

## ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ПРОЦЕССЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ПОРШНЕВЫХ ПАЛЬЦЕВ ДВИГАТЕЛЯ

Эдуард Станиславович Савенко<sup>1</sup>, Сергей Анатольевич Матвиенко<sup>2</sup>,  
Людмила Филипповна Жданова<sup>3</sup>, Дмитрий Александрович Клейменов<sup>4</sup>,  
Владислав Олегович Положенцев<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия

<sup>1</sup>e.s.savenko@donnasa.ru, <sup>2</sup>s.a.matvienko@donnasa.ru, <sup>3</sup>l.p.zhdanova@donnasa.ru,

<sup>4</sup>kleymenov.d.a-aah-26a@donnasa.ru, <sup>5</sup>polozhentsev.v.o-aah-26b@donnasa.ru

**Аннотация.** Актуальность темы представленной статьи обусловлена постоянным развитием технологий ремонта и восстановления деталей машин. В настоящее время активно применяется технология восстановления поршневых пальцев двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с использованием высокоэнергетического способа пластического деформирования металла, основанного на электрогидравлическом эффекте, представляющем собой использование энергии высоковольтного импульсного разряда в жидкости. В статье исследуются подходы к повышению эффективности процесса восстановления поршневых пальцев ДВС путём внедрения метода электрогидравлической раздачи. Проводится анализ влияния электрических параметров этого процесса на величину деформации поршневых пальцев в зависимости от используемого материала. Также рассматривается математическая модель взаимодействия ударной волны с материалом, что позволяет более глубоко понять механизмы, лежащие в основе данного метода восстановления.

**Ключевые слова:** восстановление, поршневой палец, электрогидравлическая раздача, износ, ремонтный размер, электроразряд, пластическое деформирование металла, электромагнитная энергия, энергия взрывчатых веществ

**Для цитирования:** Исследование ударной волны в процессе применения гидродинамического давления при восстановлении поршневых пальцев двигателя / Э. С. Савенко [и др.]. // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2024. Выпуск 2024-6(170) Технология, организация, механизация и геодезическое обеспечение строительства. С. 58–64. doi: 10.71536/vd.2024.6c170.7. edn: dxwvunj.

Original article

## SHOCK WAVE RESEARCH IN THE PROCESS OF APPLYING HYDRODYNAMIC PRESSURE DURING THE RESTORATION OF PISTON FINGERS OF AN ENGINE

Eduard S. Savenko<sup>1</sup>, Sergey A. Matvienko<sup>2</sup>, Lyudmila F. Zhdanova<sup>3</sup>, Dmitry A. Kleimenov<sup>4</sup>,  
Vladislav O. Polozhentsev<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia

<sup>1</sup>e.s.savenko@donnasa.ru, <sup>2</sup>s.a.matvienko@donnasa.ru, <sup>3</sup>l.p.zhdanova@donnasa.ru,

<sup>4</sup>kleymenov.d.a-aah-26a@donnasa.ru, <sup>5</sup>polozhentsev.v.o-aah-26b@donnasa.ru

**Abstract.** The relevance of the topic of the presented article is due to the constant development of technologies for repairing and restoring machine parts. Currently, the technology of restoring piston pins of internal combustion engines (ICE) is actively used using a high-energy method of plastic deformation of metal based on an



electrohydraulic effect, which is the use of energy from a high-voltage pulsed discharge in a liquid. The article examines approaches to improving the efficiency of the process of restoring piston pins of the internal combustion engine by introducing the method of electrohydraulic distribution. The influence of the electrical parameters of this process on the amount of deformation of piston pins, depending on the material used, is analyzed. A mathematical model of the interaction of a shock wave with a material is also considered, which allows a deeper understanding of the mechanisms underlying this recovery method.

**Keywords:** restoration, piston pin, electrohydraulic distribution, wear, repair size, electric discharge, plastic deformation of metal, electromagnetic energy, energy of explosives

**For citation:** Shock wave research in the process of applying hydrodynamic pressure during the restoration of piston fingers of an engine / E. S. Savenko [et al.]. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Technology, organization, mechanization and geodetic support of construction.* 2024;6(170):58–64. (In Russ.). doi: 10.71536/vd.2024.6c170.7. edn: dxwvnj.

## ВВЕДЕНИЕ

Ремонт автомобилей представляет собой процесс, требующий значительных затрат – как материальных, так и трудовых, а также денежных ресурсов. По данным заводов машиностроения, около 40 % металла уходит на производство запасных частей, что в значительной степени определяет себестоимость ремонта автомобилей. Ключевая задача разработки и внедрения современных технологий [1–4]. Разработка современных технологических процессов, восстановления деталей массового производства [5–7]. Одним из таких элементов являются поршневые пальцы для автомобильных двигателей. Ежегодно производится более 50 миллионов поршневых пальцев [8].

## АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Анализ существующих технологий восстановления поршневых пальцев ДВС показал, что существующие способы восстановления поршневых пальцев, отличаются сложностью процесса, низкой производительностью, значительными расходами энергии, и не один из существующих способов не является универсальным для восстановления всех видов поршневых пальцев [9–11].

Анализ особенности электрогидравлической обработки установил, что этот метод является одним из перспективных способов восстановления поршневых пальцев ДВС, а также этим способом возможно восстановление поршневых пальцев всех видов двигателей [12–14], что значительно расширяет возможности ремонта и повышения эксплуатационных характеристик автомобилей.

**Целью** работы является повышение эффективности восстановления поршневых пальцев двигателей внутреннего сгорания за счет применения способа электрогидравлической раздачи.

Задачи работы:

- создать математическую модель взаимодействия ударной волны с обрабатываемой деталью при восстановлении поршневых пальцев, на основе которой установить режимы и характеристики процесса электрогидравлической раздачи, обеспечивающие сохранение усталостной долговечности, статической прочности и износостойкости поршневых пальцев;
- изучить взаимодействие ударной волны с обрабатываемой деталью;
- определить параметры ударной волны с экспоненциальным изменением давления;
- рассмотреть граничные условия на ударном фронте (границе между жидкостью и плазмой), которые могут быть представлены через соотношения между скоростью движения жидкости  $V$ , скоростью звука  $C$  и скоростью распространения ударного фронта;
- установлены уравнения движения оболочки и нормального смещения с  $n$ -ой компонентой давления;
- определён потенциал расходящейся цилиндрической волны, а также проанализировано гидродинамическое давление на внутренней поверхности детали.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Исследования были проведены по поршневым пальцам дизельных двигателей. Применение электрогидравлической раздачи значительно повышает экономическую эффективность при восстановлении поршневых пальцев по сравнению с традиционными методами. При этом не наблюдается ухудшения их прочностных характеристик и износостойкости.

Для улучшения технологии восстановления поршневых пальцев предлагается применение высокоэнергетического метода пластического деформирования металла, основанного на использовании энергии высоковольтного импульсного разряда в жидкости, известного как электрогидравлический эффект (ЭГЭ) [15].

Этот способ характеризуется высокой скоростью деформации, влияющей как на деформацию металлов в процессе деформирования, так и на их физико-механические свойства [16].

Электрогидравлическая обработка металлов характеризуется скоростями, в десятки и сотни раз превышающими скорости при обычных способах обжатия, вытяжки, раздачи и т. д. Например, скорость ползуна механического пресса находится в пределах 2...3 м/с.

Скорость деформирования значительно влияет на прочностные и пластические свойства деформируемого металла, и этому фактору придается большое значение. Установлено, что при увеличении скорости деформации, как правило, повышаются пределы текучести и прочности. Объясняется это явление изменением механизма деформации, уменьшением влияния тепловых флуктуаций и снижением роли разупрочнения [24, 25]. Увеличение скорости деформации только до 4 м/с увеличивает предел текучести железа при комнатной температуре на 30 %, а также повышает предел прочности, пластичность металла и сопротивление удару.

Особенности технологии восстановления поршневых пальцев (использование иницирующей проволоки весом  $\geq 0,1...0,3$  г) позволяют предположить, что плазма полностью образуется из металлической проволоки. В используемой электрогидравлической установке (ЭГУ) генерируется плотная низкотемпературная плазма, для которой число частиц  $n \approx 10^{25}-10^{28}$  м<sup>-3</sup>, температура  $T = 5\ 000...50\ 000$  °К, причем энергия притяжения между электронами и ионами  $e^2 n_e^{-1/3}$  сравнима с кинетической  $kT = 1/\beta, e^2 n_e^{-1/3} \beta \leq 0,5$ .

Рассмотрим взаимодействие ударной волны с обрабатываемой деталью. В плазме в момент времени  $t = 0$  возникает цилиндрическая ударная волна с экспоненциальным профилем спада давления, которая переходит через границу «плазма – рабочая жидкость» и, распространяясь в жидкости, в момент времени  $t = t_0$  достигает детали, в результате чего происходит ее деформирование.

Выберем цилиндрическую систему координат  $r, z, \theta$  и ось  $z$  совместим с осью детали. Для детали, имеющей форму цилиндрической оболочки (толщиной  $h$  и радиуса  $r_0 = a$ ) введем обозначения:  $u, V, W$  – перемещения срединной поверхности радиуса  $r_0 = a$ .

Тогда потенциал излучаемой источником не стационарной цилиндрической волны с помощью теоремы сложения цилиндрических функций можно представить в координатах  $r, \theta$  [26–30].

$$\varphi_0^L = -F^L(s) \sum_{n=0}^{\infty} e_n k_n(sr) \ln(sa) \cos n\theta, \quad (1)$$

где  $e_n = 1, l_n = 2$  при  $n = 1, 2, \dots$ .

Пользуясь граничным условием на ударном фронте (поверхность между жидкостью и плазмой) может быть задана в виде соотношений между скоростью движения жидкости  $V$ , скоростью звука  $C$  и скоростью движения ударного фронта  $D$  [29, 31].

$$D = \frac{V}{2} + \frac{1}{k+1} \cdot \frac{c^2 - c_0^2}{V},$$

$$C = \left[ c_0^2 + \frac{k-1}{2} \cdot V \cdot \sqrt{4c_0^2 + \left( \frac{k+1}{2} \cdot V \right)^2} + \left( \frac{k-1}{2} \cdot V \right) \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $C_0$  – скорость звука в покоящейся жидкости.

Из выражения (1), получим формулу, определяющую изображение гидродинамического давления на внутренней поверхности детали

$$p^L = 2F^L(s) \sum_{n=0}^{\infty} e_n \frac{I(as)}{I_{n+1}(s) + I_{n-1}(s)} \cos n\theta, \quad (3)$$

где  $I_n(as)$  – функция Макдональда (модифицированная функция Бесселя первого рода).

В частном случае, когда ось источника совпадает с осью цилиндра, формула (3) принимает вид

$$p^L = \frac{F^L(s)}{I_1(s)}. \quad (4)$$

Таким образом, задача об определении давления на внутренней поверхности детали свелась к отысканию оригинала (3) или (4).

Для потенциалов, описывающих цилиндрическую волну, которая приближенно имеет экспоненциально убывающую эпюру давления. Функция  $F^L(S)$  принимает соответствующий вид

$$F_s^L(s) = F_1^L(s) \frac{1}{s^{3/2} + \alpha s^{1/2}}, \quad (5)$$

где  $F_1^L = -\sqrt{\frac{2(1-\alpha)}{\pi}} \cdot s^{-3/2},$

– вид функции  $F^L(S)$  для единичной волны,

$\alpha$  – показатель затухания экспоненты.

Уравнение (3) решалось численно. В работе применен численный метод обращения преобразования Лапласа, основанный на алгоритме Говарда-Штефеста.

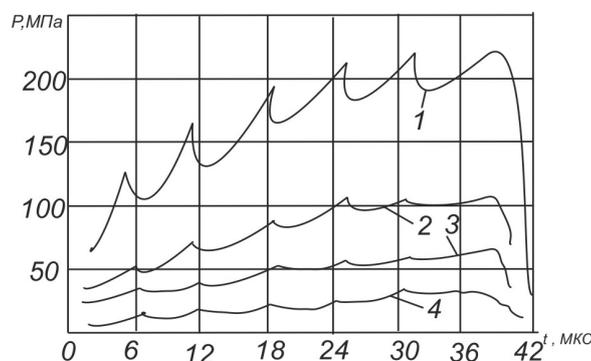
Численно определялись изменения давления  $p(t)$  во внутренней полости детали по зависимости (3) и реальное перемещение стенки детали  $w(t)$ , по зависимости (6) можно получить соотношение, связывающее в пространстве изображений  $n$ -ю составляющую нормального перемещения с  $n$ -ой составляющей давления

$$m(n, s)w_n^L = N(n, s)P_n^L(a), \quad (6)$$

здесь  $M$  и  $N$  – алгебраические полиномы от  $n, S$  зависящие также от упругих и инерционных свойств материала детали. Результат преобразования обозначим верхним индексом  $L$ . Тогда из уравнения (7) линейные уравнения движения цилиндрической оболочки можно записать в виде [31–35]

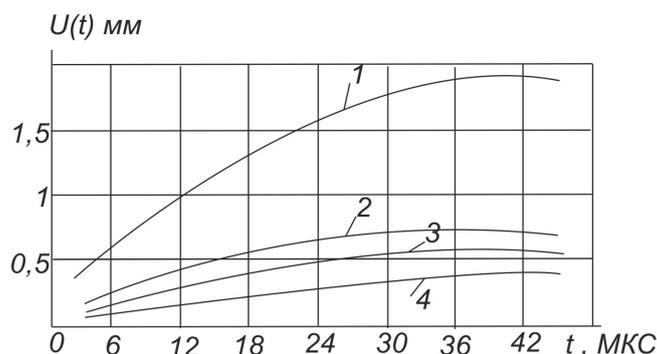
$$\begin{aligned} Z_1(u, v, w) &= \frac{1-\nu^2}{E} \rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ Z_2(u, v, w) &= \frac{1-\nu^2}{E} \rho_0 \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \\ Z_3(u, v, w) &= \frac{1-\nu^2}{E} \rho_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + p(z, \theta, t), \end{aligned} \quad (7)$$

Анализ изменения  $p(t)$  демонстрирует, что в начале взаимодействия давление на внутренней поверхности детали при воздействии ударной волны увеличивается в два раза. В последующие моменты времени, из-за многократного наложения отражённых волн и интенсивного течения среды, наблюдается резкое изменение давления (рис. 1).



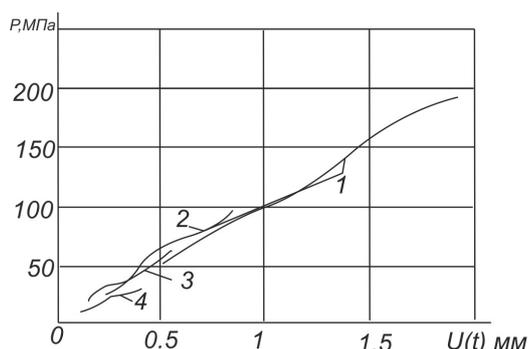
**Рисунок 1** – Графики изменения давления во внутренней полости детали по времени при ЭГР: 1 – инициирующая проволока из Al; 2 – инициирующая проволока из Fe; 3 – инициирующая проволока из Cu; 4 – инициирующая проволока из W.

Нестационарное радиальное перемещение стенки детали представляет собой интегральную характеристику давления, поэтому его увеличение со временем происходит более гладко (рис. 2).



**Рисунок 2** – График изменения радиального перемещения стенки детали при ЭГР: 1 – инициирующая проволока из Al; 2 – инициирующая проволока из Fe; 3 – инициирующая проволока из Cu; 4 – инициирующая проволока из W.

На рис. 3 представлен результат численного интегрирования, показывающий зависимость радиального перемещения стенки детали от давления в её полости.



**Рисунок 3** – Графики зависимости радиального перемещения стенки детали от давления во внутренней полости при ЭГР: 1 – инициирующая проволока из Al; 2 – инициирующая проволока из Fe; 3 – инициирующая проволока из Cu; 4 – инициирующая проволока из W.

## ВЫВОДЫ

1. Использование взрывающихся проволок из железа, меди и вольфрама для восстановления поршневых пальцев с внутренним радиусом до 10 мм не показывает высокой эффективности. При этом давление не превышает 100 МПа. Наиболее значительные результаты достигаются при применении взрывающихся проволок из алюминия диаметром менее одного миллиметра.

2. Анализ зависимости давления  $p(t)$  демонстрирует, что в начальный момент взаимодействия давление на внутренней поверхности детали удваивается под воздействием ударной волны. В дальнейшем, благодаря многократному наложению отраженных волн и динамическому течению среды, наблюдается резкое изменение давления.

3. Нестационарное радиальное перемещение стенки детали служит интегральной характеристикой давления, поэтому его увеличение со временем происходит более плавно и предсказуемо.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Allmaier, H. Measuring friction in automotive engines & determining the contributions of the individual subsystems / H. Allmaier, D. Sander, F. Reich. – Текст : непосредственный // 5th World Tribology Congress, WTC, Italy, 8–13 September 2013 : Volume 2. – Italy : Politecnico di Torino (DIMEAS), 2013. – P. 117.

2. Матвиенко, С. А. Анализ особенностей влияния эксплуатационных факторов на деталь / С. А. Матвиенко. – Текст : непосредственный // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития : материалы международной научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский, 17–19 октября 2018 года : в 2-х частях : том 2 ; ответственный за выпуск О. А. Белов. – Петропавловск-Камчатский : Камчатский государственный технический университет, 2019. – С. 102–105.
3. Постановка задачи определения полного технического ресурса автотранспортных средств / С. А. Матвиенко, И. А. Байдак, А. М. Подорванов, С. А. Лата. – Текст : электронный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2024. – Выпуск 2024-4(168) Научно-технические достижения студентов строительно-архитектурной отрасли. – С. 15–20. – URL: [https://donnasa.ru/publish\\_house/journals/vestnik/2024/2024-4\(168\)/st\\_03\\_matvienko\\_baydak\\_podorvanov\\_lata.pdf](https://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2024/2024-4(168)/st_03_matvienko_baydak_podorvanov_lata.pdf) (дата обращения: 01.09.2024). – ISSN 2519-2817.
4. Исследование процесса вакуумного термоциклического азотирования в плазме пульсирующего тлеющего разряда. Построение математической модели процесса / А. В. Дудан, М. С. Агеев, А. В. Рутковский [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Машиноведение и машиностроение. – 2020. – № 4. – С. 40–48.
5. Method for Determination of Liquefied Gas Fuel Consumption and Harmful Emissions of Vehicles / Igor Gritsuk, Vasyi Mateichyk, Volodymyr Volkov [et al.]. – Текст : непосредственный // Operation, Fuels And Safety. Seria: Mechanical Engineering (Inżynieria Mechaniczna) Transport Means Engineering. – 2022. – Selected Issues. Rzeszow University of Technology. – P. 37–44. – ISBN 978-83-7934-606-6.
6. Быков, И. А. Изготовление заготовок поршневых пальцев в автомобильной промышленности / И. А. Быков, Т. А. Кузнецов. – Текст : непосредственный // Автомобильное производство. – 1984. – № 1. – С. 4–7.
7. Application of Combined Electric Arc Coatings for Parts and Units of Vehicles Recovery in Repair Technologies / Maksim Ahieiev, Igor Gritsuk, Aleksandra Litikova [et al.]. – Текст : непосредственный // SAE Technical Paper. – 2021. – 2021-01-5100. – doi: 10.4271/2021-01-5100. – 17 p.
8. Research of the Gas Fuel Supply Process on the Compression Stroke in Ship's Low-Speed Gas-Diesel Engines / E. Belousov, A. Marchenko, I. Gritsuk [et al.]. – Текст : электронный // SAE Technical Paper. – 2020. – 2020-01-2107. – <https://doi.org/10.4271/2020-01-2107>. – 12 p.
9. Полупанов, Ф. П. Электрогидравлический эффект в ремонтном деле / Ф. П. Полупанов, К. Г. Балан, В. Н. Пономаренко. – Текст : непосредственный // Техника в сельском хозяйстве. – 1972. – № 12. – С. 72–74.
10. Каспарьянц, А. Г. Использование электрогидравлического эффекта для восстановления поршневых пальцев / А. Г. Каспарьянц, В. А. Какуевичский. – Текст : непосредственный // Автомобильный транспорт. – 1982. – № 8. – С. 103–106.
11. Влияние параметров способа электрогидравлической раздачи на эффективность деформации и изменение физических свойств поршневых пальцев ДВС / Э. С. Савенко, Д. Д. Гаевой, Д. В. Филимонов [и др.]. – Текст : электронный // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2023. – Том 19, № 4. – С. 175–182. – URL: [https://donnasa.ru/publish\\_house/journals/spgs/2023-4/st\\_05\\_savenko\\_gaevoy\\_filimonov\\_saveluyev\\_shkilnyuk.pdf](https://donnasa.ru/publish_house/journals/spgs/2023-4/st_05_savenko_gaevoy_filimonov_saveluyev_shkilnyuk.pdf) (дата обращения: 09.01.2024). – ISSN 1993-3495.
12. Моделирование процесса электроразряда при восстановлении поршневых пальцев ДВС / Э. С. Савенко, Н. В. Савенков, С. А. Матвиенко, А. Г. Каспарьянц. – Текст : электронный // Вестник СибАДИ. – 2024. – Том 21, № 2. – С. 242–255. – <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-242-255>.
13. Технология применения способа электрогидравлической раздачи для восстановления деталей / Э. С. Савенко, С. А. Матвиенко, В. В. Симонов [и др.]. – Текст : электронный // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2024. – Том 20, № 1. – С. 15–24. – URL: [https://donnasa.ru/publish\\_house/journals/spgs/2024-1/st\\_02\\_savenko\\_matvienko\\_simonov\\_belanov\\_gudolin.pdf](https://donnasa.ru/publish_house/journals/spgs/2024-1/st_02_savenko_matvienko_simonov_belanov_gudolin.pdf) (дата обращения: 13.09.2024). – edn: thwwai. – ISSN 1993-3495.
14. Improving the Processes of Thermal Preparation of an Automobile Engine with Petrol and Gas Supply Systems (Vehicle Engine with Petrol and LPG Supplying Systems) / I. Gritsuk, D. Pohorletskyi, V. Mateichyk [et al.]. – Текст : электронный // SAE Technical Papers. – 2020. – 2020-01-2031. – doi: <https://doi.org/10.4271/2020-01-2031>. – 10 p.
15. Improving Fuel Economy of Spark Ignition Engines Applying the Combined Method of Power Regulation / Yurii Gutarevych, Vasyi Mateichyk, Jonas Matijošius [et al.]. – Текст : электронный // Energies. – 2020. – Volume 13(5). – 1076. – 20 p. – <https://doi.org/10.3390/en13051076>.
16. Research of vehicle control informative functioning capacity / I. Kuric, O. Gorobchenko, O. Litikova [et al.]. – Текст : электронный // MMS2019, IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2020. – Volume 776(1). – 012036. – 11 p. – doi: 10.1088/1757-899X/776/1/012036.

### Информация об авторе

**Савенко Эдуард Станиславович** – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: основы технологии производства и ремонта автомобилей.

**Матвиенко Сергей Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: основы технологии производства и ремонта автомобилей.

**Жданова Людмила Филипповна** – ассистент кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: основы технологии производства и ремонта автомобилей.

**Клейменов Дмитрий Александрович** – магистрант кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: основы технологии производства и ремонта автомобилей.

**Положенцев Владислав Олегович** – магистрант кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: основы технологии производства и ремонта автомобилей.

#### **Information about the author**

**Savenko Eduard S.** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, of the Department of Automotive Transport, Service and Operation, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: fundamentals of car manufacturing and repairing technology.

**Matvienko Sergey A.** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, of the Department of Automotive Transport, Service and Operation, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: fundamentals of car manufacturing and repairing technology.

**Zhdanova Lyudmila F.** – an Assistant, of the Department of Automotive Transport, Service and Operation, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: fundamentals of car manufacturing and repairing technology.

**Kleimenov Dmitry A.** – master's student, of the Department of Automotive Transport, Service and Operation, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: fundamentals of car manufacturing and repairing technology.

**Polozhentsev Vladislav O.** – master's student, of the Department of Automotive Transport, Service and Operation, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: fundamentals of car manufacturing and repairing technology.

*Статья поступила в редакцию 29.10.2024; одобрена после рецензирования 22.11.2024; принята к публикации 29.11.2024.*

*The article was submitted 29.10.2024; approved after reviewing 22.11.2024; accepted for publication 29.11.2024.*