

УДК 621.9.04

Разработка перспективной технологии изготовления закладных элементов с целью получения направляющих аппаратов турбонасосных агрегатов

А.Ю. Рязанцев¹, Е.В. Смоленцев¹, К.А. Устинов¹, Е.А. Рязанцева²¹ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»² АО «Конструкторское бюро химавтоматики»

Development of a promising technology for the embedded elements manufacture to obtain guide vanes for the turbopump units

A.Yu. Ryazantsev¹, E.V. Smolentsev¹, K.A. Ustinov¹, E.A. Ryazantseva²¹ Voronezh State Technical University² JSC Design Bureau of Chemical Automation

Изложены технологические проблемы изготовления направляющего аппарата турбонасосного агрегата жидкостных ракетных двигателей. Рассмотрены типы направляющих аппаратов и их конструктивные особенности. Описаны получившие наибольшее распространение в машиностроении способы изготовления направляющих аппаратов. Отмечены их преимущества и недостатки. Рассмотрена технология изготовления направляющих аппаратов турбонасосных агрегатов методом горячего изостатического прессования мелких гранул с использованием закладного элемента. Предложена перспективная технология изготовления изделий аэрокосмической отрасли с использованием электроэрозионной обработки, обеспечивающая высокую точность линейных размеров криволинейных поверхностей закладных элементов и позволяющая выполнять профильные диски с малыми межлопаточными каналами и тонкими кромками.

EDN: IBDZEW, <https://elibrary/ibdzew>

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, турбонасосный агрегат, направляющий аппарат, закладной элемент, средства технологического оснащения

The paper identifies technological problems in manufacture of a guide vane for the liquid propellant rocket engine turbopump unit. It considers types of the guide vanes and their design features and describes the most widely used methods of the guide vanes manufacture in mechanical engineering. Their advantages and disadvantages are noted. A method of manufacturing the turbopump unit guide vanes by hot isostatic pressing of small granules using the embedded element is analyzed. The paper proposes a promising technology in the aerospace products manufacture using the electrical discharge machining. It ensures high accuracy of the linear dimensions of the embedded elements curved surfaces and makes it possible to produce profile disks with small inter-blade channels and thin edges.

EDN: IBDZEW, <https://elibrary/ibdzew>

Keywords: liquid propellant rocket engine, turbopump unit, guide vane, embedded element, technological equipment

Жидкостный ракетный двигатель (ЖРД) — основной элемент ракеты-носителя, обеспечивающий ее запуск и управление. Их используют в различных космических аппаратах (от спутников до межпланетных зондов), что позволяет человечеству исследовать космос и расширять знания о Вселенной.

Цель работы — изучение перспективного метода изготовления направляющих аппаратов (НА) для совершенствования технологического процесса на предприятиях аэрокосмической техники.

В ЖРД подачу компонентов топлива (окислителя и горючего) выполняют насосы, приводимые во вращение газовой турбиной. Насосы с турбиной образуют единый комплексный энергетический узел — турбонасосный агрегат (ТНА), являющийся наиболее важным в обеспечении надежности и эффективности ЖРД [1, 2].

По параметрам и конструктивным особенностям ТНА подразделяют на агрегаты, которые выполнены по двум схемам: открытой и с дожиганием.

Отсутствие выброса газа в схеме с дожиганием позволяет увеличить удельный импульс ЖРД и существенно повысить мощность турбины, а также давление в камере сгорания. Применение открытой схемы обеспечивает наиболее оптимальное сочетание энергетических и массовых характеристик изделия.

Использование низкоперепадных реактивных турбин — отличительная особенность схемы с дожиганием, следствием применения которой стала более сложная конструкция ТНА [3]. Внешний вид ТНА, выполненного по схеме с дожиганием, показан на рис. 1.

Вследствие использования генераторного газа с избытком окислителя насосы горючего являются двухступенчатыми. Первая ступень служит для подачи основной массы горючего в камеру сгорания, вторая — для подачи незначительной части горючего в газогенератор. Учитывая требования по надежности агрегата, все основные детали насосов окислителя выполняют из высокопрочной нержавеющей стали и никелевых сплавов. В качестве материала деталей насосов горючего выступают титановые сплавы [4].

При проектировании насосов большой мощности используют НА. Они обеспечивают равномерную радиально-осевую симметрию течения потока после рабочего колеса (РК), что повышает прочность и надежность корпуса насоса. Без НА невозможно добиться равномерного распределения потока в ТНА. При неправильном течении жидкости возникают гидродинамические силы, отрицательно воздействующие на РК, и дополнительные нагрузки на подшипники насоса с валом [5].

НА оснащают специальным подводным устройством, предназначенным для перемеще-

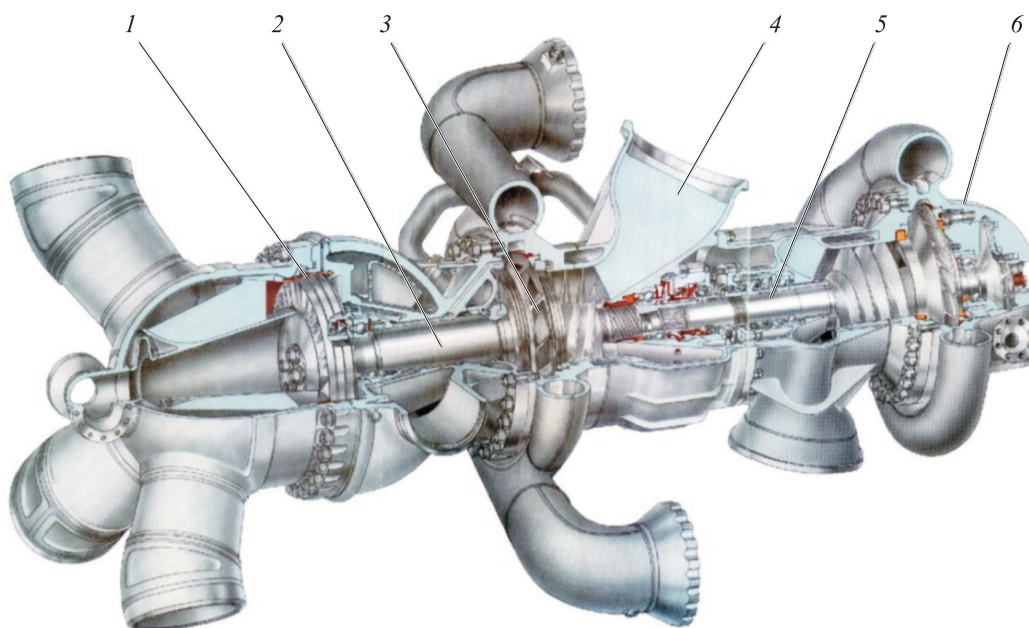


Рис. 1. Внешний вид ТНА, выполненного по схеме с дожиганием:
1 — турбина; 2 — вал; 3 — НА; 4 — насос окислителя; 5 — рессора; 6 — насос горючего

ния жидкости к входной полости ТНА. Подводящее устройство помогает равномерно осесимметрично распределить поток жидкости по входному каналу РК. При этом увеличивается гидравлический коэффициент полезного действия агрегата и всего насоса.

Симметричность вхождения окислителя или горючего в РК обеспечивает специальный канал, изготовленный в виде прямолинейного конфузора или спирального кожуха. В целях ускорения и повышения скорости подаваемой жидкостной среды проходное сечение канала сужают. Для выброса жидкости из рабочего агрегата с большой скоростью и уменьшения гидравлических потерь в насосном оборудовании используют специальный НА — отвод. При этом скорость выбрасываемой среды преобразовывается в давление. Отвод удаляет подаваемую жидкость от РК, не нарушая равномерного движения потока в агрегате [6, 7].

По конструктивным особенностям НА подразделяют на лопаточные прямоугольного сечения и лопаточные эллипсного сечения (трубчатые НА) [8].

Лопаточный НА прямоугольного сечения применяют в отводах мощных центробежных насосов ТНА ЖРД и многоступенчатых насосах высокого давления. Он состоит из двух дисков с профилированными лопатками между ними, которые отогнуты по направлению потока. Аппарат закреплен неподвижно в корпусе многоступенчатого насоса, РК и НА образуют одну ступень насоса.

Движение потока на выходе из РК характеризуется сильной неравномерностью поля течения жидкости, имеющей высокую инерционную скорость и сложную пространственную



Рис. 2. Внешний вид входных кромок отвода лопаточного НА прямоугольного сечения

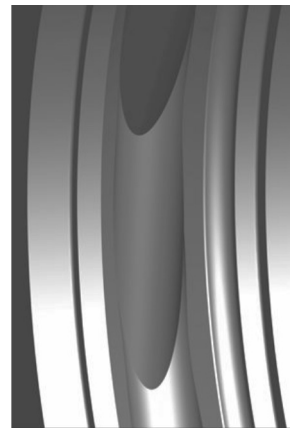


Рис. 3. Внешний вид входных кромок отвода трубчатого НА

структуру. Недостатком НА с каналами прямоугольного поперечного сечения является то, что в определенных режимах работы могут возникать вихри и зоны неравномерного течения потоков [9]. Внешний вид входных кромок отвода лопаточного НА прямоугольного сечения показан на рис. 2.

У каждого канала трубчатого НА есть индивидуальный отвод на выходе. В отличие от лопаточного НА, входные кромки круглого сечения имеют эллипсный пространственный контур, который образуется пересечением двух цилиндрических каналов. Такая форма входной кромки обеспечивает более плавное течение потока и более оптимальна, чем кромки прямоугольной формы. Эллипсный контур канавки препятствует возникновению каверн и кавитационной эрозии. Недостатком трубчатого НА является сложность изготовления каналов [10]. Внешний вид входных кромок отвода трубчатого НА показан на рис. 3.

В зависимости от назначения и технологии производства НА подразделяют на два типа.

НА первого типа состоит из двух дисков — переднего и заднего. Заготовки для такого НА получают методом отливки. После обработки, детали соединяют и фиксируют путем сварки или пайки. Недостаток НА первого типа заключается в сложности обеспечения точности геометрических размеров проточных каналов. При этом практически невозможно получить точные размеры лопаток сложного профиля.

НА второго типа отливают целиком, а пространство между лопатками формируют путем механической обработки или с помощью специальных литевых вставок. Недостатками такой конструкции являются низкая технологич-

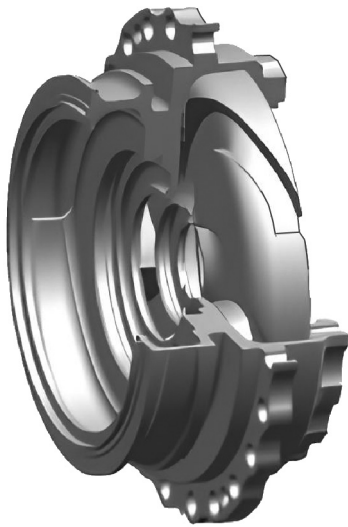


Рис. 4. Внешний вид типового НА ТНА

ность изделия и сложность получения точной формы канала, так как вставки состоят из множества разъемных деталей [11, 12].

Внешний вид типового НА ТНА показан на рис. 4.

На основании проведенного анализа можно заключить, что при изготовлении НА центробежных многоступенчатых насосов имеются следующие основные проблемы:

- невозможность точного копирования профилей лопаток в прессовой или литейной форме для получения расчетных геометрических параметров проточных каналов;
- трудноуправляемый процесс сварки и пайки при соединении покрывного и лопастного дисков;
- низкая технологичность производственного процесса.

На отечественных машиностроительных предприятиях для обеспечения точной формы и геометрических размеров НА используют механическую обработку. В качестве окончательной обработки выступают следующие нетрадиционные методы: электроэрозионная (ЭЭО), электрохимическая и лазерная обработка. Рассматриваемые методы, эффективно применяемые для обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов со сложным профилем, обеспечивают получение заданных в нормативной документации параметров шероховатости поверхности.

На машиностроительном предприятии разработан современный способ изготовления НА методом горячего изостатического прессования

мелких гранул. Этот метод включает в себя горячее изостатическое прессование мелких гранул в газонепроницаемых формах (капсулах). Для формирования профиля каналов НА изготавливают специальный закладной элемент с учетом возможных усадок при прессовании [13]. Внешний вид закладного элемента показан на рис. 5.

Чтобы обеспечить точные геометрические размеры криволинейных поверхностей закладного элемента, для окончательной обработки профиля заготовки используют электроэрозионный процесс. Применение механических методов для получения сложного профиля деталей из труднообрабатываемых материалов является нецелесообразным, так как для лезвийной обработки требуется дорогостоящий специальный инструмент, а также проектирование и изготовление сложных средств технологического оснащения. Труднодоступность мест обработки вызывает необходимость в дополнительной оснастке, что увеличивает время подготовки производства при освоении изделия, а также требует дополнительных материальных и трудовых затрат.

Предварительную обработку закладного элемента выполняют механическим способом с использованием фрезерного обрабатывающего центра. Электрофизическая обработка происходит на специальном высокопроизводительном электроэрозионном станке.

Для ЭЭО специалистами машиностроительного предприятия разработан и внедрен в производство специальный сложнопрофильный электрод (рис. 6). В качестве материала заготовки электрода использована медь, обладающая необходимыми физическими свойствами:

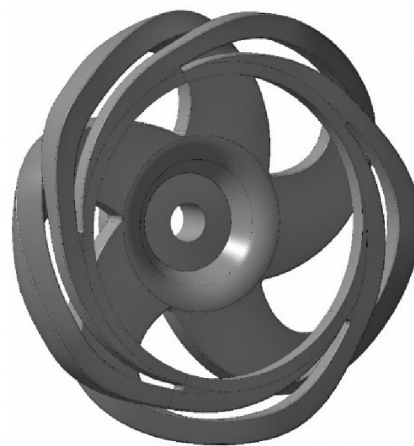


Рис. 5. Внешний вид закладного элемента



Рис. 6. Внешний вид электрода

хорошей электропроводностью, механической прочностью и эрозионной стойкостью.

Рабочая часть электрода соответствует профилю обрабатываемой поверхности детали с учетом необходимых технологических параметров. Электрофизические методы обработки характеризуются высокой производительностью. Их часто используют в машиностроении для получения изделий из труднообрабатываемых материалов, в конструкции которых предусмотрены криволинейные поверхности с высокими требованиями к точности геометрических размеров [14, 15].

Литература

- [1] Иванов А.В., Мелентьев В.С., Гвоздев А.С. Проектирование турбонасосного агрегата ЖРД. Самар. нац. исслед. ун-т им. С.П. Королева (Самар. ун-т). Самара. Изд-во Самар. ун-та, 2017.
- [2] Иванов В.К., Кашкаров А.М., Ромасенко Е.Н. и др. Турбонасосные агрегаты ЖРД конструкции НПО Энергомаш. *Конверсия в машиностроении*, 2006, № 1, с. 15–21.
- [3] Дмитренко А.И., Иванов А.В. Турбонасосные агрегаты для водородных двигателей, разработанных КБХА. *Космонавтика*, 2011, № 2, с. 32–41.
- [4] Дмитренко А.И., Иванов А.В., Кравченко А.Г. и др. Разработка турбонасосных агрегатов для современных кислородно-керосиновых двигателей с дожиганием окислительного генераторного газа. *Космонавтика*, 2012, № 1–2, с. 42–49.
- [5] Воробей В.В., Логинов В.Е. *Технология производства жидкостных ракетных двигателей*. Москва, Изд-во МАИ, 2001. 495 с.
- [6] Иванов А.В., Белоусов А.И., Дмитренко А.И. *Турбонасосные агрегаты кислородно-водородных ЖРД*. Воронеж, ВГТУ, 2011. 283 с.
- [7] Иванов А.В. *Расчет и профилирование инекоцентрбежного насоса турбонасосного агрегата ЖРД*. Воронеж, ВГТУ, 2010. 120 с.
- [8] Ломакин А.А. *Центробежные и осевые насосы*. Москва-Ленинград, Машиностроение, 1966. 364 с.
- [9] Боровский Б.И. *Энергетические параметры и характеристики высокооборотных лопастных насосов*. Москва, Машиностроение, 1989. 181 с.

Основными преимуществами горячего изостатического прессования мелких гранул при изготовлении НА перед другими методами являются:

- изготовление деталей с высокой степенью однородности и изотропности механических свойств материала;
- получение механических свойств, превосходящих свойства деформированного материала.

Выводы

1. Предложен современный перспективный метод горячего изостатического прессования мелких гранул с применением ЭЭО. Разработан сложнопрофильный электрод для ЭЭО с целью получения окончательного профиля.

2. Предложенный метод обеспечивает требуемые геометрические параметры криволинейных поверхностей, а также позволяет изготавливать профильные диски с малыми межлопаточными каналами и тонкими кромками.

3. Метод горячего изостатического прессования мелких гранул был внедрен на отечественном машиностроительном предприятии, что позволило сократить время подготовки производства при освоении нового изделия и минимизировать трудовые и материальные затраты.

- [10] Рубинов В.Я., Покровский Б.В. Трубчатые направляющие аппараты для центробежных насосов. *Химическое и нефтяное машиностроение*, 1974, № 6, с. 6–8.
- [11] Валюхов С.Г., Житинев А.И., Давыденко А.Г. и др. *Направляющий аппарат центробежного насоса*. Патент РФ 2448279. Заявл. 26.05.2011, опубл. 20.04.2012.
- [12] Гилев В.Г., Рабинович А.И., Долгих А.В. и др. *Радиальный направляющий аппарат многоступенчатого погружного насоса*. Патент 2364755 РФ. Заявл. 27.12.2007, опубл. 20.08.2009.
- [13] Астрединов В.М., Бондаренко Т.В., Кочкин Е.В. и др. *Способ изготовления профильных дисков методом горячего изостатического прессования*. Патент 2649188 РФ. Заявл. 11.05.2016, опубл. 30.03.2018.
- [14] Смоленцев Е.В. *Проектирование электрических и комбинированных методов обработки*. Москва, Машиностроение, 2005. 511 с.
- [15] Смоленцев В.П., Болдырев А.И., Смоленцев Е.В. и др. *Средства технологического оснащения и оборудование для электрических методов обработки*. Воронеж, ВГТУ, 2017. 215 с.

References

- [1] Ivanov A.V., Melentyev V.S., Gvozdev A.S. *Proektirovanie turbonasosnogo agregata ZhRD* [Design of a turbo-pump unit of a liquid-propellant rocket engine]. Samara, Izd-vo Samar. un-ta, 2017. 206 p. (In Russ.).
- [2] Ivanov V.K., Kashkarov A.M., Romasenko E.N. et al. Turbo-driven pump sets of liquid-propellant rocket engines at NPO "Energomash". *Konversiya v mashinostroenii*, 2006, no. 1, pp. 15–21. (In Russ.).
- [3] Dmitrenko A.I., Ivanov A.V. Hydrogen engine turbopumps developed by KBKhA. *Kosmonavtika*, 2011, no. 2, pp. 32–41. (In Russ.).
- [4] Dmitrenko A.I., Ivanov A.V., Kravchenko A.G. et al. Development of turbopump units for modern oxygen-kerosene engines with afterburning of oxidative generator gas. *Kosmonavtika*, 2012, no. 1–2, pp. 42–49. (In Russ.).
- [5] Vorobey V.V., Loginov V.E. *Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Production technology of liquid rocket engines]. Moscow, Izd-vo MAI Publ., 2001. 495 p. (In Russ.).
- [6] Ivanov A.V., Belousov A.I., Dmitrenko A.I. *Turbonasosnye agregaty kislorodno-vodorodnykh ZhRD* [Turbopump units of oxygen-hydrogen LRDs]. Voronezh, VGTU Publ., 2011. 283 p. (In Russ.).
- [7] Ivanov A.V. *Raschet i profilirovanie shnekotsentrobezhnogo nasosa turbonasosnogo agregata ZhRD* [Calculation and profiling of the screw-centrifugal pump of the turbopump unit of the liquid-propellant rocket engine]. Voronezh, VGTU Publ., 2010. 120 p. (In Russ.).
- [8] Lomakin A.A. *Tsentrobezhnye i osevye nasosy* [Centrifugal and axial pumps]. Moscow-Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1966. 364 p. (In Russ.).
- [9] Borovskiy B.I. *Energeticheskie parametry i kharakteristiki vysokooborotnykh lopastnykh nasosov* [Energetic parameters and characteristics of high-speed vane pumps]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 181 p. (In Russ.).
- [10] Rubinov V.Ya., Pokrovskiy B.V. Tubular guiding apparatuses for centrifugal pumps.. *Khimicheskoe i neftyanoe mashinostroenie*, 1974, no. 6, pp. 6–8. (In Russ.).
- [11] Valyukhov S.G., Zhitinev A.I., Davydenko A.G. et al. *Napravlyayushchiy apparat tsentrobezhnogo nasosa* [Radial-flow pump diffuser]. Patent RU 2448279. Appl. 26.05.2011, publ. 20.04.2012. (In Russ.).
- [12] Gilev V.G., Rabinovich A.I., Dolgikh A.V. et al. *Radialnyy napravlyayushchiy apparat mnogostupenchatogo pogruzhnogo nasosa* [Radial guide vane of multi-stage submersible pump]. Patent 2364755 RU. Appl. 27.12.2007, publ. 20.08.2009. (In Russ.).
- [13] Astredinov V.M., Bondarenko T.V., Kochkin E.V. et al. *Sposob izgotovleniya profilnykh diskov metodom goryachego izostaticheskogo pressovaniya* [Method of shaped discs manufacturing by the hot isostatic pressing method]. Patent 2649188 RU. Appl. 11.05.2016, publ. 30.03.2018. (In Russ.).

- [14] Smolentsev E.V. *Proektirovanie elektricheskikh i kombinirovannykh metodov obrabotki* [Design of electrical and combined machining methods]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 511 p. (In Russ.).
- [15] Smolentsev V.P., Boldyrev A.I., Smolentsev E.V. et al. *Sredstva tekhnologicheskogo osnashcheniya i oborudovanie dlya elektricheskikh metodov obrabotki* [Means of technological equipment and equipment for electrical machining methods]. Voronezh, VGTU Publ., 2017. 215 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 28.05.2024

Информация об авторах

РЯЗАНЦЕВ Александр Юрьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения». ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. 20-летия Октября, д. 84, e-mail: ryazantsev86@rambler.ru).

СМОЛЕНЦЕВ Евгений Владиславович — доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения». ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. 20-летия Октября, д. 84, e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com).

УСТИНОВ Кирилл Александрович — аспирант кафедры «Технология машиностроения». ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. 20-летия Октября, д. 84, e-mail: kirill_ust@mail.ru).

РЯЗАНЦЕВА Елена Александровна — инженер-конструктор первой категории. АО «Конструкторское бюро химавтоматики» (394055, Воронеж, Российская Федерация, ул. Ворошилова, д. 20, e-mail: alenkasea@ro.ru).

Information about the authors

RYAZANTSEV Alexander Yuryevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology. Voronezh State Technical University (394006, Voronezh, Russian Federation, 20-letiya Oktyabrya St., Bldg. 84, e-mail: ryazantsev86@rambler.ru).

SMOLENTSEV Evgeniy Vladislavovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Mechanical Engineering Technology. Voronezh State Technical University (394006, Voronezh, Russian Federation, 20-letiya Oktyabrya St., Bldg. 84, e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com).

USTINOV Kirill Aleksandrovich — Postgraduate, Department of Mechanical Engineering Technology. Voronezh State Technical University (394006, Voronezh, Russian Federation, 20-letiya Oktyabrya St., Bldg. 84, e-mail: kirill_ust@mail.ru).

RYAZANTSEVA Elena Aleksandrovna — Engineer of the 1st Category, JSC Design Bureau of Chemical Automation (394055, Voronezh, Russian Federation, Voroshilov St., Bldg. 20, e-mail: alenkasea@ro.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Рязанцев А.Ю., Смоленцев Е.В., Устинов К.А., Рязанцева Е.А. Разработка перспективной технологии изготовления закладных элементов с целью получения направляющих аппаратов турбонасосных агрегатов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 7, с. 65–71.

Please cite this article in English as:

Ryazantsev A.Yu., Smolentsev E.V., Ustinov K.A., Ryazantseva E.A. Development of a promising technology for the embedded elements manufacture to obtain guide vanes for the turbopump units. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 7, pp. 65–71.