

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 6 (180). С. 14-20.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 6 (180). P. 14-20.

Научная статья

УДК 621.9.047:048

doi: 10.30987/2223-4608-2026-6-14-20

Производство наукоемких изделий при ограниченном доступе инструмента в зону протекания процесса обработки

Владислав Павлович Смоленцев¹, д.т.н.

Олег Владимирович Уразов², аспирант

^{1,2} Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

¹ vsmolen@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² 2011174uov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

***Аннотация.** В работе рассмотрены ограничения, объективно существующие при изготовлении наукоемких изделий типа высокоресурсных силовых приводов трансмиссий и высоконагруженных магистралей в авиакосмической и энергетической отраслях производства. Показаны роль и значение для применения в отраслях на этапе отработки технологичности комбинированных видов обработки с упрочнением при максимальном использовании потенциала и научно обоснованном регулировании параметров физико-технических воздействий, предложены оригинальные принципы построения технологического процесса с базированием последующих операций от ранее заложенной в документации поверхности. Для реализации такого подхода созданы новые конструкции автоматизированного инструмента, которые прошли успешные испытания в авиакосмическом и энергетическом отраслевом производстве, чем доказали перспективность их использования, в том числе в общем машиностроении страны. Выполнены в необходимом объеме исследования предложенных методов комбинированной обработки с упрочнением на технико-экономические показатели изделий, включающие возможность значительного сокращения их межремонтного периода, расширения ресурса и области использования в машиностроении представленных результатов исследований. Создан новый метод комбинированной обработки внутренних поверхностей деталей с использованием регулируемого периметра рабочей части упрочняющего элемента и непрофилированного инструмента в форме электрода-щетki, применение которого обеспечивает его подвод в труднодоступные участки поверхности для выполнения технологических операций, в том числе при обработке внутренних поверхностей переменного сечения трубных элементов конструкций силовых передач. Проанализированы результаты усталостных испытаний при различных базовых циклах по стандартным методикам, доказавшие перспективность использования предложенных методов и режимов комбинированной обработки в случае ограничения доступа традиционного инструмента в зону реализации процесса. Проведены испытания обработанных созданными электродами-инструментами наукоемких изделий со сложной формой и переменными размерами для авиакосмического и энергетического машиностроения.*

Ключевые слова: технология, оборудование, ограничения, технологичность, трансмиссии, магистралы, ресурс

Для цитирования: Смоленцев В.П., Уразов О.В. Производство наукоемких изделий при ограниченном доступе инструмента в зону протекания процесса обработки // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 6 (180). С. 14–20. doi: 10.30987/2223-4608-2026-6-14-20

High-tech manufacturing with limited tool access to the processing area

Vladislav P. Smolentsev¹, D. Eng.

Oleg V. Urazov², PhD student

^{1,2} Voronezh State Technical University,
Voronezh, Russia

¹ vsmolen@inbox.ru

² 2011174uov@mail.ru

Abstract. *The paper focuses on the limitations that objectively exist in the manufacture of high-tech products such as highly resourceful transmission actuators and high-loaded airspace main lines in the aerospace and energy industries. The role and importance for application in industries at the stage of testing the manufacturability of combined strengthening treatments through maximum use of potential and scientifically based regulation of the parameters of physical and technical impacts are shown, original principles of manufacturing method construction are proposed, basing subsequent operations on the surface as included in documentation. To implement this approach, new automated tool designs have been created, being successfully tested in the aerospace and power industries, which have proved the promise of their use, including in the general mechanical engineering of the whole country. Studies of the proposed methods for combined strengthening treatments on the technical and economic parameters of products have been carried out to the required extent, including the possibility of significantly reducing their inter-repair period, expanding the resource and scope of use in mechanical engineering of the presented research results. A new method has been developed for combined internal treatments of parts using an adjustable perimeter of the working section of the reinforcing element and an unprofiled tool in the form of a brush electrode, the use of which ensures its supply to hard-to-reach areas of the surface to perform technological operations, including internal treatment of variable cross-section tubular structural elements of power transmissions. The results of fatigue tests at various basic cycles using standard methods have been analyzed, which have proved the promise of using the proposed methods and modes of combined treatment in the event of limited access of a traditional tool to the process area. High-tech products with complex shapes and variable sizes for aerospace and power engineering have been tested and treated using created electrodes-tools.*

Keywords: technology, equipment, limitations, adaptability, transmissions, main lines, resource

For citation: Smolentsev V.P., Urazov O.V. High-tech manufacturing with limited tool access to the processing area / Science intensive technology in mechanical engineering. 2026. № 6 (180). P. 14–20. doi: 10.30987/2223-4608-2026-6-14-20

Введение

Расширение области использования достижений технологической науки зависит от успешного преодоления ограничений по доступу инструмента в зону проведения технологической операции. Для этого требуется создание новых, на уровне изобретений [1, 2] и открытий, методов и средств технологических приемов с использованием в едином процессе сочетаний физико-технических воздействий и управление их применением для отработки производственной технологичности [3]. Такие исследования выполняются преимущественно на стадии создания опытных образцов технических объектов, при проведении ремонтных и восстановительных работ с учетом условий эксплуатации изделий на этапе от единичного

до серийного производства [4]. Типовыми объектами, определяющими темпы развития отечественного машиностроения, в первую очередь, являются авиакосмическая и энергетическая отрасли, откуда полученные результаты интенсивно переносятся на другие участки народного хозяйства [5, 6].

Анализ типовых ограничений для доступа инструмента к внутренним поверхностям трубчатых трансмиссий и зонам упрочнения узлов соединения магистралей. Для расширения технологических возможностей использования в машиностроении комбинированных методов обработки с упрочнением требуется назначать технологические приемы и использовать средства производства, устраняющие ограничения с доступом инструмента в

рабочую зону. В большей степени это относится к внутренним поверхностям деталей, имеющих сложный геометрический профиль, большой перепад сечений, высокую точность, выполненных из труднообрабатываемых материалов и работающих в условиях высоких механических, тепловых и импульсных нагрузок. Особую сложность представляет выполнение технологических операций в процессе создания, ремонта и освоения изделий в серийном производстве, где технологическая наука должна реализовать накопленный потенциал исследований, обеспечивающих конкурентоспособность создаваемой, в том числе, наукоемкой продукции. В авиакосмической отрасли к таким деталям относятся узлы длинномерных трансмиссий из металлических трубчатых заготовок, в основном со стандартными диаметрами, величиной от 23 до 105 мм, работающих при вращении с числом оборотов до 15000 об/мин, у которых концевые участки осаживают на больший наружный диаметр (рис. 1).

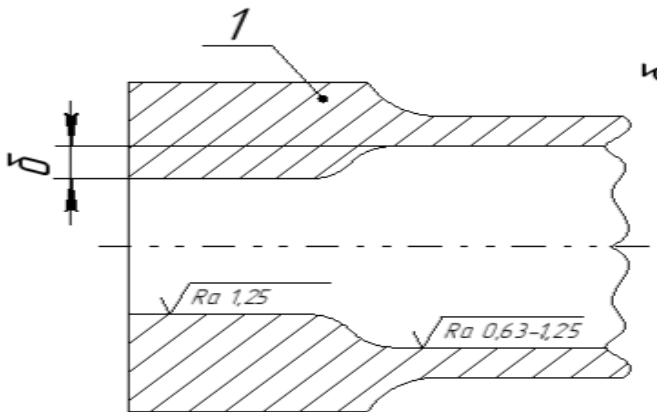


Рис. 1. Концевой участок заготовки с осаженым концом

Fig. 1. Workpiece end section with a chamfer

Участки, типа приведенного на рис. 1, являются наиболее нагруженными при эксплуатации в приводах и магистралях. Это подтверждается статистическими сведениями о работе редукторов с валами для вращения воздушных винтов летательных аппаратов, касается нескольких приводов (насосов, вентиляторов,

компрессора и др.), где в процессе эксплуатации возникают различные перегрузки, создающие опасные концентраторы напряжений. Исследования в [7] показали, что механическое пластическое упрочнение мест изменения периметра каналов способно повысить усталостную прочность валов трансмиссий на порядок и выше. Для этого требуется обеспечить доступ упрочняющего инструмента к переходной зоне детали, для чего устранить снижение диаметра заготовок на концевых участках (рис. 1). Здесь величина δ обычно не превышает десятых долей мм, но сопряжение участков в процессе обработки представляет сложности и формирует выступы, создающие концентраторы напряжений.

После чистовой обработки вала с пластическим наклепом внутренней поверхности на глубину 0,08 мм было достигнуто ее упрочнение на 18...20 %, что позволило повысить усталостную прочность и долговечность на базе $2 \cdot 10^7$ циклов испытаний более, чем в 2 раза, превысить установленный для узла ресурс и открыть возможность дальнейшего повышения этого показателя редуктора.

Аналогичные проблемы по восстановлению работоспособности конструкций возникают при эксплуатации магистралей высокого давления в различных видах летательных аппаратов и на энергетических установках, наиболее заметно проявляющиеся на атомных электростанциях, где давление теплоносителя составляет 16 МПа при температуре до 600 К.

После сварки доступ инструмента внутрь трубы становится невыполнимым и упрочнение приходится выполнять по наружной поверхности, где после остывания шва могут формироваться нежелательные растягивающие напряжения. В работе [8] показан перспективный метод комбинированной обработки наружных поверхностей с упрочнением при использовании в качестве инструмента электрода-щеточки, схема которой приведена на рис. 2.

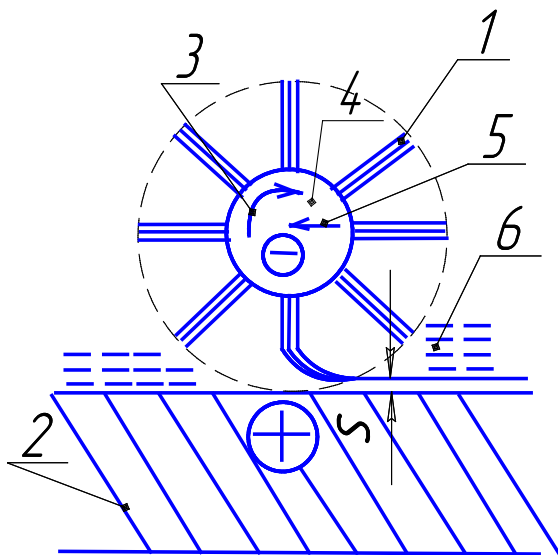


Рис. 2 Схема обработки непрофилированным электродом-щеткой:

1 – пучки металлической проволоки; 2 – заготовка; 3 – вращательное движение электрода-щеточки; 4 – металлический диск; 5 – рабочая подача электрода-щеточки; 6 – рабочая среда

Fig. 2 Treatmentg scheme with an unprofiled brush electrode:

1 – metal wiring harness; 2 – workpiece; 3 – rotational movement of the brush electrode; 4 – metal disc; 5 – working supply of the brush electrode; 6 – operating environment

При использовании комбинированного процесса (рис. 2), который осуществляется при вращательном движении инструмента в период перемещения пучков проволоки 1 над заготовкой 2 через токопроводящую среду 6 при подаче постоянного или импульсного тока, через межэлектродный зазор происходит электрохимическое удаление припуска с заготовки. За счет вращения и подачи 5 электрода-щеточки электрохимический процесс переходит в электроэрозионный с импульсным тепловым локальным расплавлением металла, а далее формируется импульсное ударное воздействие концом пучка, вызывающее наклеп поверхности заготовки. Здесь управление процессом осуществляется по величине подачи, скорости вращения, прижима концов пучка проволоки к заготовке с учетом характеристик материалов, размеров инструмента, детали и рабочей среды, которой может быть эмульсия, суспензии, а чаще промышленная вода с

различными добавками, рекомендуемыми в [8, 9].

Разработанная технология процесса позволяет взамен получения наклепа, широко используемого в машиностроении, с постоянным силовым воздействием, достигаемого, например, многократной обкаткой, использовать импульсные воздействия пучков проволоки с управляемым режимом обработки, при котором изгиб или деформация трубы невозможны. Процесс выполняется по изобретению [1] автора статьи.

Для завершения обработки менее доступный участок зоны упрочнения, в месте с минимальным зазором менее 10 мм между трубой и элементами конструкции установки, предлагается осуществлять токопроводящим гибким электродом комбинированной электроабразивной обработкой при возвратно повторяющемся перемещении инструмента с расчетным прижимом к месту упрочнения детали, а после просвета более 10...15 мм упрочнять раскаткой роликовым инструментом, предложенным одним из авторов статьи в [4].

Создание инструмента для комбинированной обработки

Для подвода инструмента в зону комбинированной обработки внутренней поверхности валов трансмиссий необходимо учесть условия эксплуатации, ремонта и восстановления изделия. При этом требуется обеспечить длительную прочность при многократных знакопеременных нагружениях, отсутствие вибраций объекта, возможность замены сменного участка длиномерной трансмиссии в полевых условиях. Численная оценка уровня технологичности [6] с применением предложенного на рис. 3 электрода-инструмента показала значительные преимущества его использования, что ранее было установлено в [10] для широкой номенклатуры наукоемких изделий различных отраслей машиностроения и защищено патентами России.

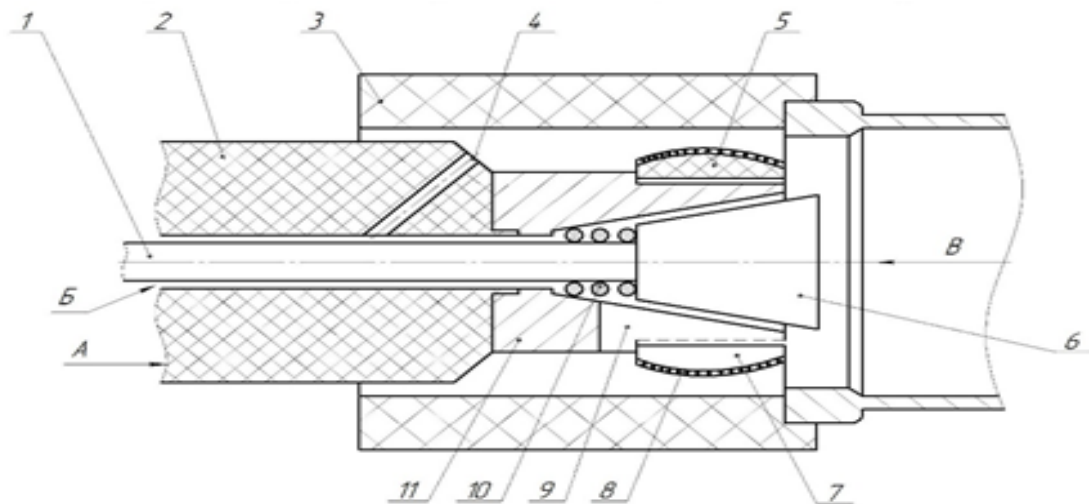


Рис. 3. Нежесткий инструмент для комбинированной обработки внутренних поверхностей

Fig. 3. Non-rigid tool for combined internal treatment

Представленный на рис. 3 инструмент для выполнения технологической операции чистового формообразования с упрочнением внутренней поверхности перед обработкой помещают в открытый диэлектрический контейнер 3, который является частью технологической оснастки специального оборудования и тягой 1 перемещают конус 6 в корпусе 5 упрочняющего элемента. Перед этим снижают диаметр рабочей части для свободного прохождения ее через концевые осаженные участки обрабатываемой трубы. Затем инструмент пропускают в направлении А до выхода его из обрабатываемой заготовки и помещают внутрь контейнера за концом заготовки. Через отверстие 4 подают через концевую щель В под давлением электролит, который далее сливается через отверстия в контейнере.

К тяге 1 в направлении В (рис. 3) прикладывают расчетное усилие относительно трубы 2, расширяют корпус 5 упрочняющего элемента на величину, равную сумме величин напуска (δ на рис. 1) и припуска на глубину деформации слоя при упрочнении. Инструмент рабочей частью 11 входит в концевую часть заготовки. Начинается анодное растворение концевой участка δ до окончания его удаления. Далее упрочняющим элементом 5 производится наклеп всей поверхности детали. Режимы упрочнения аналогичны приведенным в [4]. Также

инструмент оснащен следующими элементами: отверстие для подачи жидкой рабочей среды в зону обработки 4; износостойкое твердое покрытие упрочняющего элемента 8; пружина 10. Под цифрой 7 представлен продольный разрез упрочняющего элемента; 9 – разрез рабочей части.

В результате комбинированной обработки внутренних поверхностей приводов были достигнуты технологические показатели, приведенные на рис. 1, и получена требуемая степень упрочнения рассматриваемых материалов величиной до 30 %.

Созданная по изобретению [1] конструкция ЭЦ и модели [11] ее работы описывают комбинированные процессы с управляемым упрочнением концевых и контактирующих участков магистралей, что дает возможность спроектировать процессы обработки с оптимальными технологическими режимами.

Характеристики поверхностного слоя материала

Авторы в [4, 10] показали, что остаточные напряжения с требуемыми характеристиками при пластическом упрочнении могут служить инструментом управления процессом для значительного повышения усталостной прочности и долговечности материала. С учетом

результатов их анализа в работе [11] приведено моделирование построения технологии комбинированной обработки с поверхностным упрочнением, что позволило обоснованно назначить рабочие режимы процесса.

Для повышения ресурса трансмиссий и всех видов магистралей требуется назначать технологические мероприятия по повышению периода работоспособности за счет упрочнения материала изделий и снижения сопротивления течению рабочих сред, особенно на переходных участках, где чаще возникают концентраторы напряжений и местные неровности, часть которых на предшествующих этапах изготовления не может быть полностью устранена. В технических условиях по комбинированным методам обработки (КМО) с упрочнением в источнике [12] указывается на необходимость включения в процесс технологических операций, которые обеспечивают после КМО силовых трансмиссий и высоконагруженных магистралей получение требуемых эксплуатационных параметров этих объектов (включая переходные и сопрягаемые участки) по шероховатости не ниже $Ra = 0,63 \dots 1,25$, что для легированных сталей достижимо при разработанных приемах комбинированной обработки (КО) по схеме протягивания, с использованием непрофилированного электрода по [8] в форме ЭЩ и новой конструкции мест соединения многослойных магистралей, показанной на примере участка дыхательного трубопровода атомной электростанции.

Обобщенным доказательством полезности и конкурентоспособности предлагаемого варианта КО с упрочнением являются результаты усталостных испытаний, выполняемые в авиационном машиностроении изгибом с кручением образца на базе $2 \cdot 10^7$ циклов, а в энергетической отрасли – путем применения ускоренных усталостных испытаний на базе $3 \cdot 10^4$ или $3 \cdot 10^5$ циклов для установления ресурса и межремонтного периода.

Анализ результатов усталостных испытаний упрочненных образцов доказывает достоверность заключения о полезности использования упрочнения деталей из сталей с пластическим наклепом при применении КМО для всех отраслей машиностроения. Здесь рассматриваются осредненные результаты испытаний конструкционных легированных сталей (типовые представители: 40ХНМА, 30ХГСА),

преимущественно используемых в силовых приводах летательных аппаратов и их двигателей. Аналогичные сплавы применяются в магистралях изделий авиакосмического машиностроения, а также для оценки качества материалов, используемых в магистралях атомных станций.

С учетом специфики эксплуатации и ремонта магистралей оказалось экономически оправданным проводить здесь ускоренные испытания образцов после КМО с упрочнением. Испытания показали возможность повысить усталостную прочность и долговечность наукоемких изделий до 10 раз, повысить их ресурс и получить большой народно-хозяйственный эффект за счет снижения времени на ремонт приводов и остановку агрегатов станций на период выполнения восстановительных операций.

Заключение

Проведен анализ типовых ограничений для доступа инструмента к внутренним поверхностям трубчатых трансмиссий и зонам упрочнения узлов соединения магистралей. Для этого использованы новые принципы построения технологического процесса, созданы оригинальные конструкции инструмента, испытанные в отраслевом производстве и показавшие перспективность для использования в общем машиностроении страны. Проведены исследования положительного влияния предложенных методов комбинированной обработки с упрочнением на технико-экономические показатели изделий, включающие возможность значительного сокращения их межремонтного периода, расширения ресурса и области использования в машиностроении представленных результатов исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Авторское свидетельство № 914227. Способ электрохимической обработки. Смоленцев В.П., Садыков З.Б., Шаршаков И.М., Литвин Т.П. // 1982, Бюл. изобр. № 11.
2. Патент на полезную модель № RU 231708 U1, 06.02.2025, МПК В24В 39/04. Автоматизированное устройство для поверхностного упрочнения зоны повреждения сварных соединений / Данилов А.Д., Уразов О.В. // 2025. Бюл. изобр. № 4
3. Смоленцев В.П., Сафонов С.В., Смоленцев Е.В. Обеспечение качества продукции авиационно-космического машиностроения на этапах отработки технологичности изделий // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2025. № 6 (168). С. 11–18.

4. **Уразов О.В., Данилов А.Д.** Исследование процесса восстановления поврежденных поверхностей трубопроводов методом поверхностного наклепа // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 5. С. 126–132.

5. **Смоленцев Е.В.** Проектирование электрических и комбинированных методов обработки // М.: Машиностроение. 2005. 511 с.

6. **Уразов О.В., Сафонов С.В., Смоленцев В.П.** Процесс отработки технологичности наукоемких изделий машиностроения // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2025. № 6 (374). С. 55–63.

7. **Бабичев А.П., Бабичев И.А.** Основы вибрационной технологии. Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ. 1998. 624 с.

8. **Кириллов О.Н.** Технология комбинированной обработки непрофилированным электродом // Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет». 2010. 254 с.

9. **Физико-химические методы** обработки в производстве газотурбинных двигателей / Под ред. Б.П. Саушкина // М.: Дрофа. 2002. 656 с.

10. **Смоленцев В.П.** Технология электрохимической обработки внутренних поверхностей // М.: Машиностроение. 1978. 176 с.

11. **Уразов О.В.** Технология и оборудование для комбинированных методов обработки объектов транспортного и энергетического машиностроения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2025. Т. 21. № 4. С. 210–221.

12. **Справочник** технолога / Под ред. А.Г. Суслова. М: Инновационное машиностроение. 2019. 800 с.

2. Utility Model patent No. RU 231708 U1, 02/06/2025, IPC B24B 39/04. An automated device for surface hardening of the damage zone of welded joints / Danilov A.D., Urazov O.V. // 2025. Bulletin of inventions. No. 4

3. Smolentsev V.P., Safonov S.V., Smolentsev E.V. Ensuring the quality of aerospace engineering products at the stages of testing the manufacturability of products // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2025. No. 6 (168). pp. 11–18.

4. Urazov O.V., Danilov A.D. Investigation of the process of restoration of damaged pipeline surfaces by the method of surface riveting // Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2021. Vol. 17. No. 5. pp. 126–132.

5. Smolentsev E.V. Design of electrical and combined processing methods // Moscow: Mashinostroenie. 2005. 511 p.

6. Urazov O.V., Safonov S.V., Smolentsev V.P. The process of testing the manufacturability of high-tech engineering products // Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2025. No. 6 (374). pp. 55–63.

7. Babichev A.P., Babichev I.A. Fundamentals of vibration technology. Rostov-on-Don: Publishing center of DSTU. 1998. 624 p.

8. Kirillov O.N. Technology of combined treatment with an unprofiled electrode // Voronezh: Voronezh State University of Technology. 2010. 254 p.

9. Physico and chemical processing methods in production of gas turbine engines / Edited by B.P. Saushkin // Moscow: Drofa. 2002. 656 p.

10. Smolentsev V.P. Technology of electrochemical treatment of internal surfaces // Moscow: Mashinostroenie. 1978. 176 p.

11. Urazov O.V. Technology and equipment for combined treatments for transport and power engineering objects // Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2025. Vol. 21. No. 4. pp. 210–221.

12. Technologist's Handbook / Edited by A.G. Suslov. Moscow: Innovative engineering. 2019. 800 p.

REFERENCES

1. Copyright certificate No. 914227. Method of electrochemical treatment. Smolentsev V.P., Sadykov Z.B., Sharshakov I.M., Litvin T.P // 1982, Bulletin of inventions. No. 11.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 09.02.2026; одобрена после рецензирования 27.02.2026; принята к публикации 20.03.2026.

The article was submitted 09.02.2026; approved after reviewing 27.02.2026; assepted for publication 20.03.2026.