

Многофункциональная информационно-измерительная система для оснащения стендов и установок при проведении испытаний на прочность моделей и элементов конструкций из композиционных материалов

**А. В. Дроздов^а, В. В. Харченко^а, В. С. Дзюба^а, Л. В. Кравчук^а, А. М. Потапов^б,
В. Н. Сиренко^б, И. А. Гусарова^б, Д. В. Клименко^б, В. Н. Харченко^б,
А. А. Самусенко^б**

^а Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^б ГП “Конструкторское бюро “Южное” им. М. К. Янгеля”, Днепр, Украина

Описана многофункциональная информационно-измерительная система PMX-TEST для оснащения стендов и установок при проведении испытаний на прочность моделей и элементов конструкций из композиционных материалов. Система обеспечивает многоканальное измерение деформации, давления и температуры. Разработано соответствующее программное обеспечение PMX-TEST-Monitor, позволяющее представлять в цифровом и графическом виде экспериментальные данные, осуществлять их накопление и сохранение для последующей обработки.

Ключевые слова: композиционные материалы, информационно-измерительная система, деформация, температура, тензорезистор.

Введение. В последнее время значительно возросло использование в промышленности различных композиционных неметаллических материалов. Это относится также к углепластиковым композиционным материалам, которые все более широко применяются в конструкциях авиационной и ракетно-космической техники [1, 2].

При создании таких материалов и конструкций из них используются специальные конструкторские решения и технологические процессы. Так, например, силовая оболочка корпуса ракетного двигателя твердого топлива изготавливается методом послойной намотки. При проектировании подобных оболочек армирующие волокна, несущие нагрузку, ориентируют в различных направлениях таким образом, чтобы их прочность при разрыве была оптимально использована в конструкции заданной геометрической формы. Свойства таких материалов и конструкций из них чрезвычайно чувствительны к изменениям их структуры и технологии изготовления. Проверка правильности применения технологических переделов и описание механического поведения этих материалов по сравнению с изотропными (например, металлами) [3] – сложная многофакторная задача, решение которой требует знания многих механических характеристик.

В ГП “Конструкторское бюро “Южное” им. М. К. Янгеля” (далее – “КБ Южное”) в последнее время проводятся интенсивные работы по разработке и использованию новых перспективных углепластиковых композиционных материалов в ответственных узлах и элементах конструкций ракетно-космической техники [2, 4, 5]. Для успешного применения таких материалов и конструкций ввиду особенностей технологии их изготовления и специфики физико-механических характеристик необходимо выполнить большой объем расчетно-экспериментальных работ: исследовать прочностные свойства материалов на образцах, моделях и фрагментах конструкций с реализацией натуральных условий силового и теплового нагружения; осуществить проектные расчеты напряженно-деформированного состояния конструкций с учетом реализации свойств материалов в конструкциях [6]. Такие работы предусмотрены Перспек-

тивным планом совместной научно-исследовательской деятельности ГП “КБ “Южное” и институтов Национальной академии наук Украины на 2013–2017 гг. В Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины проводятся испытания на прочность разрабатываемых углепластиковых материалов [7], а также выполняются работы по испытаниям узлов и элементов конструкций ракетно-космической техники.

К прочностным характеристикам и весовым параметрам конструкций из композиционных материалов как в авиационной, так и в ракетно-космической технике предъявляют жесткие требования. Для проверки заложенного в конструкцию при проектировании уровня прочностных свойств проводят их натурные испытания, которые являются довольно трудоемкими и дорогостоящими.

Сократить объем натуральных испытаний можно, заменив их механическими испытаниями отдельных наиболее ответственных элементов или моделей конструкций при схемах силового нагружения, подобных натурным. Однако это уменьшает их информативность и достоверность экспериментальной отработки прочности разрабатываемых изделий. Для повышения прочностной надежности последних необходимо повысить информативность испытаний и достоверность проводимых измерений. Это важно для конструкций из полимерных композиционных материалов, характеризующихся существенной анизотропией механических свойств композитов, особенно получаемых методом намотки. Для определения механического состояния таких конструкций при испытаниях следует проводить многочисленные измерения различных физических величин в разных точках и направлениях на поверхности объекта. Для проведения испытаний элементов или моделей конструкций используют стандартные или специально разработанные испытательные установки, однако в них отсутствуют многоканальные информационно-измерительные системы, что не позволяет в полном объеме выполнить испытания моделей и элементов конструкций из композиционных материалов и получить необходимые экспериментальные данные.

Целью настоящей работы является создание многофункциональной информационно-измерительной системы для оснащения стендов и установок, что обеспечит проведение испытаний на прочность элементов и моделей конструкций из композиционных материалов. Такая система должна обеспечить многоканальные измерения с высокой точностью деформации поверхности испытываемого объекта, величин нагружения (усилие, давление), температуры, представление в цифровом и графическом виде экспериментальных данных, их накопление и сохранение для последующей обработки.

Аппаратурная часть системы. В качестве базового блока для разработанной информационно-измерительной системы PMX-TEST с учетом выгодного соотношения “цена–технические характеристики” была выбрана усилительно-измерительная система PMX [8] компании HBM (Германия), которая производит измерительные устройства широкой номенклатуры и имеет опыт их применения в различных отраслях промышленности. К преимуществам системы PMX следует отнести высокую точность, надежность, работу в промышленных условиях, использование специальных высококачественных измерительных технологий от HBM, возможность увеличения количества каналов за счет подключения к одному компьютеру нескольких систем PMX.

Данная система включает в себя базовый блок (WG002), состоящий из корпуса, коммуникационных разъемов с индикаторами, четырех слотов, в каждый из которых может быть установлена четырехканальная измерительная плата. Таким образом, максимальное количество каналов для одной системы PMX равно 16. Выбор плат обусловлен условием необходимости многоканального измерения деформации и наличием нескольких каналов для измерения величин нагружения (усилие и давление). С учетом этого система была укомплектована измерительными платами (модулями) PX455 (3 шт.) и PX401 (1 шт.). Измерительная плата PX455 предназначена для

подключения полно- и полумостовых тензорезисторных и индуктивных преобразователей, а также пьезорезистивных и потенциометрических датчиков. Измерительная плата PX401 служит для ввода и последующего преобразования аналоговых сигналов постоянного тока и напряжения. К ней могут быть подключены датчики усилия и (или) давления с выходным сигналом в виде постоянного напряжения или тока, а также непосредственно выходы испытательных машин или стендов с сигналом, пропорциональным величине действующей нагрузки.

Поскольку в системе PMX не предусмотрено подключение каких-либо преобразователей температуры, для ее измерения дополнительно разработана и изготовлена пятиканальная система МИКРА-5 на базе программируемого индикатора технологических параметров МикРА ИЗ (Украина).

Внешний вид малогабаритной информационно-измерительной системы PMX-TEST, используемой при проведении испытаний на прочность элементов и моделей конструкций из композиционных материалов, представлен на рис. 1, а ее блок-схема – на рис. 2. Данная система включает в себя систему измерения деформации (12 каналов) и величин нагружения (четыре канала), а также систему измерения температуры МИКРА-5 (пять каналов).

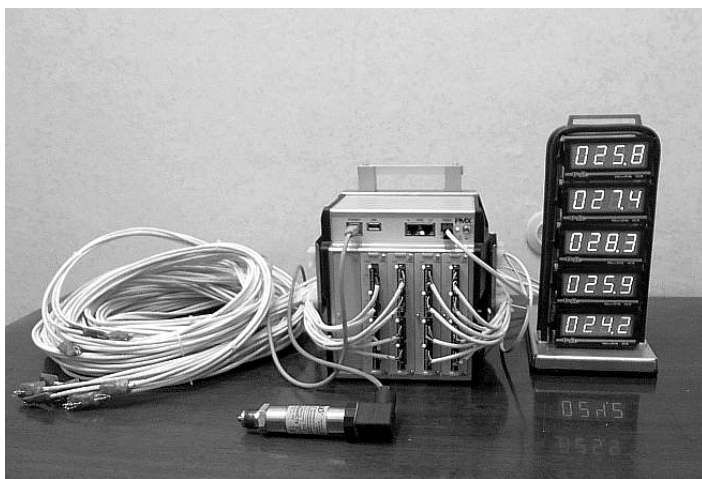


Рис. 1. Внешний вид информационно-измерительной системы PMX-TEST.

Для измерения деформации используются три четырехканальные измерительные платы PX455, к которым с помощью кабелей и согласующих устройств подключены тензорезисторные преобразователи $\varepsilon_1 \dots \varepsilon_{12}$ (рис. 2). Параметры нагружения, а именно: давление и усилие измеряются с помощью четырехканальной измерительной платы PX401. Измерительная система PMX к персональному компьютеру подключается по интерфейсу Ethernet, а система измерения температуры МИКРА-5 – по последовательному интерфейсу USB с помощью преобразователя USB/RS-485 AC-4.

Деформация поверхности испытуемого объекта в каждом из 12 каналов измеряется тензорезистором с номинальным сопротивлением 200 или 400 Ом. Для реализации полумостовой схемы используются согласующие устройства, которые содержат прецизионные резисторы, установленные на малогабаритных печатных платах. Согласующие устройства размещаются вблизи объекта испытаний и подключаются к измерительной системе PMX с помощью соединительных кабелей.

Параметры нагружения элементов и моделей конструкций могут быть измерены любыми измерительными преобразователями с выходным токовым сигналом в диапа-

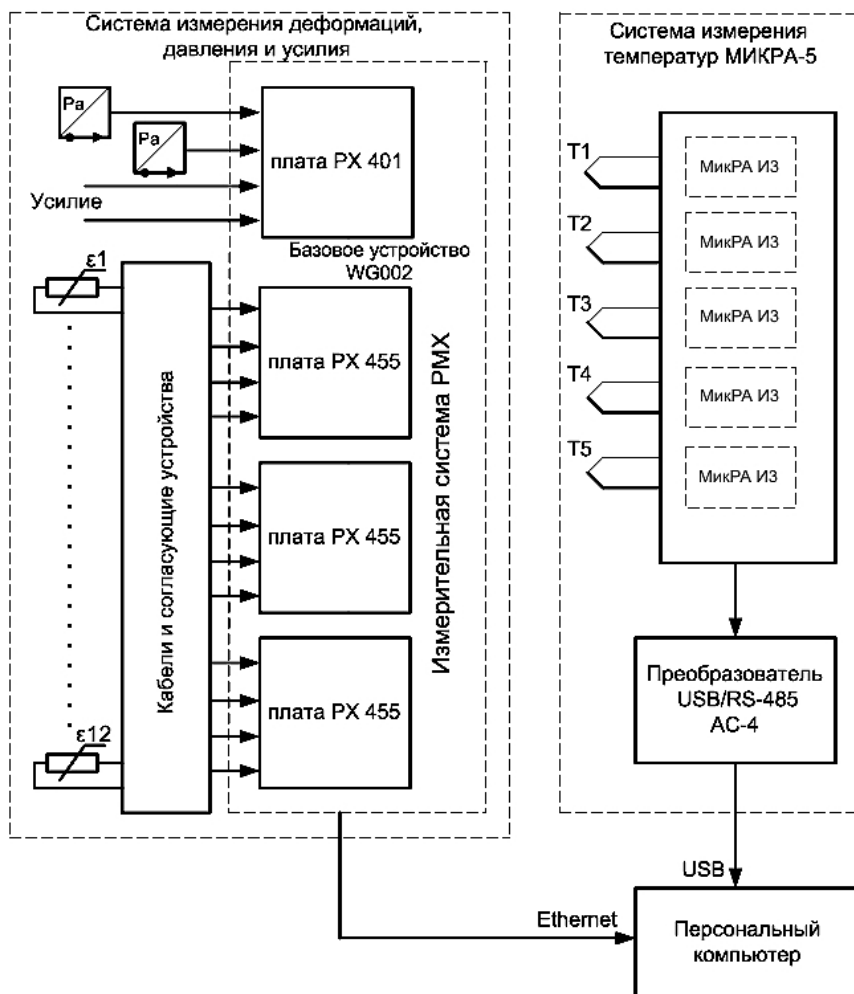


Рис. 2. Блок-схема информационно-измерительной системы PMX-TEST.

зоне 4...20 мА или 0...20 мА. В данной информационно-измерительной системе используются два типа преобразователей давления одинаковой конструкции: РС-28 фирмы APLISENS (Польша) и SEN-8601 фирмы KOBOLD (Германия). Изменение выходного токового сигнала находится в пределах 4...20 мА, а максимальный диапазон его измерения составляет 0...50 МПа. Для преобразователей давления РС-28 допустимая приведенная погрешность не превышает $\pm 0,2\%$, для преобразователей SEN-8601 – $\pm 1\%$.

При разработке системы измерения температуры учитывали малую величину выходного сигнала термоэлектрических преобразователей, обычно не превышающую 50 мВ, необходимость его линеаризации, температуру холодных спаев преобразователя, возможность работы в автономном режиме, а также передачу измеренных данных по нескольким каналам в персональный компьютер. На основании этого был выбран программируемый индикатор технологических параметров МикРА ИЗ. Индикатор обеспечивает работу термоэлектрических преобразователей и термометров сопротивления широкой номенклатуры, индикацию и передачу данных по интерфейсу RS-485 с использованием открытого коммуникационного протокола Modbus RTU. Разработанная система измерения температуры МИКРА-5 включает пять не-

зависимых каналов, каждый из которых содержит программируемый индикатор МикРА ИЗ. Для преобразования сигналов интерфейса RS-485 в сигналы последовательного интерфейса USB и последующей передачи результатов измерений температур в персональный компьютер служит преобразователь USB/RS-485 AC-4.

Программное обеспечение Web Server PMX. Для работы системы PMX фирмой HBM разработано программное обеспечение Web Server PMX, предназначенное для исходного конфигурирования каналов системы, первичной обработки сигналов и ограниченной визуализации измеренных данных. Его использование позволяет индивидуально для каждого канала задать исходные параметры, а именно: выбрать тип входного измерительного преобразователя (полно- и полумостовые и др.); задать линейную функцию преобразования сигнала; обнулить начальный сигнал; установить тип фильтра (Bessel, Batherworth) и частоту среза. В программном обеспечении используется стандартный интерфейс Ethernet. При работе системы PMX происходит самотестирование всех установленных модулей (плат). Для запуска Web Server PMX необходимо открыть имеющийся на персональном компьютере Интернет браузер и выбрать вкладку “PMX”, на которой в окне “OVERVIEW” появится (с небольшой задержкой) вся информация о подключенном оборудовании, измерительных платах, а также текущие результаты измерений сигналов по каналам (рис. 3). К недостаткам описанного программного обеспечения можно отнести низкую скорость измерений и отображения полученных данных, ограниченность их графической визуализации и сохранения, невозможность измерения температуры.



Рис. 3. Внешний вид окна “OVERVIEW” программного обеспечения Web Server PMX.

Программа PMX-TEST-Monitor. Для устранения недостатков программного обеспечения Web Server PMX и осуществления совместной работы разработанных измерительных систем PMX и МИКРА-5 создана единая программа PMX-TEST-Monitor. Основные требования при разработке программы заключаются в удобном ее

использовании, обеспечении визуализации в реальном масштабе времени как в цифровом, так и графическом виде экспериментальных данных, их накоплении и сохранении в персональном компьютере.

Создание программы PMX-TEST-Monitor стало возможным благодаря тому, что система PMX предусматривает также работу по известному сетевому протоколу Telnet [9], а в системе измерения температуры МИКРА-5 обеспечивается обмен по открытому коммуникационному протоколу Modbus RTU [10]. Эти протоколы были положены в основу обмена данными между системой PMX-TEST и персональным компьютером.

Графический интерфейс программы PMX-TEST-Monitor приведен на рис. 4. Для удобства пользования программой все измерительные каналы сгруппированы по виду измеряемой физической величины: например, деформации (D1...D12), нагружения (P1...P4) и температуры (T1...T5). В верхней части интерфейса расположена панель управления с кнопками “ВКЛ” – для включения всей системы измерения и регистрации и “СТАРТ”, “СТОП” – для запуска и останова процесса накопления данных, а также с индикаторами времени накопления и количества отсчетов. Имеются также панели измерения величин нагружения P1...P4 (четыре канала) и температур T1...T5 (пять каналов). В нижней части интерфейса расположена панель отображения измеряемых деформаций D1...D12 (12 каналов). Каждая из измеряемых величин (21) представляется как в цифровом виде на соответствующем индикаторе, так и графически на временной диаграмме в режиме реального времени. Все указанные панели имеют индикаторы включенного (выключенного) состояния соответствующей системы, а также кнопки установки цвета кривой на временной диаграмме для каждого из каналов. Для удобства отображения панель измеряемых деформаций в левой части содержит графическое окно, через которое выводятся результаты измерений деформаций по каналам в виде столбчатой диаграммы (рис. 4).

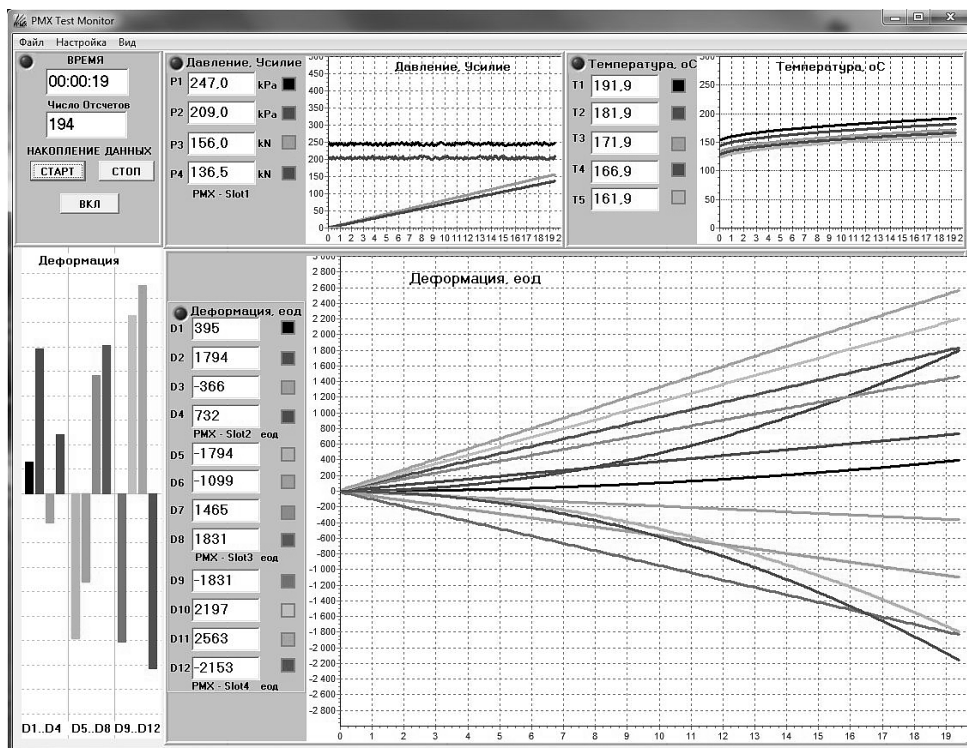


Рис. 4. Графический интерфейс программы PMX-TEST-Monitor (режим имитации).

Программа PMX-TEST-Monitor обеспечивает выполнение многих пользовательских функций, включая настройку измерительных каналов с установкой единиц физической величины, коэффициентов преобразования, обнуления начальных сигналов по каждому из каналов, гибкую установку шкал по осям временных диаграмм, параметров представления как в цифровом, так и графическом виде, сохранение накопленных при испытании экспериментальных данных с записью их в текстовом файле с расширением “.csv” для последующего анализа и обработки в программах EXCEL, ORIGIN и др.

Установка шкал по осям временных диаграмм возможна как при вводе оператором заданных минимальных и максимальных значений, так и автоматически (Авто) с подстройкой шкал под экстремальные текущие значения измеряемых величин (рис. 5).

Для предварительного просмотра массива экспериментальных данных, названий физических величин, единиц измерений, начальных и конечных значений, а также экстремальных значений массива по каждому каналу служит соответствующее окно (рис. 6). При вызове этого окна пользователь программы может отметить каналы системы, для которых результаты измерений необходимо сохранить в файле данных. Кроме того, можно сохранить не все, а только часть из накопленных, задав определенную частоту выборки (1...10 Гц) из исходного массива данных.



Рис. 5. Окно для установки шкал временных диаграмм.

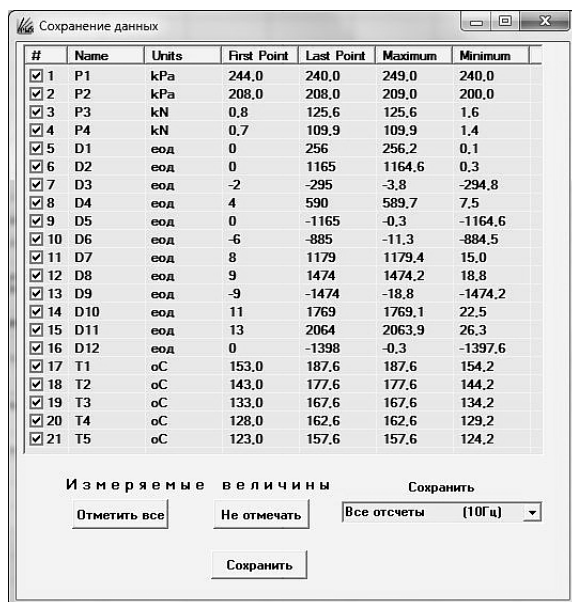


Рис. 6. Окно предварительного просмотра массива экспериментальных данных.

Особенностью программы PMX-TEST-Monitor является наличие процедуры, позволяющей повысить точность измерения деформаций. При использовании мостовых схем обычно принимается линейная зависимость между приращением сопротивления в одном из плечей моста и его выходным сигналом. Такое допущение приводит к погрешности, которая может достигать $\pm 1\%$ и более при номинальной деформации тензорезистора. В данной программе в процедуре определения приращения сопротивления ΔR тензорезистора заложено нелинейное выражение для преобразования выходного сигнала по каждому каналу измерения деформации:

$$\Delta R = R_0 \frac{4\Delta U/U_{ext}}{1 - 2\Delta U/U_{ext}}, \quad (1)$$

где R_0 – начальное сопротивление тензорезистора; ΔU – приращение выходного напряжения полумоста; U_{ext} – напряжение питания полумоста.

Деформацию ε по каждому каналу измерения определяли по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{KR_0}, \quad (2)$$

где K – коэффициент тензочувствительности используемых тензорезисторов.

К дополнительным возможностям программы PMX-TEST-Monitor можно отнести наличие функции имитации изменения измеряемых параметров во времени. Это позволяет протестировать работу программы, а также выявить и исключить вероятные ошибки представления данных во всем диапазоне изменения измеряемых параметров.

Заключение. Созданы многофункциональная информационно-измерительная система PMX-TEST и соответствующее программное обеспечение PMX-TEST-Monitor, которые реализуют точное измерение различных физических величин: деформаций, температур, величин нагружения (усилие, давление), цифровое и графическое представление экспериментальных данных в режиме реального времени, их накопление и сохранение для последующей обработки. Система предназначена для оснащения стендов и установок при проведении испытаний на прочность моделей и элементов конструкций из композиционных материалов.

Резюме

Описано багатофункціональну інформаційно-вимірнювальну систему PMX-TEST для оснащення стендів і установок при проведенні випробувань на міцність моделей та елементів конструкцій з композиційних матеріалів. Система забезпечує багатоканальне вимірювання деформації, тиску і температури. Розроблено відповідне програмне забезпечення PMX-TEST-Monitor, що дозволяє зображувати в цифровому і графічному вигляді експериментальні дані, здійснювати їх накопичення і збереження для подальшої обробки.

1. *Composites: Materials of the Future. Part 10: Composites in Aeronautics*: <http://www.pluscomposites.eu/sites/default/files/Technical-articles-chapter-10-EN.pdf>.
2. *Дегтярев А. В., Коваленко В. А., Потапов А. М.* Применение композиционных материалов при создании перспективных образцов ракетной техники // *Авиац.-косм. техника и технология*. – 2012. – № 2. – С. 34–38.

3. *Gibson R. F. Principles of Composite Material Mechanics.* – McGraw Hill, Inc., 1994. – 425 p.
4. *Дегтярев А. В., Потапов А. М.* Исследование свойств углепластиковых сотовых структур для легковесных конструкций ракетно-космического назначения // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2012. – № 3. – С. 20–26.
5. *Гусарова И. А., Коваленко В. А., Кондратьев А. В., Потапов А. М.* Отработка технологии изготовления и испытания опытных образцов тепловых экранов для космических аппаратов // Авиац.-косм. техника и технология. – 2013. – № 2. – С. 14–20.
6. *Санин А. Ф., Потапов А. М., Коваленко В. А. и др.* Исследование напряженно-деформированного состояния композитного корпуса типового ракетного двигателя твердого топлива с металлическими закладными элементами в полюсных областях // Вопр. проектирования и пр-ва конструкций летательных аппаратов // Сб. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского “ХАИ”. – 2016. – Вып. 1 (85). – С. 36–46.
7. *Данильчук Е. Л., Кучер Н. К., Кушнарев А. П. и др.* Деформирование и прочность однонаправленных углепластиков при повышенных температурах // Пробл. прочности. – 2015. – № 4. – С. 75–81.
8. *PMX Data Acquisition and Control System:* <http://www.hbm.com/en/2981/pmx-signal-conditioner-for-use-in-production/>.
9. *Welcome to Telnet.org:* <http://www.telnet.org/>.
10. *Modbus Tools for Test, Simulation and Programming:* <http://www.modbustools.com/modbus.html>.

Поступила 04. 10. 2016