

В. И. Смыслов, Ю. И. Бражников, П. А. Филиппович, С. А. Гурова

АНАЛИЗ И ВЫБОР ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В СИСТЕМАХ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ЖИДКОСТНЫХ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

V. I. Smyslov, Yu. I. Brazhnikov, P. A. Filippovich, S. A. Gurova

ANALYSIS AND SELECTION OF TEMPERATURE METERS IN EMERGENCY PROTECTION SYSTEMS FOR LIQUID JET ENGINES

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Проведен анализа требований к измерителям температуры для применения в системах аварийной защиты для жидкостных реактивных двигателей. Обосновано применение для этих целей термоэлектрических преобразователей. Показано, что основными требованиями для них, помимо измерения высокой температуры, является совмещение в них противоречивых характеристик по высокому быстродействию и повышенной массе, вытекающей из требований по повышенной механической прочности и устойчивости. **Материалы и методы.** Для более полного удовлетворения требований САЗ ЖРД предложено использовать термоэлектрические термопреобразователи с чувствительным элементом (ЧЭ) переменного сечения, имеющим повышенное быстродействие при сохранении высокой механической прочности и устойчивости. **Результаты.** Проанализированы типовые конструкторско-технологические решения термоэлектрических преобразователей, используемых на сегодняшний день в САЗ ЖРД. Показано, как улучшить их основные технические характеристики в условиях сверхнапряженных эксплуатационных факторов. **Выводы.** Предложено и обосновано конструкторско-технологическое решение термоэлектрического термопреобразователя с ЧЭ переменного сечения, которое было реализовано на практике. Приведены результаты испытаний, показавшие двукратное увеличение быстродействия без уменьшения механической прочности и устойчивости.

A b s t r a c t. Background. An analysis of the requirements for temperature meters for use in the emergency protection systems for liquid jet engines is carried out. The use of thermoelectric converters for these purposes is justified. The indicators confirming the presence of high temperatures are contradictory characteristics due to the high requirements for speed and weight. **Materials and methods.** To better meet the requirements of the SAP LRE, it is proposed to use thermoelectric thermal converters with a sensitive element of variable cross-section, which has increased speed while maintaining high mechanical strength and stability. **Results.** The typical design and technological solutions of thermoelectric converters used today in the SAP LRE are analyzed. It is shown how to improve their basic technical characteristics in the conditions of over-stressed operational factors. **Conclusions.** A design and technological solution of a thermoelectric thermoconverter with ch.e. is proposed and justified. variable section, which was implemented in practice. The test results are shown, which showed a twofold increase in speed without reducing mechanical strength and stability.

К л ю ч е в ы е с л о в а: ракетно-космическая техника, датчико-преобразующая аппаратура, термопарный кабель, инерционность.

К e y w o r d s: rocket and space technology, sensor-converting equipment, thermocouple cable, lag.

Одной из актуальных задач измерения температуры при обработке и эксплуатации изделий ракетно-космической техники (РКТ) является задача измерения температуры в системах аварийной защиты (САЗ) жидкостных реактивных двигателей (ЖРД). Актуальность задачи обусловлена тем, что на сегодняшний день наиболее информативным параметром, на основании которого можно судить о нахождении ЖРД в аварийном режиме, предшествующем его возгоранию и разрушению, является температурная нестабильность и возникновение пульсаций пламени ЖРД.

В связи с необходимостью измерения температуры пламени ЖРД (превышает 1000 °С) в настоящее время безальтернативным видом измерителей температуры в практике разработки САЗ являются термоэлектрические преобразователи. При этом оптимизация конструкторско-технологических решений таких термопреобразователей представляет собой весьма нетривиальную техническую задачу, что обусловлено необходимостью реализации в них ряда противоречивых требований, помимо стойкости к высоким температурам. В первую очередь, это необходимость сочетания высокого быстродействия (инерционность не более десятков миллисекунд и, соответственно, минимальных массогабаритных характеристик), а также повышенной прочности и устойчивости к воздействию механических, газодинамических (вибрация до нескольких тысяч м/с², скоростной напор до сотен м/с) и прочих факторов.

Как известно [1–3], принцип действия термоэлектрических термопреобразователей (ТТ) основан на использовании термоэлектрического эффекта, при котором в месте контакта двух разнородных проводников-термоэлектродов, составляющих термопару, возникает термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС), которая пропорциональна температуре термоспая. Термо-ЭДС не зависит от длины, диаметра и удельного сопротивления термоэлектродов.

В общем виде термопарные кабели, составляющие основу чувствительных элементов датчика температуры, состоят из металлической оболочки и двух (или более) термоэлектродных жил, изолированных друг от друга [4, 5]. На рис. 1 представлена конструкция термопарного кабеля с рабочим спаем, оболочкой и двумя термоэлектродами.

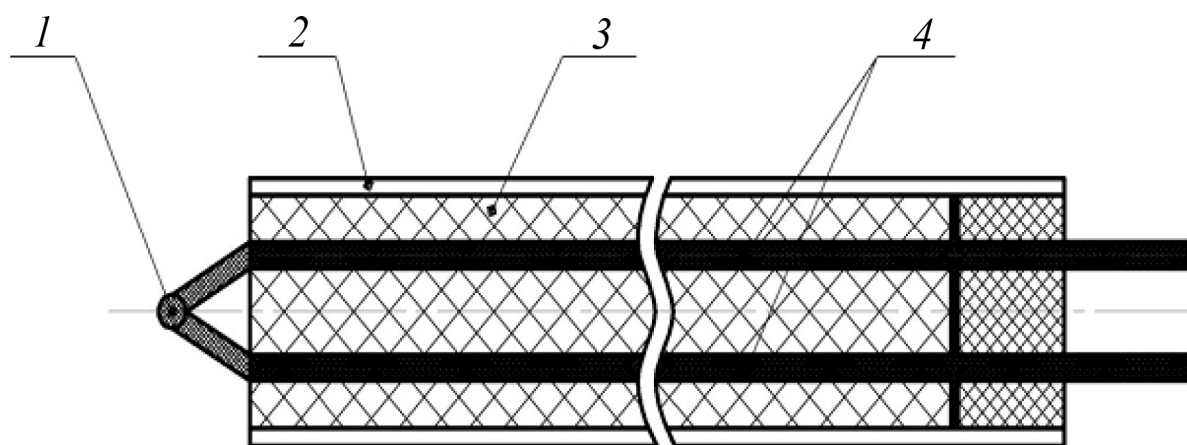


Рис. 1. Типовая конструкция ЧЭ термоэлектрического термопреобразователя:
1 – рабочий спай; 2 – оболочка; 3 – изоляция; 4 – термоэлектроды

Для такого термоэлектрического термопреобразователя с хромель-алюмельными термоэлектродами известна зависимость инерционности в зоне рабочего спаия от его сечения и диаметра термоэлектродов (табл. 1) [6].

Таблица 1

Время установления теплового равновесия хромель-алюмельных термоэлектрических термопреобразователей

Диаметр термоэлектродов, мм	Диаметр рабочего спаи, мм	Время до установления теплового равновесия, с
0,5	1	0,6–0,8
1,2	2,4	1,20–1,6
1,5	3,0	1,6–2,1

При этом для САЗ ЖРД наибольшее распространение получили термоэлектрические преобразователи на основе следующих конструктивно-технологических исполнений:

- кабель однозонный термопреобразователь круглого постоянного сечения с изолированным рабочим спаем (рис. 2);
- кабель круглого сечения с утоненным рабочим участком (рис. 3);
- кабель с плоским рабочим участком (рис. 4);
- кабель многозонный (рис. 5).

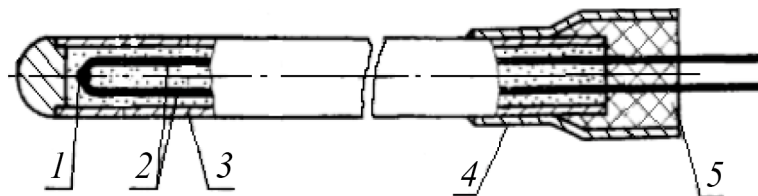


Рис. 2. Термоэлектрический термопреобразователь на основе однозонного термокабеля круглого постоянного сечения с изолированным рабочим спаем:

1 – рабочий спай; 2 – термоэлектроды; 3 – оболочка; 4 – втулка; 5 – герметик

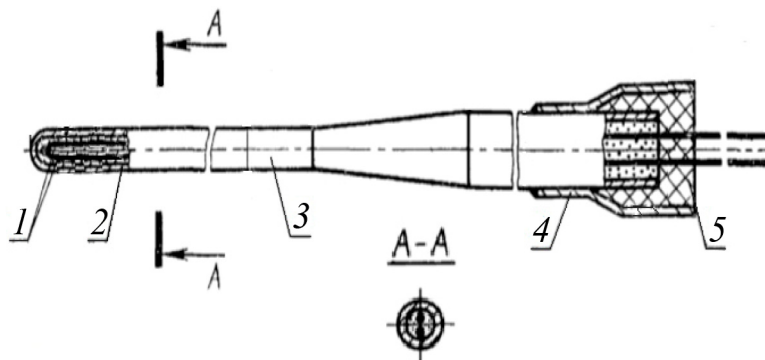


Рис. 3. Термоэлектрический термопреобразователь на основе однозонного кабеля круглого сечения с утоненным рабочим участком:

1 – термоэлектроды; 2 – оболочка; 3 – утоненный участок; 4 – втулка; 5 – герметик

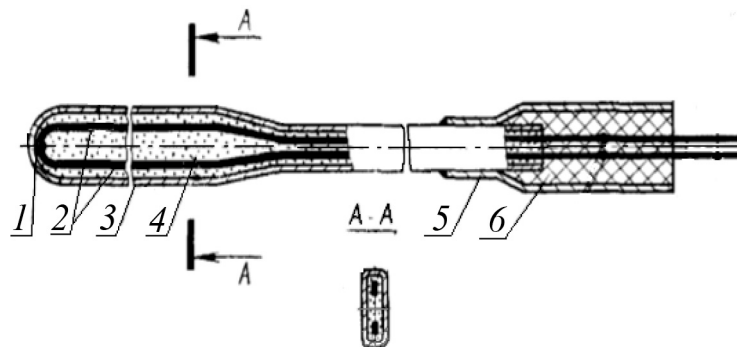


Рис. 4. Термоэлектрический термопреобразователь на основе однозонного кабеля круглого сечения с плоским рабочим участком:

1 – рабочий спай; 2 – термоэлектроды; 3 – оболочка; 4 – изоляция; 5 – втулка; 6 – герметик

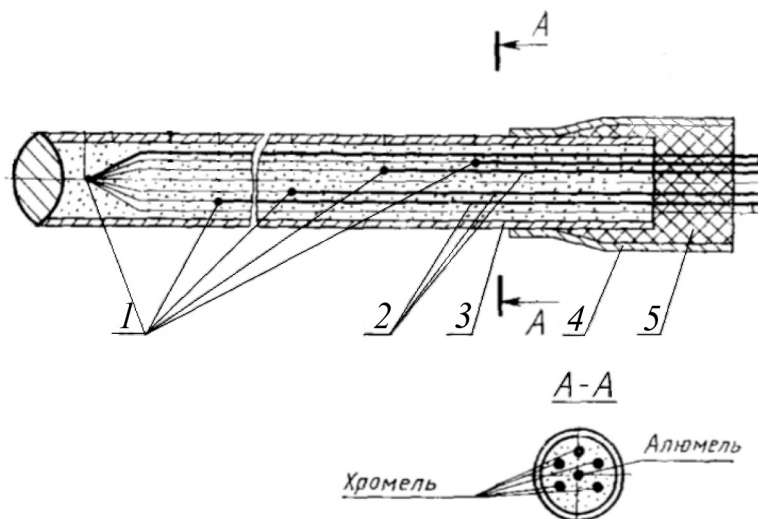


Рис. 5. Термоэлектрический термопреобразователь на основе многозонного кабеля круглого сечения:
1 – рабочий спай; 2 – термоэлектроды; 3 – оболочка; 4 – втулка; 5 – герметик

Очевидно, что вышеуказанные термоэлектрические термопреобразователи не в полной степени отвечают требованиям применения в САЗ ЖРД, так как не позволяют оптимизировать сочетание по инерционности и прочности. Указанное объясняется тем, что повысить прочностные характеристики можно за счет увеличения диаметра термоэлектродов и оболочки, однако это приведет к увеличению инерционности. С другой стороны, уменьшение диаметра термоэлектродов и оболочки приводит к уменьшению инерционности, но одновременно снижается прочность, что является недопустимым по условиям эксплуатации в РКТ.

Для разрешения указанного противоречия предлагается использование термоэлектрических термопреобразователей на основе термопарного кабеля типа КТМС (подходит по требованию температурного диапазона измерения) с переменным сечением, что позволяет уменьшить инерционность за счет уменьшения массы горячего спая и сохранить прочностные характеристики (см. рис. 6).

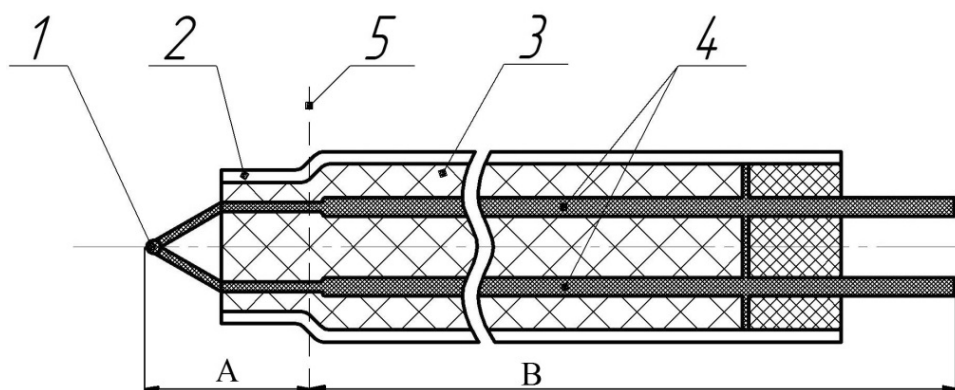


Рис. 6. Термоэлектрический термопреобразователь с переменным сечением на основе термопарного кабеля КТМС:

1 – рабочий спай; 2 – оболочка; 3 – изоляция; 4 – термоэлектроды; 5 – зона переменного сечения;
А – участок уменьшенного сечения; В – участок без изменения сечения

Преимуществом термопарных кабелей типа КТМС является возможность изготовления из них термоэлектрических термопреобразователей с переменным сечением при любых величинах длин разных по диаметру участков. В месте расположения рабочего спая термоэлектрический термопреобразователь может иметь минимальный диаметр.

Дополнительным преимуществом при внедрении термоэлектрических термопреобразователей с переменным сечением является возможность использования при их изготовлении нашедших уже на практике технологических приемов обработки кабельной продукции, кото-

рые все же требуют некоторой адаптации и усовершенствования применительно к кабелю КТМС.

Для изготовления термоэлектрического термопреобразователя на основе кабеля КТМС с переменным сечением на сегодняшний день наиболее перспективно использование холодного ротационного обжатия, так как по сравнению с другими способами обработки оно позволяет [5]:

- использовать полуую цилиндрическую заготовку;
- получить формоизменение изделия без разрушения;
- деформировать хрупкие материалы;
- произвести подачу изделия на глубину независимо от диаметра;
- получать высокую точность обработки;
- достигать высокую чистоту обработанной поверхности.

Сравнительные показатели обработки изделий методами ротационного обжатия, поперечной прокатки и свободнойковки и приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительные технико-экономические показатели обработки изделий методами ротационного обжатия, поперечной прокатки и свободнойковки

Наименование показателей	Ротационное обжатие		Поперечная прокатка		Свободнаяковка
	Температурный режим обработки				
	без нагрева	с нагревом	без нагрева	с нагревом	с нагревом
Диаметр исходной заготовки в мм: сплошной полый	0,3–60 1–120	1–250 1–320	До 10 До 20	5–250 5–250	До 2800 До 630
Отношение длины обработанного изделия к диаметру заготовки: наибольшее наименьшее	Неограниченное Неограниченное		50–24 1,4–0,8	50–24 1,4–0,8	Неогранич. Неогранич.
Точность обработки в классах	2–3	4–5	2–3	5–9	11–12
Чистота обработанной поверхности	▼8▼9	▼6▼7	▼6▼7	–	–
Экономия металла по отношению к механической обработке в %	До 50	До 50	До 40	До 40	До 15

Из табл. 2 следуют следующие преимущества ротационного обжатия без нагрева:

- диапазон исходного диаметра заготовки при ротационном обжатии шире, чем при поперечном прокате;
- ротационное обжатие позволяет использовать диаметр заготовки, независящий от длины обработанного изделия;
- высокая точность обработки, которая для случаев холодного обжатия соответствует 2–3-му, а для горячей 4–5-му классу. По сравнению со свободнойковкой на 9 классов точнее;
- чистота поверхности ротационного обжатия на единицу качественнее по сравнению с другими методами;
- по сравнению с поперечным прокатом экономия металла у ротационного обжатия на 10 % больше, а по сравнению со свободнойковкой – на 35 %.

Таким образом, выбранная технология холодного ротационного обжатия позволяет в наибольшей степени эффективно изготавливать термоэлектрические термопреобразователи с переменным сечением из термопарного кабеля КТМС для применения в системах САЗ ЖРД. Такое обжатие дает возможность формоизменения кабеля КТМС без разрушения до значительных степеней деформации при высокой точности полученных изделий без нагрева деталей [7].

Технологический процесс отличается простотой, экономичностью, возможностью получения как полуфабрикатов, так и готовых изделий.

Полученные для различных сечений термокабеля КТМС с переменным сечением значения сравнительного времени установления теплового равновесия приведены в табл. 3 [8].

Таблица 3

Сравнительное время установления теплового равновесия
для различных сечений термокабеля КТМС с переменным сечением

Диаметр термоэлектродов, мм		Диаметр рабочего сая, мм		Время до установления теплового равновесия, с	
Однозонный	Участок уменьшенного сечения	Однозонный	Участок уменьшенного сечения	Однозонный	Участок уменьшенного сечения
0,5	0,25	1	0,5	0,6–0,8	0,3–0,4
1,2	0,6	2,4	1,2	1,20–1,6	0,6–0,8
1,5	0,75	3,0	1,5	1,6–2,1	0,8–1,05

Из табл. 3 видно, что данный подход позволяет сохранить прочностные характеристики термоэлектрических термопреобразователей с переменным сечением на уровне типовой конструкции, так как кабель практически по всей длине остается неизменным. Время установления теплового равновесия при этом снижается в два раза.

Библиографический список

1. Фрайден, Дж. Современные датчики : справочник / Дж. Фрайден ; пер. с англ. Ю. А. Заболотной. – Москва : Техносфера, 2006. – 588 с.
2. Линеveg, Ф. Измерение температур в технике : справочник : пер. с нем. / Ф. Линеveg. – Москва : Metallurgiya, 1980. – 544 с.
3. Датчики : справочное пособие / В. М. Шарапов, Е. С. Полищук, Н. Д. Кошевой, Г. Г. Ишанин, И. Г. Минаев, А. С. Совлюков ; под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. – Москва : Техносфера, 2012. – 624 с.
4. Температурные измерения в ядерных реакторах / Б. В. Лысиков, В. К. Прозоров, В. В. Васильев, Д. Н. Попов, Л. Ф. Громов, Ю. В. Рыбаков. – Москва : Атомиздат, 1975. – 168 с.
5. Сучков, В. Ф. Жаростойкие кабели с магнизиальной изоляцией / В. Ф. Сучков, В. И. Светлова, Е. Е. Финкель. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 120 с.
6. Данишевский, С. К. Высокотемпературные термодары / С. К. Данишевский, Н. И. Сведе-Швец. – Москва : Metallurgiya, 1977. – 232 с.
7. Оборудование для производства : каталог продукции. – URL: http://prom.globatek.ru/metal_pressure/rotary_forging/ (дата обращения: 21.02.2017).
8. Филиппович, П. А. Метод снижения инерционности термодарного кабеля КТМС на основе кабеля переменного сечения для повышения надежности в авиационной и ракетно-космической технике / П. А. Филиппович, С. А. Гурова // Информационно-технологический вестник. – 2019. – № 2 (20). – С. 65–71.
9. Радюченко, Ю. С. Ротационная ковка / Ю. С. Радюченко. – Москва : ГНТИ Машлит, 1962. – 188 с.
10. Шаповал, А. Н. Интенсивные процессы обработки давлением вольфрама и молибдена / А. Н. Шаповал, С. М. Горбатюк, А. А. Шаповалов. – Москва : Руда и Металлы, 2006. – 351 с.

References

1. Frayden Dzh. *Sovremennyye datchiki: spravochnik* [Modern sensors: reference]; transl. from English by Yu. A. Zabolotnaya. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 588 p. [In Russian]
2. Lineveg F. *Izmerenie temperatur v tekhnike: spravochnik : per. s nem.* [Temperature measurement in engineering: reference : transl. from German]. Moscow: Metallurgiya, 1980, 544 p. [In Russian]
3. Sharapov V. M., Polishchuk E. S., Koshevoy N. D., Ishanin G. G., Minaev I. G., Sovlyukov A. S. *Datchiki: spravochnoe posobie* [Sensors : a reference guide]. Moscow: Tekhnosfera, 2012, 624 p. [In Russian]
4. Lysikov B. V., Prozorov V. K., Vasil'ev V. V., Popov D. N., Gromov L. F., Rybakov Yu. V. *Temperaturnye izmereniya v yadernykh reaktorakh* [Temperature measurements in nuclear reactors]. Moscow: Atomizdat, 1975, 168 p. [In Russian]

5. Suchkov V. F., Svetlova V. I., Finkel' E. E. *Zharostoykie kabeli s magnezial'noy izolyatsiey* [Heat-resistant cables with magnesia insulation]. 2nd ed., rev. and suppl. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 120 p. [In Russian]
6. Danishevskiy S. K., Svede-Shvets N. I. *Vysokotemperaturnye termopary* [High temperature thermocouples]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 232 p. [In Russian]
7. *Oborudovanie dlya proizvodstva : katalog produktisii* [Production equipment : product catalog]. Available at: http://prom.globatek.ru/metal_pressure/rotary_forging/ (accessed Febr. 21, 2017). [In Russian]
8. Filippovich P. A., Gurova S. A. *Informatsionno-tekhnologicheskii vestnik* [Information and technological Bulletin]. 2019, no. 2 (20), pp. 65–71. [In Russian]
9. Radyuchenko Yu. S. *Rotatsionnaya kovka* [Rotary forging]. Moscow: GNTI Mashlit, 1962, 188 p. [In Russian]
10. Shapoval A. N., Gorbatyuk S. M., Shapovalov A. A. *Intensivnye protsessy obrabotki davleniem vol'frama i molibdena* [Intensive pressure treatment processes for tungsten and molybdenum]. Moscow: Ruda i Metally, 2006, 351 p. [In Russian]

Смыслов Владимир Иванович

кандидат технических наук,
главный конструктор по направлению,
Научно-производственное объединение
измерительной техники
(Россия, г. Королев, ул. Пионерская, 2)
E-mail: vladismyslov@yandex.ru

Smyslov Vladimir Ivanovich

candidate of technical sciences,
chief designer in the direction,
Scientific-production association measuring
equipment
(2 Pionerskaya street, Korolev, Russia)

Бражников Юрий Иванович

кандидат технических наук, ведущий инженер,
Центральный научно-исследовательский институт
машиностроения
(Россия, г. Королев, ул. Пионерская, 4)
E-mail: mksagro08@mail.ru

Brazhnikov Yuriy Ivanovich

candidate of technical sciences, leading engineer,
Central Research Institute for Machine Building
(4 Pionerskaya street, Korolev, Russia)

Филиппович Павел Алексеевич

главный технолог,
Научно-производственное объединение
измерительной техники
(Россия, г. Королев, ул. Пионерская, 2)
E-mail: phill07@bk.ru

Filippovich Pavel Alekseevich

chief technologist,
Scientific-production association measuring
equipment
(2 Pionerskaya street, Korolev, Russia)

Гурова Светлана Александровна

магистрант,
Российский университет дружбы народов
(Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6);
инженер,
Научно-производственное объединение
измерительной техники
(Россия, г. Королев, ул. Пионерская, 2)
E-mail: phill07@bk.ru

Gurova Svetlana Aleksandrovna

mastergraduate student,
Peoples' Friendship University of Russia
(6 Miklukho-Maklaya street, Moscow, Russia);
engineer,
Scientific-production association measuring
equipment
(2 Pionerskaya street, Korolev, Russia)

Образец цитирования:

Смыслов, В. И. Анализ и выбор измерителей температуры в системах аварийной защиты для жидкостных реактивных двигателей / В. И. Смыслов, Ю. И. Бражников, П. А. Филиппович, С. А. Гурова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 1 (31). – С. 28–34. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-4.