



2.5.6 – технология машиностроения

**МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ
ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ФИЛЬТРУЮЩИХ
ЭЛЕМЕНТОВ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

**METHODS OF OBTAINING SMALL
DIAMETER HOLES IN THE
MANUFACTURING OF ROCKET
ENGINE FILTER ELEMENTS**

Рязанцева Елена Александровна,
магистрант кафедры технологии машино-
строения, Воронежский государственный
технический университет, г. Воронеж,
e-mail: alenkasea@ro.ru

Ryazantseva Elena Aleksandrovna,
master's student of the department of mechanical
engineering technology, Voronezh state technical
university, Voronezh, e-mail: alenkasea@ro.ru

✉¹ **Кириллов Олег Николаевич**,
д.т.н., профессор, профессор кафедры
технологии машиностроения, Воронежский
государственный технический университет,
г. Воронеж, e-mail: kirillov.oli@yandex.ru

✉¹ **Kirillov Oleg Nikolaevich**,
doctor of engineering sciences, professor, professor
of the department of mechanical engineering technol-
ogy, Voronezh state technical university, Voronezh,
e-mail: kirillov.oli@yandex.ru

Кадырметов Анвар Минирович,
д.т.н., доцент, заведующий кафедрой машино-
строительных технологий, Воронежский гос-
ударственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж,
e-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

Kadyrmetov Anvar Minirovich,
doctor of technical sciences, sciences, associate
professor, head of the department of mechanical
engineering technologies, Voronezh state forestry
university named after G.F. Morozov, Voronezh,
e-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены методы получения отверстий в металлических фильтрах различных типоразмеров. Раскрыта специфика применения электроэрозионного и электронно-лучевого методов обработки при прошивке отверстий. Представлены пути обеспечения качества поверхностного слоя деталей в процессе изготовления фильтрующих элементов жидкостных ракетных двигателей. В соответствии с рассматриваемыми в работе методами обработки выполнены исследования параметров шероховатости изготовленных отверстий на образце-имитаторе и гидравлических характеристик фильтрующего элемента при постоянном расходе рабочей среды.

Annotation. The methods for producing holes in metal filters of various sizes are considered. The specifics of using electrical discharge and electron beam processing methods for punching holes are disclosed. The ways of ensuring the quality of the surface layer of parts in the process of manufacturing filter elements of liquid rocket engines are presented. In accordance with the processing methods considered in the work, the roughness parameters of the holes made on a sample simulator and the hydraulic characteristics of the filter element at a constant flow rate of the working medium are studied.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА, ФИЛЬТРУЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ, ОТВЕРСТИЯ МАЛОГО ДИАМЕТРА, ДВИГАТЕЛЬ, ШЕРОХОВАТОСТЬ.

Keywords: ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING, FILTER ELEMENT, SMALL DIAMETER HOLES, ENGINE, ROUGHNESS.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Современная авиационно-космическая техника отличается использованием сложных конструкторских решений, увеличением требований к точности и качеству изготовления деталей и сборочных единиц, входящих в состав изделия [1], повышению долговечности их работы, сокращению себестоимости. Создание современных изделий авиационно-космической техники повышает требования к точности и качеству их изготовления. Большая часть аппаратов космической техники работают при постоянном воздействии знакопеременных нагрузок, высоких и низких температур, газа и жидкого водорода. Условия эксплуатации составных элементов изделия усложняются, увеличивается величина удельной нагрузки на структуру материалов и самого изделия.

Требования к окончательной обработке изготавливаемых поверхностей наукоемких изделий, включающие повышенную точность, качество и достижение заданных технологических параметров, относятся к числу наиболее важных при внедрении современной технологии изготовления [2]. Исследование новых способов производства современной авиационно-космической техники считается первостепенной задачей для совершенствования технологий в машиностроительной отрасли. Изделия, являющиеся составной частью ракетных двигателей, используются при многоцикловых, знакопеременных нагрузках, в условиях возникновения кавитации и пульсации повышенных рабочих давлений, при высоком воздействии агрессивных сред. Одним из важных элементов таких изделий являются различные фильтры.

2 Материалы и методы

Качество изготовления фильтров в значительной степени оказывает воздействие на технические характеристики изделий, так как им приходится эксплуатироваться в чрезвычайно сложных условиях в составе жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Местные повреждения поверхностного слоя фильтрующего элемента возникают вследствие высокой стационарной разницы температуры и наличия жидкого водорода или газообразной среды при эксплуатации. Использование усовершенствованных процессов при изготовлении фильтрующих элементов должно предотвращать появление таких повреждений на их поверхностях при эксплуатации. Принимая во внимание химические характеристики составляющих компонентов топлива (горючего и его окислителя), широкое распространение получили фильтрующие элементы из листового металла с большим числом отверстий маленького диаметра. На рис. 1 представлены примеры фильтрующих элементов.

Важнейшим параметром фильтра является его производительность при постоянном гидравлическом сопротивлении магистралей, которая, в свою очередь, зависит от качества изготовления поверхностей отверстий фильтра, полученных при его обработке.

Прочность фильтрующего элемента должна превосходить значения возникающих при разнообразных нагрузках напряжений, иметь возможность выдерживать возникающие ударные и вибрационные нагрузки. При изготовлении элементов фильтров обязательным требованием является обеспечение заданной чистоты наружной поверхности и внутренних полостей, соответствия отверстий требованиям чертежа, на кромках отверстий должны отсутствовать заусенцы, сами отверстия необходимо изготавливать правильной формы. Проверка соответствия фильтрующих элементов заданным параметрам производительности осуществляется при проведении прочностных испытаний. Испытания проводятся при стандартных условиях: рабочей средой является вода, назначается промежуток времени, в течение которого задаётся её расход и противодействие. В результате на входе и на выходе фильтра возникает необходимая разница давления. По завершении проведённых испытаний целостность фильтрующего элемента должна быть сохранена. Результаты проливки заносятся в протокол. Получение заданного качественного поверхностного слоя отверстий и элементов фильтров обеспечит стабилизацию процесса работы готового изделия и увеличит технологические параметры системы.



Рисунок 1 – Примеры конструкций применяемых фильтров

Отверстия малых диаметров получают различными способами: механической обработкой, электрофизическими и электрохимическими методами. Наиболее распространёнными методами обработки отверстий малого диаметра в фильтрующих элементах для ЖРД являются электрофизические и электрохимические методы. При этом электрохимическая обработка имеет недостаток, заключающийся в возможности качественной обработки на небольшую глубину изготавливаемого отверстия, не более 1 мм, [3]. Поскольку значительная часть фильтрующих элементов имеют толщину обрабатываемого листа 1 мм и больше, то при их изготовлении применяют современные электроэрозионные и электроэрозионно-химические технологии получения отверстий, в том числе, с помощью многоэлектродных электродов-инструментов. К ним относят прошивку с наложением электрического поля и электроэрозионный способ, с помощью которых возможно изготавливать отверстия диаметром менее 0,2 мм. Традиционная обработка большого количества таких отверстий при изготовлении металлических фильтров лезвийным инструментом механическим способом делает этот процесс значительно более трудоёмким по времени, причём значительно возрастает количество бракованных изделий. Использование способа электроэрозионной прошивки для изготовления отверстий заданного малого диаметра на токопроводящих (металлических) заготовках из проката позволяет при заданной точности обработки повысить производительность операции за счёт возможности одновременной обработки большого числа отверстий и большой площади обрабатываемой заготовки в течение небольшого временного интервала. Износ инструмента при этом методе обработки меньше, что помогает снизить стоимость изготовления отверстий малого диаметра примерно на 20-70 % по сравнению с механическими методами.

Помимо плюсов электроэрозионный метод прошивки отверстий имеет и минусы. Большое количество отверстий в фильтрах является особенностью конструкции, что затрудняет эвакуацию продуктов разрушения и снижает скорость процесса. Появляется необходимость применения вибрации электродов-инструментов и принудительной перекачки или всасывания рабочей жидкости.

Известным прогрессивным методом прошивки отверстий малого диаметра является электронно-лучевой метод, который выполняется в автоматическом режиме на высокоскоростном электронно-лучевом перфораторе, например, фирмы Steigerwald (рис. 2), что обеспечивает получение заданных параметров технологической системы, облегчает труд оператора, повышает его производительность и улучшает качество выполнения операции. Обработка

осуществляется при помощи электронной пушки и основана на направленном удалении материала путём нагрева, плавления и испарением с использованием кинетической энергии быстро движущихся электронов. Электронно-лучевая обработка (ЭЛО) является высокопроизводительным процессом, обеспечивающим скорость обработки отверстия до 1 мм/с. Применение ЭЛО позволяет обрабатывать отверстия диаметром от 0,1 мм и менее с глубиной до 5 мм [4]. Производительность ЭЛО зависит от мощности электронного луча, геометрических размеров обрабатываемого участка заготовки, физико-механических характеристиках её материала, глубины обрабатываемых отверстий, точности по шагу между отверстиями. ЭЛО позволяет достигать минимальной перемычки между обрабатываемыми отверстиями [5]. При этом ЭЛО присущи следующие недостатки: переменный радиус скругления, невозможность получения отверстий с разной геометрической формой (лишь круглого сечения), образование грата, оплавление кромки отверстий, вследствие этого необходима доработка комбинированными методами с применением механической или электрохимической обработки. Применение ЭЛО экономически затратный процесс, так как выполняется в вакууме, при работе которого, происходят большие энергетические потери на работу насосов, создающих вакуум.

Вышеперечисленные недостатки вызывают необходимость применения комбинированных методов обработки (КМО), что обусловлено, в том числе, наличием оставшихся на поверхности отверстий частиц оплавленного материала, которые могут повлиять на гидравлические характеристики фильтров. Для их устранения используют КМО, основанные на соединении воздействия нескольких процессов в одном методе обработки [6]. Наиболее перспективны для использования в промышленности КМО, созданные на сочетании следующих воздействий: электроэрозионного, электрохимического и механического (обработка непрофилированным электродом-щеткой) [7]; электроэрозионного и электрохимического (электроэрозионная прошивка) [8]; электрохимического и механического (анодно-абразивная обработка) [8]; ультразвукового и механического (повышение производительности обработки лезвийным инструментом) [6]; электрохимического и ультразвукового (электромеханическое упрочнение; интенсификация процесса обработки) [8]. КМО позволяют получить заданные конструктивные требования к детали, традиционными способами обработки недостижимыми. При этом необходимым требованием к методу обработки является сохранение химического состава обрабатываемых материалов.



Рисунок 2 – Установка фирмы Steigerwald с многокоординатным ЧПУ для перфорирования плоских металлических заготовок электронным лучом

Для обработки отверстий фильтров представляет интерес применение метода эрозионно-химической прошивки. Данный метод обработки высоко производителен, время изготовления фильтров с толщиной стенки 1,5-2 мм уменьшается в несколько раз достигаемая точность и чистота обрабатываемой поверхности соответствуют предъявляемым требованиям.

3 Результаты исследований

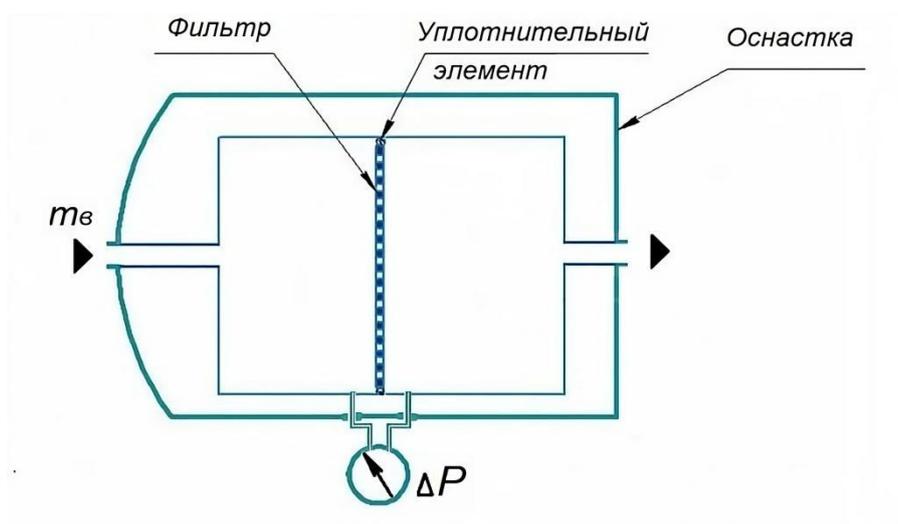
Испытания деталей, сборочных единиц ракетно-космической техники характеризуются повышенными требованиями по чистоте и защите внутренних полостей, разъемов и мест сопряжения от попадания посторонних веществ и объектов [9]. Пропускная способность фильтров и практическое состояние микроструктуры контактных поверхностей является основной характеристикой фильтрующих элементов при гидравлических испытаниях. С этой целью необходимо исследовать влияние шероховатости поверхностного слоя на характеристики фильтра. Для контроля соответствия характеристик фильтра предъявляемым требованиям, при проведении гидравлических испытаний, были использованы изготовленные опытные образцы, имеющие аналогичные исследуемому фильтру прочностные показатели.

Для изготовления образцов-имитаторов была выбрана заготовка из нержавеющей стали 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-72) с длиной 30 мм и диаметром 25 мм. В ней были обработаны 1827 отверстий $\varnothing 0,4$ мм.

С целью оценки влияния способа изготовления отверстий на гидравлические характеристики фильтрующих элементов на выбранных образцах-имитаторах отверстия выполнялись на одном образце электронно-лучевым способом, на втором электроэрозионным способом [10].

При использовании электроннолучевой обработки для изготовления отверстий вокруг них образуется нагар, который удаляется химическим способом. Для обеспечения необходимых свойств проливочных характеристик была проведена электрополировка внутренних и наружных поверхностей образца-иммитатора.

Испытания проводились на проливочном стенде с применением специальной технологической оснастки, выполненной в виде корпуса. Фильтрующий образец-имитатор размещали внутри корпуса. Образец-имитатор проливали при атмосферном противодавлении согласно заданной схеме, приведённой на рис. 3. Рабочей средой была выбрана и использована техническая вода.



m_b – расход вод; ΔP – перепад давления на фильтре

Рисунок 3 – Схема проливки фильтра

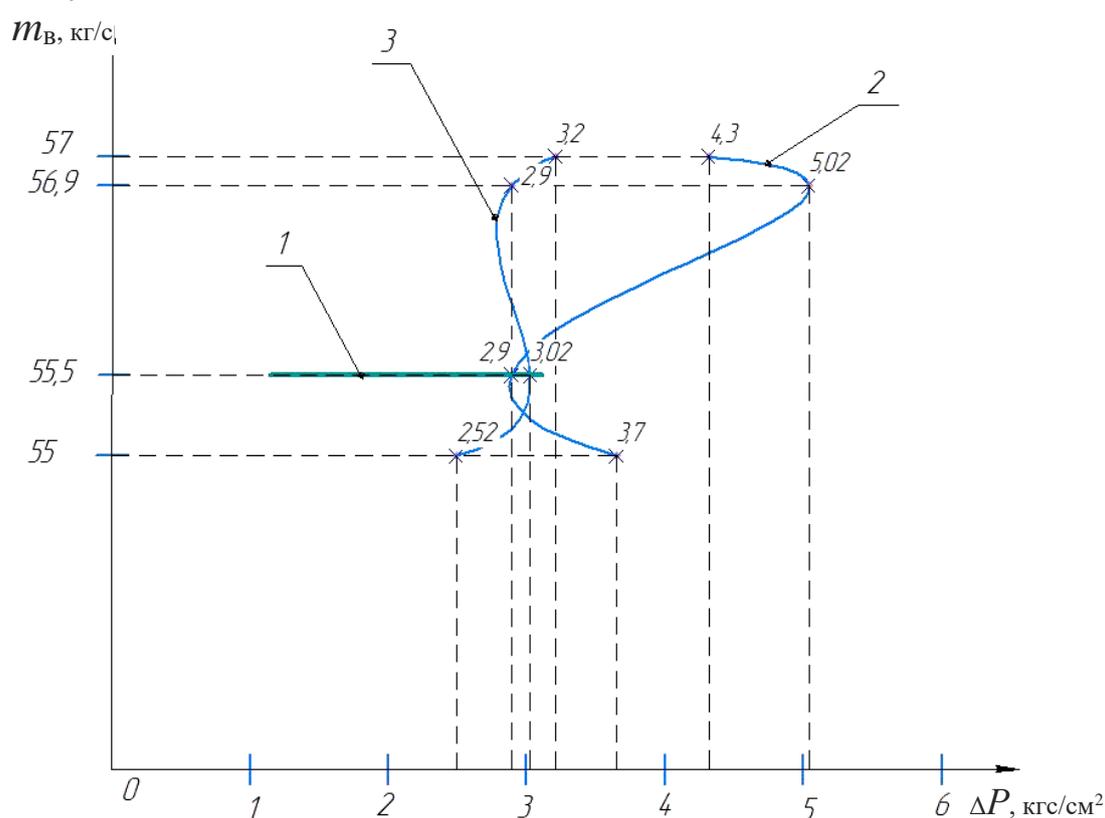
В соответствии с определенными расчетным путем характеристиками и на основании требований нормативной документации при гидравлическом испытании фильтра с определенным постоянным расходом воды $55,5 \pm 1,7$ кг/с, значение показателей гидравлического сопротивления фильтра (ΔP) должно укладываться в диапазоне 1,1 ... 3,1 кгс/см².

Результаты фактических параметров расхода воды при гидравлическом сопротивлении образцов-иммитаторов фильтра приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Фактические параметры замера расхода воды для двух методов прошивки отверстий

Номинальный расход воды, кг/с	Расчётная величина гидравлического сопротивления фильтра (ΔP), кгс/см ²	Фактическая величина гидравлического сопротивления фильтра (ΔP), кгс/см ²	
		Электронно-лучевая перфорация	Электроэрозионный способ получения отверстий
55	1,1-3,1	3,7	2,52
55,5		2,9	3,02
56,9		5,02	2,9
57		4,3	3,2

Замеры величины гидравлического сопротивления образцов-иммитаторов фильтра изготовленными методами электронно-лучевой перфорации и электроэрозионным способом производился по четыре раза. По результатам замеров построен график пролива (рис. 4).



1 – расчётное значение;

2 – для фильтра, изготовленного с применением электронно-лучевого способа;

3 – для фильтра, изготовленного с применением электроэрозионного способа

Рисунок 4 – Расходные характеристики пролива образцов-иммитаторов фильтра

4 Обсуждение и заключение

Представленные исследования обработки металлических фильтров комбинированными методами дают возможность сделать вывод о том, что использованный для прошивки отверстий метод электронно-лучевой обработки характеризуется высокой производительностью, однако достижение заданных параметров качества обрабатываемого поверхностного слоя заготовки не обеспечивается, и для его достижения необходимо использование специальной операции полирования.

В результате проведённых проливочных испытаний образцов-иммитаторов фильтра, представленных в табл. 1 и на рис. 6, можно сделать вывод о том, что образец-иммитатор фильтрующего элемента с отверстиями, для получения которых использовался способ электроэрозионной обработки, был изготовлен с более качественными проливочными характеристиками, приближенными к расчетным параметрам фильтра. Электроэрозионный способ получения отверстий в элементах фильтров изделий РКТ предпочтительнее электронно-лучевого способа.

Список литературы

- 1 O. N. Kirillov, A. Yu. Ryazantsev, Mechanism of finish machining by brush electrode, Voronezh State Technical University Bulletin, v.11 (5), pp. 8-13 (2015).
- 2 Справочник металлиста. В 5 т. / под ред. С. А. Чернавского, В. Ф. Рещикова. М.: Машиностроение, 1976. – Т.1. – 768 с.
- 3 Рязанцев А. Ю., Смоленцев Е. В., Грицюк В. Г., Широкожухова А. А., Обеспечение качества поверхностного слоя деталей при изготовлении отверстий в фильтрах ракетных двигателей // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – Т.15. – №5. – С. 111-115.
- 4 Fomin A. A., Gusev V. G., Sattarova Z. G. Geometrical errors of surfaces milled with convex and concave profile tools. In: Solid State Phenomena. – 2018. – vol. – 284. – pp. 281-288. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.281.
- 5 Смоленцев, Е. В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки, М.: Машиностроение. – Москва, 2005. – 511 с.
- 6 Смоленцев, В. П. Комбинированные методы обработки / В. П. Смоленцев, Е. В. Смоленцев, О. Н. Кириллов, А. В. Норман // Учебное пособие. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2024. – 120 с.
- 7 Кириллов, О. Н. Технология комбинированной обработки непрофилированным электродом: монография / О. Н. Кириллов. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2010. – 254 с.
- 8 Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Учеб. Пособие (в 2-х томах). Т. II. Под ред. В.П. Смоленцева. М.: Высшая школа, 1983. – 208 с.
- 9 Баженова, Т. Е. Разработка и внедрение оборудования и технологии для проведения криогенных испытаний специзделий / Т. Е. Баженова, С. С. Юхневич, А. Ю. Рязанцев // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2022. – № 3(77). – С. 133-138. – DOI 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.026. – EDN EWHXNE.
- 10 A. A. Shirokzhukhova, Y. V. Sharov, I. G. Starodubtsev, Non-traditional technologies for the production of metal filters used in engine aerospace industry, Modern Technology Bulletin. 2018. – № 1(9). – pp. 53-57. (in Russian).

References

- 1 O. N. Kirillov, A. Yu. Ryazantsev, Mechanism of finish machining by brush electrode, Voronezh State Technical University Bulletin, v.11 (5), pp. 8-13 (2015).
- 2 Metalworker's Handbook. In 5 volumes / edited by S. A. Chernavsky, V. F. Reshchikov. Moscow: Mashinostroenie, 1976. – Vol.1. – 768 p.
- 3 Ryazantsev A. Yu., Smolentsev E. V., Gritsyuk V. G., Shirokzhukhova A. A., Ensuring the quality of the surface layer of parts in the manufacture of holes in rocket engine filters // Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2019. – Vol.15. – No.5. – P. 111-115.

4 Fomin A. A., Gusev V. G., Sattarova Z. G. Geometrical errors of surfaces milled with convex and concave profile tools. In: Solid State Phenomena. – 2018. – vol. – 284. – pp. 281-288. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.281.

5 Smolentsev E. V. Design of electrical and combined processing methods, Moscow: Mechanical Engineering. – Moscow, 2005. – 511 p.

6 Smolentsev V. P. Combined processing methods / V. P. Smolentsev, E. V. Smolentsev, O. N. Kirillov, A. V. Norman // Study guide. – Voronezh: Publishing and Printing Center "Scientific Book", 2024. – 120 p.

7 Kirillov O. N. Technology of combined processing with a non-profiled electrode: monograph / O. N. Kirillov. Voronezh: State Educational Institution of Higher Professional Education "Voronezh State Technical University", 2010. – 254 p.

8 Electrophysical and electrochemical methods of materials processing. Textbook. Manual (in 2 volumes). T. II. Ed. V. P. Smolentsev. Moscow: Higher School, 1983. – 208 p.

9 Bazhenova, T. E. Development and implementation of equipment and technology for cryogenic testing of special products / T. E. Bazhenova, S. S. Yukhnevich, A. Yu. Ryazantsev // Scientific notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University. - 2022. - No. 3 (77). - P. 133-138. - DOI 10.34771 / UZ-CEPU.2022.77.3.026. - EDN EWHXNE.

10 A. A. Shirokzhukhova, Y. V. Sharov, I. G. Starodubtsev, Non-traditional technologies for the production of metal filters used in engine aerospace industry, Modern Technology Bulletin. 2018. – No. 1(9). – pp. 53-57. (in Russian).

© Рязанцева Е. А., Кириллов О. Н., Кадырметов А. М., 2024