Candidate of Engineering, Senior Researcher, tel.: (495) 696-34-12,  
Military Academy of Strategic Rocket Forces, Moscow.

**Feldshtein Valerii Adolfovich**, Ph. D. of Engineering, HoD,  
**Komarov Ilya Sergeevich**, head of division,

Central Research Institute of Machine Building, Korolev, Moscow region.  
tel.: (495) 696-34-12.