

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

# **В Е С Т Н И К**

**ЛУГАНСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
имени ВЛАДИМИРА ДАЛЯ**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

**№ 1 (6)  
2026**

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

**Луганск  
2026**

# ВЕСТНИК

ЛУГАНСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ.  
МАШИНОСТРОЕНИЕ

**№1 (6) 2026**

Научный журнал

Основан в 2015 году

Журнал включен в перечень ВАК

Входит в базу РИНЦ

Учредитель

ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет  
имени Владимира Даля»

# VESTNIK

LUGANSK  
VLADIMIR DAHL  
STATE UNIVERSITY  
MECHANICAL ENGINEERING.

**№ 1 (6) 2026**

The scientific journal

Was founded in 2015

The journal is included in the list of the HAC.

Included into the base of risc

Founder

LSU named after V. Dahl

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Дата регистрации: 03.07.2026. Серия ПИ № ФС77-91840

## Главный редактор

*Киреев Андрей Николаевич*, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

## Заместители главного редактора

*Брешев Владимир Евгениевич*, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

*Замота Тарас Николаевич*, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

## Ответственный секретарь

*Чижевская Дарья Юрьевна*, к-т техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

---

## Редакционная коллегия серии:

*Бахарев Дмитрий Николаевич*, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

*Брешев Владимир Евгениевич*, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

*Брюховецкий Андрей Николаевич*, д-р техн. наук (ЛГАУ им. К.Е. Ворошилова, Луганск)

*Витренко Владимир Алексеевич*, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

*Волков Игорь Владимирович*, к-т техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

*Замота Тарас Николаевич*, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

*Зубков Виктор Егорович*, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

*Капустин Денис Алексеевич*, д-р техн. наук (ЛГПУ, Луганск)

*Корсунов Константин Анатольевич*, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

*Сидоров Владимир Анатольевич*, д-р техн. наук (ДНТУ, Донецк, ДНР)

*Шапалов Виктор Иванович*, д-р техн. наук (ЛГАУ им. К.Е. Ворошилова, Луганск)

*Ясуник Светлана Николаевна*, к-т техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

Рекомендовано в печать Ученым советом

Луганского государственного университета имени Владимира Даля.

(Протокол № 10 от 27.03.2026 г.)

© Авторы, 2026

© ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет  
имени Владимира Даля», 2026

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

|                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА<br>Баранов И. О., Кушенко А. В., Капустин Д. А., Дейнека И. Г. -----                       | 5  |
| ВЛИЯНИЕ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ МЕТАЛЛА НА КОНСТРУКЦИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ И ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЕЖНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ<br>Киреев А. Н., Ливцов Ю. В., Безкоровайный В. С., Киреева М. А. ----- | 20 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСКЛЮЧЕНИЯ ИЗ КОНСТРУКЦИИ БЕЗВАЛЬНЫХ ТУРБОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ РЕАКТИВНЫХ СОПЕЛ<br>Любченко Д. И., Быкадоров В. В., Данилейченко А. А. -----                                | 29 |
| МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛАСТОМЕРА КАК КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА<br>Петров А. С., Коструб В. А., Мирошников А. А. -----                                                                         | 38 |

### ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

|                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| РАЗРАБОТКА ДИНАМОМЕТРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СИЛ И МОМЕНТОВ НА ВРАЩАЮЩЕМСЯ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ КОЛЬЦЕВОМ РОТОРЕ СТАНКА РЕЗКИ<br>Брешев В. Е., Рябичев В. Д., Брюховецкий А. Н., Корсунов К. А. ----- | 49 |
| ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ТУРБОКОМПРЕССОРОВ ЭЛЕКТРОХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ДОВОДКОЙ ВТУЛОК ТОРЦЕВОГО УПЛОТНЕНИЯ<br>Замота Т. Н., Чижевская Д. Ю. -----                                                          | 61 |
| ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКОГО ВРЕМЕНИ РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ<br>Солодовник М. Д., Ясуник С. Н., Волков И. В., Кузнецова М. Н. -----                                                                 | 68 |

### ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

|                                                                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ИССЛЕДОВАНИЕ МОЛОТИЛЬНО-СЕПАРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА АКСИАЛЬНО-РОТОРНОГО ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА МЕТОДОМ ПОСТРОЕНИЯ МАТРИЦЫ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ПАРАМЕТРОВ<br>Бахарев Д. Н., Пастухов А. Г., Вольвак С. Ф. ----- | 74 |
| СОВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ<br>Стородубцева Т. Н., Гриненко В. С., Бондарев В. А. -----                                                         | 83 |
| ОЗОН КАК АКТИВАТОР ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА В ДВС<br>Сударкин В. Н. -----                                                                                                              | 92 |

## CONTENTS

### MACHINES, UNITS AND TECHNOLOGICAL PROCESSES

#### **STUDY METHOD FOR OBTAINING RATIONAL GRANULOMETRIC COMPOSITION SOLID PHASE OF COAL-WATER FUEL**

Baranov I. O., Kushchenko A. V., Kapustin D. A., Deineka I. G. ----- 5

#### **THE INFLUENCE OF MACROSCOPIC METAL DEFECTS ON THE STRUCTURAL STRENGTH AND OPERATIONAL RELIABILITY OF PARTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

Kireev A. N., Livtsov Yu. V., Bezkorovainyi V. S., Kireeva M. A. ----- 20

#### **INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF EXCLUDING JET NOZZLES FROM THE DESIGN OF SHAFT-LESS TURBOJET ENGINES**

Lyubchenko D. I., Bykadorov V. V., Danileychenko A. A. ----- 29

#### **MATHEMATICAL MODELING OF ELASTOMER AS A STRUCTURAL MATERIAL**

Petrov A. S., Kostrub V. A., Miroshnikov A. A. ----- 38

### TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR MECHANICAL AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING

#### **DEVELOPMENT OF A DYNAMOMETER FOR RESEARCH OF FORCES AND TORS ON A ROTATING RING ROTOR OF A CUTTING MACHINE IN AN ELECTROMAGNETIC FIELD**

Breshev V. E., Ryabichev V. D., Brjuhoveckij A. N., Korsunov K. A. ----- 49

#### **INCREASING OF TURBOCHARGERS RESOURCE THROUGH ELECTROCHEMICAL-MECHANICAL RUNNING-IN OF SEALING END BUSHINGS**

Zamota T. N., Chizhevskaya D. Y. ----- 61

#### **ASSESSMENT OF CRITICAL TIME OF DESTRUCTION OF CONSTRUCTION ELEMENTS**

Solodovnik M. D., Yasunik S. N., Volkov I. V., Kuznetsova M. N. ----- 68

### TECHNOLOGIES, MACHINERY, AND EQUIPMENT FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

#### **INVESTIGATION OF THE THRESHING AND SEPARATING DEVICE OF THE AXIAL-ROTARY GRAIN HARVESTER BY BUILDING A MATRIX OF PARAMETER INTERRELATIONS**

Bakharev D. N., Pastukhov A. G., Volvak S. F. ----- 74

#### **MODERN DEVELOPMENT OF THE WOODWORKING INDUSTRY IN THE FORESTRY REGIONS OF RUSSIA**

Storodubtseva T. N., Hrynenko V. S., Bondarev V. A. ----- 83

#### **OZONE AS AN ACTIVATOR OF THE COMBUSTION PROCESS OF HYDROCARBON FUEL IN ICE**

Sudarkin V. N. ----- 92

**МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ****MACHINES, UNITS AND TECHNOLOGICAL PROCESSES**

УДК 67.02/ 67.08

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО  
ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ТВЕРДОЙ ФАЗЫ  
ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА****Баранов И. О., Кущенко А. В., Капустин Д. А., Дейнека И. Г.****STUDY METHOD FOR OBTAINING RATIONAL GRANULOMETRIC  
COMPOSITION SOLID PHASE OF COAL-WATER FUEL****Baranov I. O., Kushchenko A. V., Kapustin D. A., Deineka I. G.**

**Аннотация.** В работе выполнен сравнительный анализ влияния гранулометрического состава разных вариантов водоугольного топлива на структурную вязкость, динамическую стабильность и удельные потери давления при его транспортировании трубопроводным гидротранспортом. В результате проведения экспериментальных исследований установлены первопричины проявления бимодальности угольной пыли (твёрдой компоненты водоугольного топлива). Предложена гипотеза существования при помоле угля кластеров гранулометрического состава, что обусловленная различной энергетикой столкновения мелющих тел при конечности вариантов столкновений тел разной массы. Определена зависимость дисперсного состава угольно пыли от удельной поверхности измельченных материалов. В результате аппроксимации полученных экспериментальных данных получена зависимость модифицированного критерия бимодальности от времени помола. Даны практические рекомендации временных интервалов и режимов помола исходного угля в шаровой мельнице для получения наиболее рационального гранулометрического состава твёрдой фазы водоугольного топлива по критерию бимодальности.

**Ключевые слова:** водоугольное топливо, гранулометрический состав, критерий бимодальности, шаровая мельница, время помола, кластерная гипотеза, плотность распределения, технологические процессы.

**Abstract.** This paper presents comparative analysis of impact particle size distribution different coal-water fuel variants on structural viscosity, dynamic stability, and specific pressure losses during pipeline transportation. Experimental studies have established underlying causes of bimodality in coal dust (the solid component coal-water fuel). A hypothesis is proposed for existence of clusters particle size distribution during coal grinding, which is caused by different collision energies of grinding media with a finite number collisions between media different masses. The dependence coal dust particle size

*distribution on specific surface area of ground materials is determined. Approximation obtained experimental data yielded a dependence of modified bimodality criterion on grinding time. Practical recommendations are provided for time intervals and grinding modes for initial coal in ball mill to achieve the most optimal particle size distribution of solid phase of coal-water fuel based on bimodality criterion.*

**Key words:** coal-water fuel, particle size distribution, bimodality criterion, ball mill, grinding time, cluster hypothesis, distribution density, technological processes.

**Введение.** Водоугольное топливо (ВУТ) – композиционное, искусственное, жидкое угольное топливо при производстве которого, его состав может быть задан исходя из требований потребителя. В процессе производства ВУТ из него могут быть удалены нежелательные минеральные компоненты, в том числе серосодержащие, добавлены химические присадки – пластификаторы, десульфугизаторы и ингибиторы коррозии. Целесообразно также задание рационального гранулометрического состава (ГМС) твердой фазы, что позволяет эксплуатировать трубопроводную сеть и топливо-потребляющие агрегаты в оптимальных режимах, снизить себестоимость транспортирования и повысить тепловой КПД [1, 2].

При производстве ВУТ необходимо стремиться к максимально возможной концентрации угля при получении текучих суспензий (водоугольных суспензий (ВУС)), обладающих способностью легкой перекачки и транспортирования по трубопроводам. Как правило, степень “упаковки” и, следовательно, концентрация системы микрочастиц угля возрастает, когда мелкие частицы вводятся в группу более крупных, заполняя пустоты между ними без изменения полного занимаемого ими объема [3]. Максимальная упаковка ВУТ достигается путем обеспечения бимодального распределения по размеру частиц, т.е. организации комбинированной

пылеугольной системы, которая состоит из двух дискретных по размеру элементов функционально объединенных подсистем, более грубых и более тонких фракций. Преимущества перед “непрерывным”, т.е. нормальным распределением по размеру частиц заключается в том, что большая концентрация твердого достигается в указанном выше случае при одинаковой вязкости с данным [4-6].

В случае бимодальности ВУТ функциональные совокупности частиц каждой подсистемы ГМС, при нанесении на вероятностную шкалу (квантиль) изображаются отдельными отрезками прямых, которые характеризуются средневзвешенным диаметром  $x_0$  и углом наклона  $\beta$ , что является аналогами классических параметров, математического ожидания и, соответственно, среднеквадратического отклонения.

**Анализ результатов проведенных исследований** позволяет утверждать, что выполнение гранулометрического состава бимодальным способствует снижению вязкости суспензии [6, 7]. При этом ВУС на основе углей одномодального гранулометрического состава при удовлетворительных начальных характеристиках оказалась динамически нестабильной (рис. 1) [8].

Ранее в работе [9] проведены исследования реологических характеристик и стабильности водоугольных суспензий на основе бурого угля. Показана возможность

получения высококонцентрированных водоугольных топливных суспензий, пригодных для гидротранспортирования и последующего прямого сжигания. Авторами сделан вывод о необходимости получения суспензии с требуемыми структурно-реологическими и теплотехническими характеристиками, обладающими статической и динамической стабильностью для их эффективного транспортирования по трубопроводу с последующим прямым сжиганием в топках ТЭЦ и котельных [4, 9].

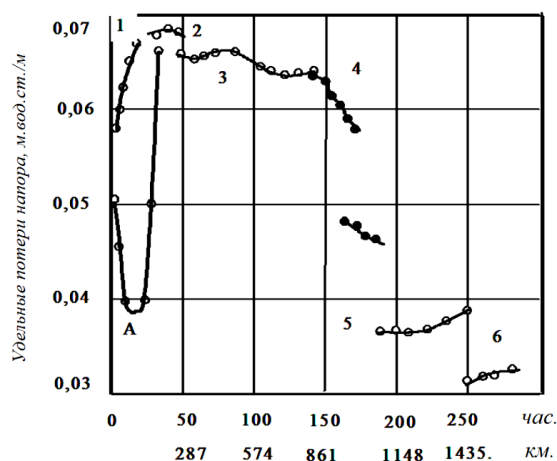


Рис. 1. Изменение удельных потерь напора при транспортировании ВУС на основе угля марки

Ж трубопроводным гидротранспортом:

А – ГМС А, ( $C = 63,7 \%$ ,  $\dot{\epsilon} = 10\text{--}2,7 \text{ с}^{-1}$ ,  $t = 25\text{--}28^\circ \text{C}$ ); 1–6 – бимодальные ГМС при  $\dot{\epsilon} = 7,5; 6,2; 5,0; 3,7; 2,5$  и  $2,0 \text{ с}^{-1}$

Широкое распространение получила технологическая схема фирмы JGC Corp (Япония) которая занимается производством ВУТ с гранулометрическим составом, близким к бимодальному. Особенностью схемы приготовления является двухстадийное мокрое измельчение угля в двух шаровых мельницах с низкой и высокой концентрацией угля.

В работе [10] доказана принципиальная возможность обеспечения максимальной концентрации ВУС за счет формирования в ГМС двух преимущественных размеров частиц. Определено, что параметр, характеризующий бимодальность ГМС твердой фазы, определяется разницей в пористости слоя частиц с максимальным преимущественным размером, и пористостью слоя всей твердой фазы суспензии.

В работах [11, 12] реализовано получение ВУС на основе смеси углей разной степени метаморфизма в опытно-промышленных масштабах с достижением бимодального ГМС на базе имеющегося размольного оборудования. Лучшие свойства ВУС из смеси каменного и бурого угля получены в области формирования бимодального ГМС.

В работе [13] предложено задать критерий, характеризующий бимодальность гранулометрического состава ВУТ ( $\Xi = \Gamma_1/\Gamma_2$ ). Параметры  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$

$$\Gamma_1 = \frac{P_1}{P_2}; \quad \Gamma_2 = \frac{P_3}{P_2}, \quad (1)$$

полностью определяют удельное количество как крупной  $P_3$  и мелкой  $P_1$ , так и промежуточной  $P_2$  фракции произвольного ГМС

Это позволяет в полной мере определить бимодальность ГМС количественно.

$P_2 = 1 - P_1 - P_3$ ;  $P_2 = 1 - P_2 (\Gamma_1 + \Gamma_2)$  и, в результате,

$$P_2 = \frac{1}{1 + \Gamma_1 + \Gamma_2}. \quad (2)$$

Использование данных параметров дает возможность наиболее точным образом оценить влияние ГМС и параметра бимодальности твердого компонента ВУТ на реологические и гидродинамические характеристики топливной водоугольной суспензии. Такой подход позволяет получать строго сопоставимые результаты по сопротивлению для различных вариантов бимодального состава ВУТ. Это дает возможность отследить влияние  $G_1, G_2, G_3$  и  $\Xi$  при различной концентрации твердого  $C$  на реологические и гидравлические параметры ВУТ, то есть в результате анализа определить оптимальные по сопротивлению значения параметров бимодальности.

**Целью работы** является исследование метода получения рационального гранулометрического состава твердой фазы водоугольного топлива на основе применения кластерной гипотезы.

**Изложение основного материала.** Как следует из результатов многочисленных экспериментов, для вполне адекватного определения удельной поверхности продуктов помола следует использовать два идентифицирующих нормальное распределение параметра:  $x_0$  и  $\beta$ , которые являются аналогами классических параметров статистического распределения – математического ожидания и среднеквадратического отклонения.

Таким образом, по результатам анализа можно сделать следующий вывод: в процессе измельчения твердого материала параметры нормального распределения частиц угля могут идентифицировать величину удельной поверхности молотой пыли. При соблюдении заданных условий помола удельная поверхность связана с временем помола.

Исходя из теоретически и экспериментально установленного в работе [13] закона нормального распределения логарифмов диаметров частиц в измельченном материале, найдем его удельную поверхность в зависимости от параметров нормального распределения логарифмов диаметров частиц.

Теоретически при форме шаров или кубической форме частиц удельная поверхность полидисперсного измельченного материала может быть определена [14] из выражения

$$S = \frac{6}{\rho_n} \int_0^{\infty} F(x) \frac{dx}{x}, \text{ см}^2 / \text{г}, \quad (3)$$

где  $F(x)$  – дифференциальная кривая весового распределения частиц по диаметрам (плотность распределения),  $1/\text{см}$ ;  $\rho$  – плотность материала,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

С учетом закона нормального распределения частиц ГМС найдем:

$$\begin{aligned} F(x) &= \frac{d}{dx} \Phi \left( \frac{\ln x - \ln x_0}{\ln \beta} \right) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi \ln \beta}} \frac{1}{x} e^{-\frac{(\ln x - \ln x_0)^2}{2 \ln^2 \beta}} \end{aligned} \quad (4)$$

В уравнении (3) заменим функцию  $F(x)$  ее значением из выражения (4), и выполним замену переменных в подынтегральном выражении

$$\frac{dx}{x} = d(\ln x).$$

**При этом соответственно изменяются и границы интегрирования:**

$$S = \frac{6}{\sqrt{2\pi \ln \beta} \rho_n} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{x} e^{-\frac{(\ln x - \ln x_0)^2}{2 \ln^2 \beta}} d(\ln x) \quad (5)$$

Обозначим

$$z = \frac{\ln x - \ln x_0}{\ln \beta}, \quad \omega = z + \ln \beta \quad \text{и} \quad d\omega = dz$$

и выполнив в уравнении (5) замену переменных, получим

$$S = \frac{6e^{\frac{\ln^2 \beta}{2}}}{\rho_n x_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{\omega^2}{2}} d\omega.$$

Второй множитель в уравнении представляет собой интеграл нормального распределения, который в пределах от  $-\infty$  до  $+\infty$  равен 1.

Следовательно, окончательно удельная поверхность измельченного угля определяется средневесовым значением логарифмов диаметров частиц  $x_0$  при их нормальном распределении и величиной, характеризующей среднеквадратическое отклонение :

$$S = \frac{6e^{\frac{\ln^2 \beta}{2}}}{\rho_n x_0}, \quad (6)$$

По уравнению (6) может быть также получена удельная поверхность частиц пыли в диапазоне диаметров от  $x_1$  до  $x_2$ .

По результатам помола угля в шаровой мельнице МШЦ (рис. 2) можно утверждать, что при закладке шаров одинакового диаметра продукт помола имеет нормальное распределение по диаметрам (одномодальное). В то же время для бимодального ГМС необходимо существенное отклонение от этой закономерности распределения диаметров частиц, что должно выражаться в наличии фракции, которая имеет существенно меньшую весовую долю по сравнению с аналогичной (по диапазону диаметров

частиц) в нормальном распределении. Графически это выражается изломом угла наклона прямой на квантили распределения в локальной области промежуточной фракции  $X_{П1} - X_{П2}$ . В то же время закладка шаров разных диаметров при помоле угольной массы обуславливает нужный эффект. Появляются зоны с переменным углом наклона (это видно на соответствующих графиках изменения ГМС при помоле).



Рис. 2. Шаровая мельница тонкого помола (МШЦ)

Является вполне очевидным, что первопричиной проявления бимодальности угольной пыли является сложность качеств исходной угольной массы, для которой характерной является трещиновато-пористая минерало-органическая структура, совершенно не свойственная большинству веществ, таких, как тот же кварц. Это может обуславливать не только количественные – размеры частиц, но и качественные – верхний и нижний пределы размеров частиц в отдельных группах-фракциях, имеющих одинаковые параметры статистического распределения (кластеров) практически стабильны, что является результатом одинаковой энергии разрушения углематериала при соударении двух стальных шаров с конкретными размерами в мельнице. В зависимости от

типоразмера шаров соударение реализует на разрушение вполне определенный диапазон энергий, характеристики которого зависят от размеров и скорости вращения мельницы, геометрических и массовых параметров указанных тел.

Соударение целесообразно характеризовать такими показателями (табл. 1).

1. Условная энергия удара

$$\varepsilon_y = V^2 m_i / V^2 m_{10} = m_i / m_{10},$$

где  $V$  – скорость падения шара в мельнице;  $m_i$  и  $m_{10}$  – массы текущего бьющего шара и, соответственно шара минимального размера в закладке.

2. Условная сумма плоскостей,

$$S_p = (S_i + S_j) / S_{10},$$

где  $S_i$  и  $S_j$  – Мидели текущих шаров в соударении.

3. Коэффициент помола  $K_n = \varepsilon_y \cdot S_p$ .

4. Вероятность соударения шаров с размерами

$$d_i \text{ и } d_j, P_y = \omega_i \cdot \omega_j,$$

где  $\omega_i \cdot \omega_j$  – удельное содержание шаров размером  $d_i$  и  $d_j$  в закладке.

5. Условная энергия столкновения,  $\varepsilon = K_n \cdot P_y$ .

Гипотеза настоящего исследования состоит в том, что существование различных зон (кластеров) ГМС может быть объяснено различной энергетикой (удельной энергией) столкновения мелющих тел, при помоле определенной угольной смеси. Распределение энергетики удара для различных вариантов столкновения (что соответствует распределению кластеров в ГМС помола) представлено в табл. 1.

Таблица 1

Условные энергии соударения шаров

| Состав соударения | Условная энергия удара, $\varepsilon_y$ | Условная сумма плоскостей, $S_p$ | Коэффициент помола, $K_n$ | Вероятность удара большого шара, $P_y$ | Условная энергия столкновения, $\varepsilon$ |
|-------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|
| К-К               | 64                                      | 32                               | 2048                      | 0,36                                   | 737,28                                       |
| К-ПР              | 64                                      | 20                               | 1280                      | 0,12                                   | 153,6                                        |
| К-М               | 64                                      | 17                               | 1088                      | 0,12                                   | 130,56                                       |
| ПР-К              | 8                                       | 20                               | 160                       | 0,12                                   | 19,2                                         |
| ПР-ПР             | 8                                       | 8                                | 64                        | 0,04                                   | 2,56                                         |
| ПР-М              | 8                                       | 5                                | 40                        | 0,04                                   | 1,6                                          |
| М-КР              | 1                                       | 17                               | 17                        | 0,12                                   | 2,04                                         |
| М-ПР              | 1                                       | 5                                | 5                         | 0,04                                   | 0,2                                          |
| М-М               | 1                                       | 2                                | 2                         | 0,04                                   | 0,08                                         |
| сумма             |                                         |                                  |                           |                                        | 1047,12                                      |

Согласно «поверхностной» гипотезе Риттингера, работа (энергия), затрачиваемая на измельчение частиц вещества, пропорциональна вновь образованной поверхности материала. При этом на образование единицы новой

поверхности для конкретного материала затрачивается постоянная работа, которая определяется опытным путем и может быть названа удельной работой измельчения. Общая работа  $A_s$ , затрачиваемая на измельчение материала, будет равняться:

$$A_s = 6A_{num}D^2(i-1) \quad (7)$$

где  $A_{num}$  – удельная работа измельчения;

$D$  – исходный размер (ребра) тела кубической формы;

$i$  – степень измельчения.

Тем временем более корректное на первый взгляд соотношение  $A = A_y + A_s$ , предложенное академиком П.А. Ребиндером, согласно которому работа, затрачиваемая на измельчение материала, представляет собой сумму работ, затрачиваемых на упругие деформации тела и на образование новых поверхностей [15], именно вследствие трещиноватости (наличия множества концентраторов напряженности, инициирующих отсутствие упругих деформаций,  $A_y \rightarrow 0$ ) в действительности не является таковым.

Поскольку для твердой компоненты угля ВУТ характерно  $i \gg 1$  соотношение (7) с заменой  $6A_{num}D^2(i-1) = S_\Sigma$  для конечного этапа измельчения угольной массы может быть записано в виде  $A_s = A_{num}S_\Sigma$ , а для отдельного кластера

$$A_{si} = A_{numi}S_i, \quad (8)$$

где  $A_{si}$  – работа (механическая энергия) измельчения угля парой шаров  $i$ -го кластера;  $A_{numi}$  – удельная работа измельчения в пределах  $i$ -го кластера;  $S_i$  – поверхность пыли в пределах  $i$ -го кластера.

Предполагая далее, что удельная поверхность пыли в кластере пропорциональна работе столкновения шаров в различном сочетании, а также используя выражение для диапазона каждого из диаметров кластеров, получаем распределение удельной поверхности продуктов помола, при этом границы зон определяются по результатам пробного помола в мельнице (рис. 3).

Для определения дискретного изменения распределения удельной поверхности каждого из кластеров при

помоле использованием текущих значений  $x_0$  и  $\beta$ , зависящих от времени помола, целесообразно применять соотношения (9), (10), которые позволяют, используя полученные экспериментальные данные, выполнить аппроксимации постоянных  $A$  и  $B$  для каждого из них от указанного параметра.

$$\lg x_0 = At, \quad (9)$$

$$\lg^2 \beta = B^2t, \quad (10)$$

где  $t$  – время измельчения;

$A$ ,  $B$  – константы данного процесса измельчения.

Для возможности сопоставления распределения эквивалентных энергий согласно кластерной гипотезе  $\varepsilon_e$  с полученными опытным путем значениями удельных поверхностей пыли, эквивалентным энергиям  $\varepsilon_s$ , в пределах каждой из фракций-кластеров распределения, величины рассчитанных условных энергий  $\varepsilon_i$  были умножены на нормирующий коэффициент  $k_n = \sum S_{pi} / \sum \varepsilon_i$ , где  $\sum S_{pi}$  – суммарная поверхность пыли в конце помола  $\sum \varepsilon_i$  – суммарная условная энергия соударений при помолу.

#### Результаты исследований.

Результаты сопоставления полученных данных: расчетных (определение энергий кластеров) и экспериментальных (получение величин поверхностей, соответствующих определенному конкретному кластеру) приведены в табл. 2. Выполненное в нижней части данной таблицы объединение последовательно расположенных кластеров в целом соответствует условиям корректности кластерной гипотезы, поскольку частицы пыли определенного размера частично образуются при столкновении шаров, характеризующихся ударами с уровнями энергий столкновения соразмерной величины.

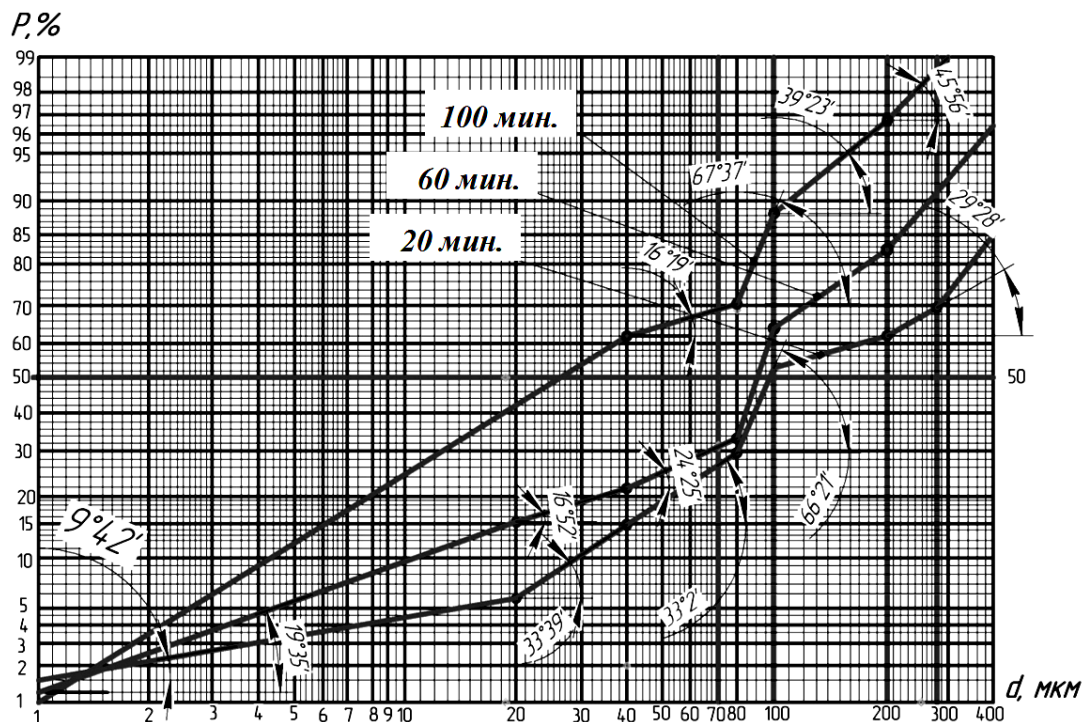


Рис. 3. Графики зависимости фракционного состава измельченного угля от времени помола

Учитывая также недостаточное количество факторов, ограничивающих диапазоны конкретных кластеров и соотношение соответствующих энергий и ограниченность данных относительно возможности прямого (без исправлений) использования в этом случае зависимости Риттингера, а также недостаточную проработанность кластерной гипотезы в пределах данной работы как в

теоретическом, так и эмпирическом отношении относительное несовпадение распределения эквивалентных энергий, просчитанных в пределах данной гипотезы и полученных во время ограниченных по объему опытов, в пределах 30% по нашему мнению указывает на корректность ее основных положений и на перспективность работ по ее детализации и обогащению новыми положениями.

Таблица 2

**Сопоставление распределения эквивалентных энергий  
(расчетных "кластерных" и опытных "поверхностных")**

| № кластеров↓                       |                        | Эквивалентные энергии |              | Отклонения |                  |
|------------------------------------|------------------------|-----------------------|--------------|------------|------------------|
| По фракционному распределению пыли | По кластерной гипотезе | $\epsilon_s$          | $\epsilon_c$ | Абсолютное | Относительное, % |
| 1                                  | 1                      | 468,5                 | 420          | 48,5       | -                |
| 2                                  | 2                      | 53,66                 | 87,5         | 33,8       | -                |
| 3                                  | 3                      | 44,58                 | 74,4         | 29,8       | -                |
| 4                                  | 4                      | 19,53                 | 10,9         | 8,6        | -                |
| 5                                  | 5-9-9                  | 10,2                  | 3,6          | 6,6        | -                |
| 1+2                                | 1+2                    | 522,2                 | 507,5        | 14,7       | 2,8              |
| 3+4                                | 3                      | 64,1                  | 74,4         | 10,3       | 13,8             |
| 5                                  | 4+5                    | 10,2                  | 14,3         | 4,1        | 28,6             |

Следует также отметить, что при дальнейшей разработке предлагаемой гипотезы и дальнейшей детализации, с ее помощью представляется возможным теоретически прогнозировать результаты помола угля произвольной шаровой мельницей с конкретными геометрическими и режимными характеристиками.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что бимодальность ГМС способствует снижению вязкости суспензии за счет роли мелкой фракции твердого компонента ВУТ, которая способствует перемещению крупной фракции угля в его составе с более низкими показателями сопротивления. В результате проведения экспериментальных исследований были определены реологические и гидродинамические характеристик ВУТ, изучены закономерности влияния ГМС твердого компонента ВУТ на его технические показатели [13].

Ряд ученых [16–18] объясняют возможность компактного размещения частиц малого диаметра между частицами большего диаметра за счет плотной упаковки частиц и оптимальных реологических свойств двухфазной жидкости с бимодальным ГМС, которые образуют в жидкой фазе определенную структуру упаковки частиц [7,19–21], которую целесообразно характеризовать как соответствующее соотношение диаметров эквивалентных крупных и мелких частиц. Исходя из анализа полученных результатов указанного коллектива ученых, данное отношение для достижения рациональной упаковки должно составлять 8. В связи с этим нами были выполнены расчеты кратности диаметров мелких и крупных частиц

эквивалентных диаметров в составе твердой фазы ВУТ. Расчет выполнялся для ГМС ВУТ с минимальными значениями потерь давления при транспортировании и в этом случае нами получено следующее рациональное отношение диаметров:

$$\delta = \frac{D_{кр}}{D_{мелк}} = \frac{0,1087}{0,017} = 6,39, \quad (11)$$

где  $D_{кр}$  и  $D_{мелк}$  – эквивалентный диаметр крупной и мелкой частицы соответственно.

Таким образом, используя различные закладки шаров и разные сроки помола можно добиться необходимого бимодального ГМС для любой шаровой мельницы. После процесса помола определение объема конкретных фракций угля в зависимости от размера проводилось с помощью ситового анализатора (рис. 4).



Рис. 4. Анализатор ситовой  
вибрационный 236Б Гр

Для проведения экспериментальных исследований процессов транспортирования, были изготовлены образцы ВУТ бимодальных ГМС с объемной концентрацией твердого компонента 60, 62,5 и 65% (рис. 5).

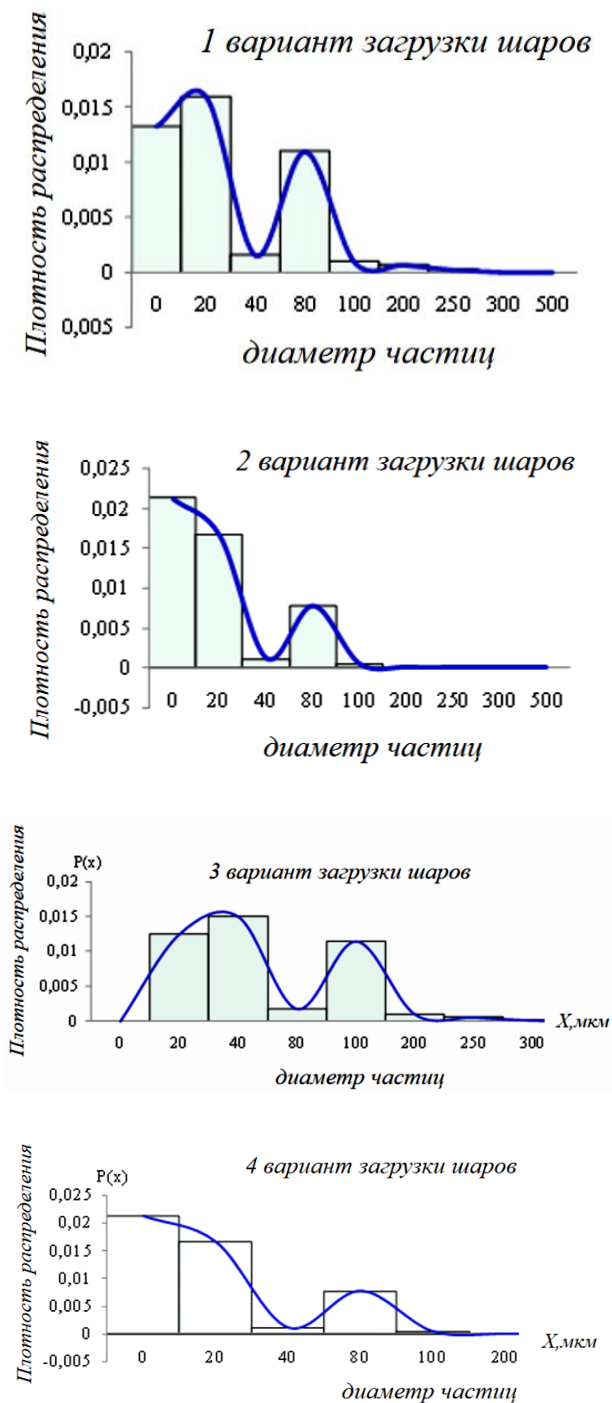


Рис. 5. Статистическая плотность распределения молотого угля для приготовления ВУТ при различных вариантах загрузки шаровой мельницы

В зависимости от времени помола были получены удельные поверхности пыли для каждого из кластеров (рис. 6).

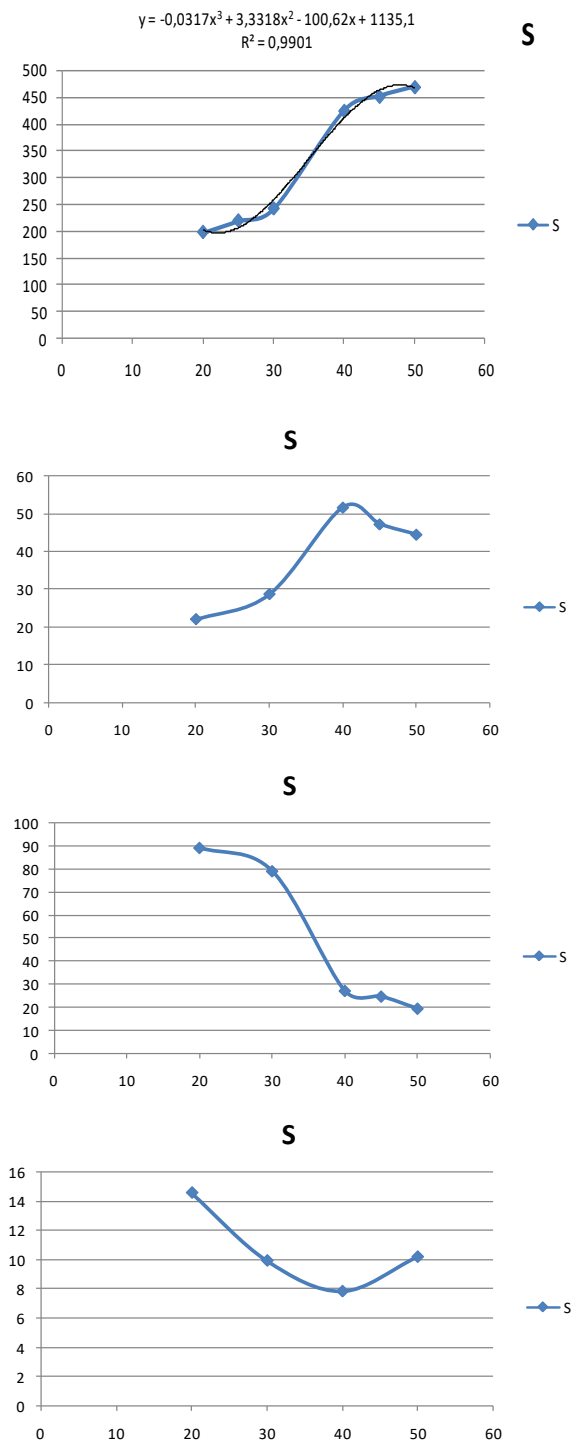


Рис. 6. Зависимости полученных удельных поверхностей пыли для каждого из четырех кластеров от времени помола в шаровой мельнице

В результате выполнения пробных помолов угля и выполнения ситовых анализов получены экспериментальные зависимости (рис. 7).

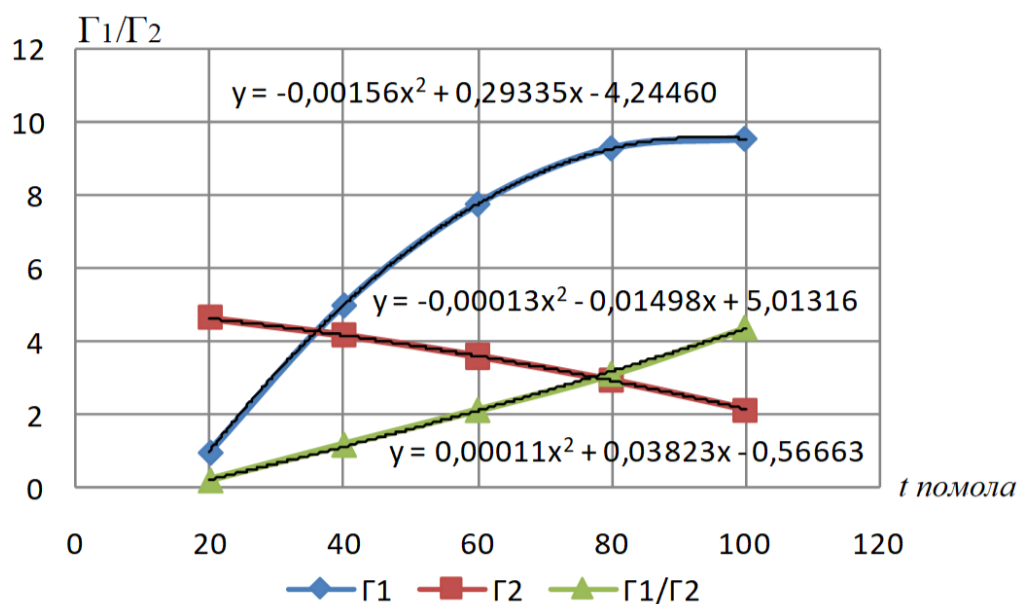


Рис. 7. Зависимость параметров  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  и критерия бимодальности  $\Gamma_1/\Gamma_2$  от времени помола угля

**Выводы.** Выполненный в работе анализ изменения удельных потерь напора при транспортировании ВУС на различные расстояния позволил сделать вывод о значительном влиянии ГМС различных вариантов на структурную вязкость, динамическую стабильность и удельные потери давления при транспортировании суспензии трубопроводным гидротранспортом. Установлено, что максимальная упаковка ВУТ достигается путем обеспечения бимодального распределения по размеру частиц в его составе и организации комбинированной пылеугольной системы, которая состоит из двух дискретных по размеру элементов функционально объединенных подсистем, более грубых и более тонких фракций.

В результате аппроксимации полученных кривых для 3-го варианта закладки шаров стандартных типоразмеров, получена зависимость модифицированного критерия бимодальности  $\Gamma_1/\Gamma_2$  от времени помола для дальнейшего ее использования при выполнении экспериментальных исследований в реализации матрицы планирования эксперимента (значения

критерия  $\Gamma_1/\Gamma_2$  для матрицы составили: 1,08, 2,45 и 3,82 соответственно).

Характер полученных кривых позволяет утверждать следующее: для получения ГМС с критерием бимодальности  $\Gamma_1/\Gamma_2 = 1,08$  необходимо осуществлять помол в шаровой мельнице в течение 40 минут;  $\Gamma_1/\Gamma_2 = 3,82$  – 90 минут. Для получения  $\Gamma_1/\Gamma_2 = 2,45$  необходимо осуществлять помол при полной закладке мельницы в течение 40 минут, после осуществить выгрузку 50% угля от первичного объема загруженного угля в барабан и продолжить помол остатка в течение 50 минут. Полученные частицы необходимо смешать в равных пропорциях.

Измельченный в лабораторной шаровой мельнице исходный рядовой уголь смешивался с водой. После смешивания топливо выдерживалось в течение 2-х часов, для активации угольных частиц.

#### Список литературы

1. Махутов Н. А., Москвичев В. В., Кулагин В. А. Современные технологии топливно-энергетического комплекса и возможности развития железнодорожного

транспорта Сибири. Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – № 1 (61). – С. 64–73.

2. Мурко В. И., Джундубаев А. К., Баранова М. П., Бийбосунов А. И., Кулагин В. А. Гидротранспортные топливно-энергетические комплексы. Российско-кыргызское научно-техническое сотрудничество в области теплоэнергетики. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т. – 2015. – 250 с.

3. Семененко Е.В. Перспективы применения новых технологий приготовления и транспортирования водоугольного топлива / Е.В. Семененко, И.Ю. Козар // Сб. докладов XI Международной научно-технической конференции «Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности». – Екатеринбург, 2013. – С. 20-23.

4. Мурко В.И., Вахрушева Г.Д., Федяев В.И., Карпенко В.И., Мاستихина В.П., Дзюба Д.А. Исследование получения суспензионного угольного топлива на основе тонкодисперсных отходов углеобогащения. – Журнал СФУ. Техника и технологии, 2011, 11(4), 522–526.

5. Семененко Е.В. Математическое моделирование процесса пропитывания угольных агломератов / Е.В. Семененко, И.Ю. Козарь, К.К. Подоляк // Сб. докладов «Межгосударственной научно-методической конференции «Проблемы математического моделирования» – Днепродзержинск, ДДТУ, 2013. – С. 83-85

6. Семененко Е.В., Козарь И.Ю., Подоляк К.К., Рыжова С.А. Моделирование процесса пропитывания твердых частиц жидкостью при переработке углей. Геотехническая механика. – 2013. – № 112. – С. 108–117.

7. Юдин Б.В. Разработка геомеханической модели высококонцентрированных водоугольных дисперсных систем / 25.00.20 – «Геомеханика, разрушение горных пород взрывом, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» // Юдин Борис Викторович, Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. – Кемерово. – 2001. – 155 с.

8. Круть А.А. Развитие физико-технических основ технологий приготовления и гидротранспортирования водоугольных суспензий высокой концентрации. 05.15.09 – геотехническая и горная механика. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Днепропетровск – 2011. – 278 с.

9. Мурко В.И. Разработка технологии получения водоугольного топлива из бурых углей месторождения Кара-Кече Кыргызской Республики / В.И. Мурко, А.К. Джундубаев, М.С. Султаналиев, В.А. Кулагин, М.П. Баранова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. – 2022, 15(6). – С. 648–657. – DOI: 10.17516/1999-494X-0422

10. Семененко Е.В., Рубан В.Д., Подоляк К.К. Обоснование параметров бимодального гранулометрического состава твердой фазы структурированных суспензий. Геотехническая механика. – 2017. – № 134. – С.76–87.

11. Баранова М.П. Технологии получения и использования топливных водоугольных суспензий из углей различной степени метаморфизма : дис. д-ра техн. наук : 05.14.01 / Баранова Марина Петровна ; [Нац. исслед. ун-т МЭИ]. – М., 2014. – 275 с.

12. Баранова М.П., Кулагина Л.В., Екатеринбург В.М. Физико-химические основы промышленных теплотехнологий. Красноярск. Гротеск, 2018. 148 с.

13. Баранов И.О. Повышение эффективности транспортировки высококонцентрированного водоугольного топлива в гидротранспортных системах промышленных предприятий: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.12 / И. О. Баранов. – Днепропетровск, 2019. – 217 с.

14. Маев В.Е., Пономарев Н.Н. Воздухоочистители автомобильных и тракторных двигателей / Маев В.Е., Пономарев Н.Н. – М.: «Машиностроение», 1971. – 171 с.

14. Горобец Л. Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых: дис. ... докт. техн. наук: 05.15.08 / Горобец Лариса Жановна. – Д.: НГУ, 2004. – 412 с.

15. Джундубаев А.К., Мурко В.И., Баранова М.П., Султаналиев М.С. Гидротранспортные трубопроводные системы для доставки углей потребителям в Кыргызской Республике, Вестник Ассоциации выпускников КГТУ. – Красноярск. – Сиб. фед. ун-т, 2017. – Вып. 24. – С. 52–55.

16. Yuxing Zhang, Zhiqiang Xu, Dinghua Liu, Yang Chen, Wei Zhao, Guanlin Ren The influence of water occurrences in CWSs made of lignite and bituminous coal on slurrying performances, Powder Technology, 2022, 117150.

17. Xiaofeng Jiang, Shixing Chen, Lifeng Cui, Enle Xu, Hongji Chen, Xianliang Meng, Guoguang Wu. Eco-friendly utilization of microplastics for preparing coal water slurry: rheological behavior and dispersion mechanism, Journal of Cleaner Production, 2022, 330, 129881.

18. Семененко Е.В., Рубан В.Д., Подоляк К.К. Факторы, определяющие оптимальный гранулометрический состав твердой фазы структурированных суспензий / Материалы международной конференции „Форум горняков 2014”, 1-4 октября 2014 г., // „Национальный горный университет”. Днепропетровск. – 2005/4/22. – С. 162–168.

19. Свитлый Ю.Г. Гидравлический транспорт / Ю.Г. Свитлый, В.С. Белецкий. – Донецк: Восточный издательский дом, 2009. – 436 с.

20. Лотов В.А. Управление процессами формирования дисперсных структур: учебное пособие /В.А. Лотов, В.А. Кутугин; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 336 с.

### References

1. Makhutov N. A., Moskvichev V. V., Kulagin V. A. Modern technologies of the fuel and energy complex and the possibilities of developing railway transport in Siberia. Modern technologies. Systems analysis. Modeling. – 2019. – № 1 (61). – P. 64-73.

2. Murko V. I., Dzhundubaev A. K., Baranova M. P., Biybosunov A. I., Kulagin V. A. Hydrotransport fuel and energy complexes. Russian-Kyrgyz scientific and technical

cooperation in the field of thermal power engineering. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University. – 2015. – 250 p.

3. Semenenko E. V. Prospects for the application of new technologies for the preparation and transportation of coal-water fuel / E. V. Semenenko, I. Yu. Kozar // Collection of papers from the XI International Scientific and Technical Conference "Technological Equipment for the Mining and Oil and Gas Industry". – Ekaterinburg, 2013. – pp. 20-23.

4. Murko V.I., Vakhrusheva G.D., Fedyaev V.I., Karpenok V.I., Mastikhina V.P., Dzyuba D.A. Study of the production of suspension coal fuel based on finely dispersed coal washing waste. – Journal of SFU. Engineering and Technology, 2011, 11(4), 522–526.

5. Semenenko E.V. Mathematical modeling of the impregnation process of coal agglomerates / E.V. Semenenko, I.Yu. Kozar, K.K. Podolyak // Collection of papers. Reports of the Interstate Scientific and Methodological Conference "Problems of Mathematical Modeling" – Dneprodzerzhinsk, DDTU, 2013. – Pp. 83-85

6. Semenenko E.V., Kozar I.Yu., Podolyak K.K., Ryzhova S.A. Modeling the process of impregnation of solid particles with liquid during coal processing. Geotechnical mechanics. – 2013. – № 112. – Pp. 108-117.

7. Yudin B.V. Development of a geomechanical model of highly concentrated coal-water dispersed systems / 25.00.20 – "Geomechanics, destruction of rocks by explosion, mine aerogas dynamics and mining thermal physics" // Yudin Boris Viktorovich, Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. – Kemerovo. – 2001. – 155 p.

8. Krut A. A. Development of physical and technical foundations of technologies for the preparation and hydrotransportation of high-concentration coal-water suspensions. 05.15.09 – geotechnical and rock mechanics. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. – Dnepropetrovsk – 2011. – 278 p.

9. Murko V. I. Development of technology for producing coal-water fuel from brown coals of the Kara-Keche deposit in the Kyrgyz Republic / V. I. Murko, A. K. Dzhundubaev, M. S. Sultanaliyev, V. A. Kulagin, M. P. Baranova // Zhurn. Sib. federal.

University. Engineering and Technology. – 2022, 15(6). – P. 648–657. – DOI: 10.17516/1999-494X-0422

10. Semenenko E.V., Ruban V.D., Podolyak K.K. Justification of the parameters of bimodal granulometric composition of the solid phase of structured suspensions. Geotechnical Mechanics. – 2017. – № 134. – Pp. 76–87.

11. Baranova M.P. Technologies for the production and use of fuel coal-water suspensions from coals of varying degrees of metamorphism: Dis. of Doctor of Engineering Sciences: 05.14.01 / Baranova Marina Petrovna; [National Research University MPEI]. – Moscow, 2014. – 275 p.

12. Baranova M.P., Kulagina L.V., Ekaterinchev V.M. Physicochemical Foundations of Industrial Heat Technologies. Krasnoyarsk. Grotesque, 2018. 148 p.

13. Baranov I. O. Improving the Efficiency of Transportation of Highly Concentrated Coal-Water Fuel in Hydraulic Transport Systems of Industrial Enterprises: Dis. ... Cand. Sci. (Eng.): 05.22.12 / Baranov I. O. – Dnepropetrovsk, 2019. – 217 p.

14. Maev V. E., Ponomarev N. N. Air Cleaners for Automobile and Tractor Engines / Maev V. E., Ponomarev N. N. – Moscow: “Mashinostroenie”, 1971. – 171 p.

14. Gorobets L. Zh. Development of Scientific Foundations of Grinding Solid Minerals: Dis. ... Doctor of Engineering Sciences: 05.15.08 / Gorobets Larisa Zhanovna. – D.: NSU, 2004. – 412 p.

15. Dzhundubaev A.K., Murko V.I., Baranova M.P., Sultanaliev M.S. Hydrotransport pipeline

systems for delivering coal to consumers in the Kyrgyz Republic, Bulletin of the KSTU Alumni Association. – Krasnoyarsk. – Siberian Federal University, 2017. – Issue 24. – P. 52–55.

16. Yuxing Zhang, Zhiqiang Xu, Dinghua Liu, Yang Chen, Wei Zhao, Guanlin Ren The influence of water occurrences in CWSs made of lignite and bituminous coal on slurring performance, Powder Technology, 2022, 117150.

17. Xiaofeng Jiang, Shixing Chen, Lifeng Cui, Enle Xu, Hongji Chen, Xianliang Meng, Guoguang Wu. Eco-friendly utilization of microplastics for preparing coal water slurry: rheological behavior and dispersion mechanisms, Journal of Cleaner Production, 2022, 330, 129881.

18. Semenenko E.V., Ruban V.D., Podolyak K.K. Factors Determining the Optimum Granulometric Composition of the Solid Phase of Structured Suspensions / Proceedings of the International Conference "Miners' Forum 2014", October 1-4, 2014 // National Mining University. Dnipropetrovsk. – 2005/4/22. – P. 162-168.

19. Svitly Yu.G. Hydraulic Transport / Yu.G. Svitly, V.S. Beletsky. - Donetsk: Vostochny Publishing House, 2009. - 436 p.

20. Lotov V.A. Control of Dispersed Structure Formation Processes: A Tutorial / V.A. Lotov, V.A. Kutugin; Tomsk Polytechnic University. - Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2013. – 336 p.

*Статья поступила в редакцию 02.12.2025*

### Информация об авторах

**Баранов Игорь Олегович**, к-т тех.н., доцент, доцент кафедры транспортных технологий Луганского государственного университета имени Владимира Даля.  
SPIN-код: 1978-3021, AuthorID: 1236413  
E-mail: baranov\_90@inbox.ru

### Information about the authors

**Baranov Igor Olegovich**, candidate of technical sciences, associate professor of the department of Transport Technologies of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.  
SPIN-код: 1978-3021, AuthorID: 1236413  
E-mail: baranov\_90@inbox.ru

**Кущенко Александр Владимирович,**

доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных технологий Луганского государственного университета имени Владимира Даля.

*SPIN-код: 1480-5217, AuthorID: 1228863*

**E-mail:** akm48848@gmail.com\_

**Kushchenko Alexander Vladimirovich,**

candidate of technical sciences, associate professor of the department of Transport Technologies of the department of Transport Technologies of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

*SPIN-код: 1480-5217, AuthorID: 1228863*

**E-mail:** akm48848@gmail.com\_

**Капустин Денис Алексеевич, д-р тех.н.,**

доцент, заведующий кафедрой информационных образовательных технологий и систем ФГБОУ ВО «Луганский государственный педагогический университет», г. Луганск

*SPIN-код: 2350-9390, AuthorID: 945762*

**E-mail:** kap-kapchik@mail.ru

**Kapustin Denis Alekseevich,**

doctor of technical sciences, head of chair of Information educational technologies and systems Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Lugansk State Pedagogical University», Lugansk.

**E-mail:** kap-kapchik@mail.ru

**Дейнека Иннеса Григорьевна, д-р тех.н.,**

профессор кафедры легкой и пищевой промышленности Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

*Author ID: 855491, SPIN-код: 4465-3168*

*ORCID: 0009-0001-8982-2013*

**E-mail:** kaf\_lipp@mail.ru

**Deyneka Innesa Grigorievna,**

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Light and Food Industry, Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.

*Author ID: 855491, SPIN-code: 4465-3168,*

*ORCID: 0009-0001-8982-2013*

**E-mail:** kaf\_lipp@mail.ru

---

**Для цитирования:**

Баранов И. О., Кущенко А. В., Капустин Д. А., Дейнека И. Г. Исследование метода получения рационального гранулометрического состава твердой фазы водоугольного топлива // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2026 – № 1(6). – С. 5-19.

**For citation:**

Baranov I. O., Kushchenko A. V., Kapustin D. A., Deineka I. G. Study method for obtaining rational granulometric composition solid phase of coal-water fuel // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering. – 2026 – № 1(6). – P. 5-19.

---

УДК 621: 620.22

## ВЛИЯНИЕ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ МЕТАЛЛА НА КОНСТРУКЦИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ И ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЕЖНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Киреев А. Н., Ливцов Ю. В., Безкоровайный В. С., Киреева М. А.

## THE INFLUENCE OF MACROSCOPIC METAL DEFECTS ON THE STRUCTURAL STRENGTH AND OPERATIONAL RELIABILITY OF PARTS IN MECHANICAL ENGINEERING

Kireev A. N., Livtsov Yu. V., Bezkorovainyi V. S., Kireeva M. A.

**Аннотация.** Статья посвящена анализу влияния дефектов металла на прочностные свойства деталей продукции машиностроения. Представлена классификация и анализ макроскопических дефектов металла деталей машиностроительной продукции. Даны примеры объемных дефектов, таких как: поры, раковины, неметаллические включения. Приводятся примеры плоскостных дефектов, таких как: трещины, флокены, ликвации. Показано, как влияет форма, расположение и ориентация дефектов на конструкционную прочность.

**Ключевые слова:** машиностроение, качество, надежность, дефект, конструкционная прочность, напряжение, коэффициент концентрации напряжения.

**Abstract.** The article is devoted to the analysis of the influence of metal defects on the strength properties of mechanical engineering product parts. The classification and analysis of macroscopic metal defects of machine-building product parts is presented. Examples of volumetric defects such as pores, shells, and nonmetallic inclusions are presented. Examples of planar defects such as cracks, flocculations, liquations are presented. It is shown how the shape, location, and orientation of defects affect structural strength.

**Keywords:** mechanical engineering, quality, reliability, defect, structural strength, stress, stress concentration coefficient.

**Введение.** Надежность является одним из важнейших показателей качества машиностроительной продукции. На надежность продукции влияют множество различных факторов, таких как условия эксплуатации продукции, совершенство технологии изготовления, совершенство конструкции и т.д. Но одним из важнейших свойств, влияющих на надежность,

является конструкционная прочность материалов деталей машиностроительной продукции [1, 2].

Конструкционная прочность представляет собой интегральную характеристику материала, определяющую его способность к устойчивому и продолжительному функционированию в реальных условиях эксплуатации. Эта

характеристика зависит не только от исходных физико-механических свойств, но и от структурного совершенства, а также наличия внутренних и поверхностных дефектов.

**Основная часть.** Макроскопические дефекты, присутствующие в металлах и сплавах, используемых для изготовления деталей машин и агрегатов, оказывают существенное влияние на их конструкционную прочность. Степень этого влияния определяется совокупностью эксплуатационных факторов (температурный режим, давление, влажность), характером нагружения

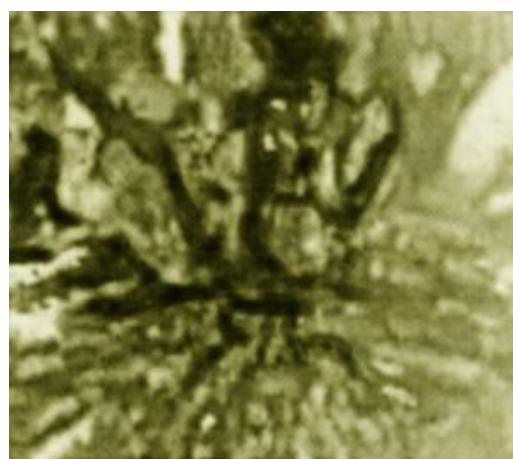
(статическое, динамическое, циклическое), а также морфологическими особенностями дефектов – их типом, геометрией и ориентацией относительно вектора действующих напряжений.

По локализации дефекты подразделяются на внутренние (не выходящие на поверхность) и поверхностные. По геометрической форме их классифицируют на объёмные и плоскостные.

К объёмным дефектам относятся, к примеру: усадочные раковины (рис. 1); газовые пузыри (рис. 2); объёмные неметаллические включения (рис. 3).



а



б



в



г

Рис. 1. Усадочные раковины в стальных отливка:

а – сосредоточенная (излом); б – рассредоточенная (излом); в, г – сосредоточенная (макротемплет)



Рис. 2. Газовые пузыри в поперечном сечении отливки

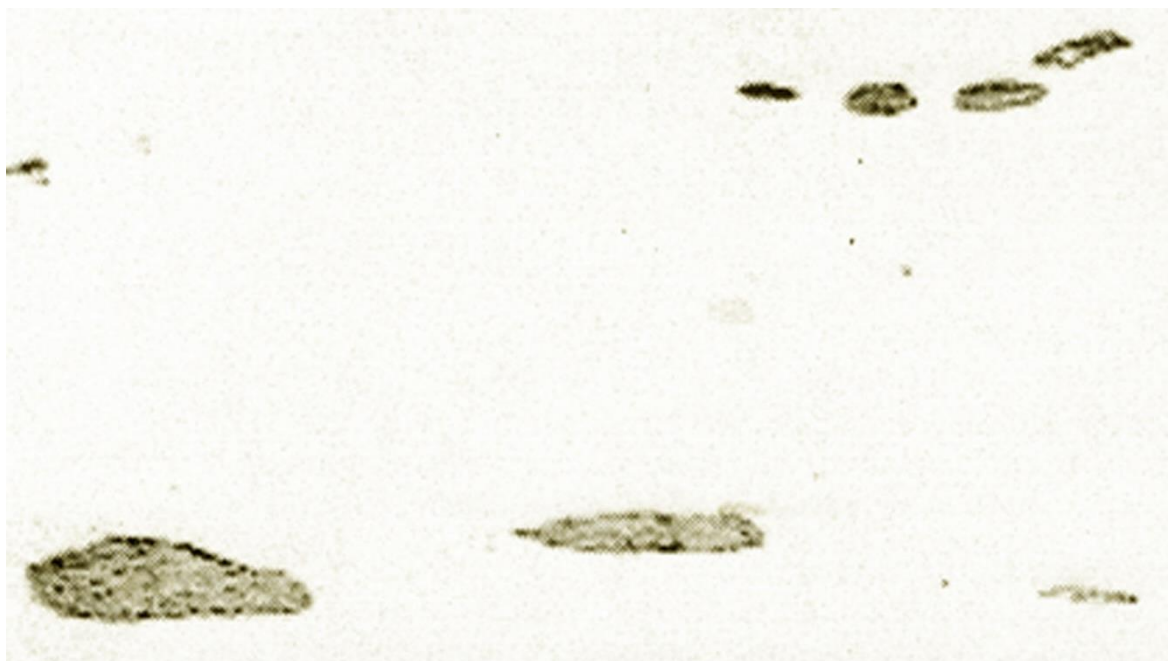


Рис. 3. Неметаллические сульфидные включения в литой стали (темплет после шлифовки)

К плоскостным дефектам относятся, к примеру: трещины различного происхождения (рис. 4), флокены (рис. 5), ликвационные зоны (рис. 6).

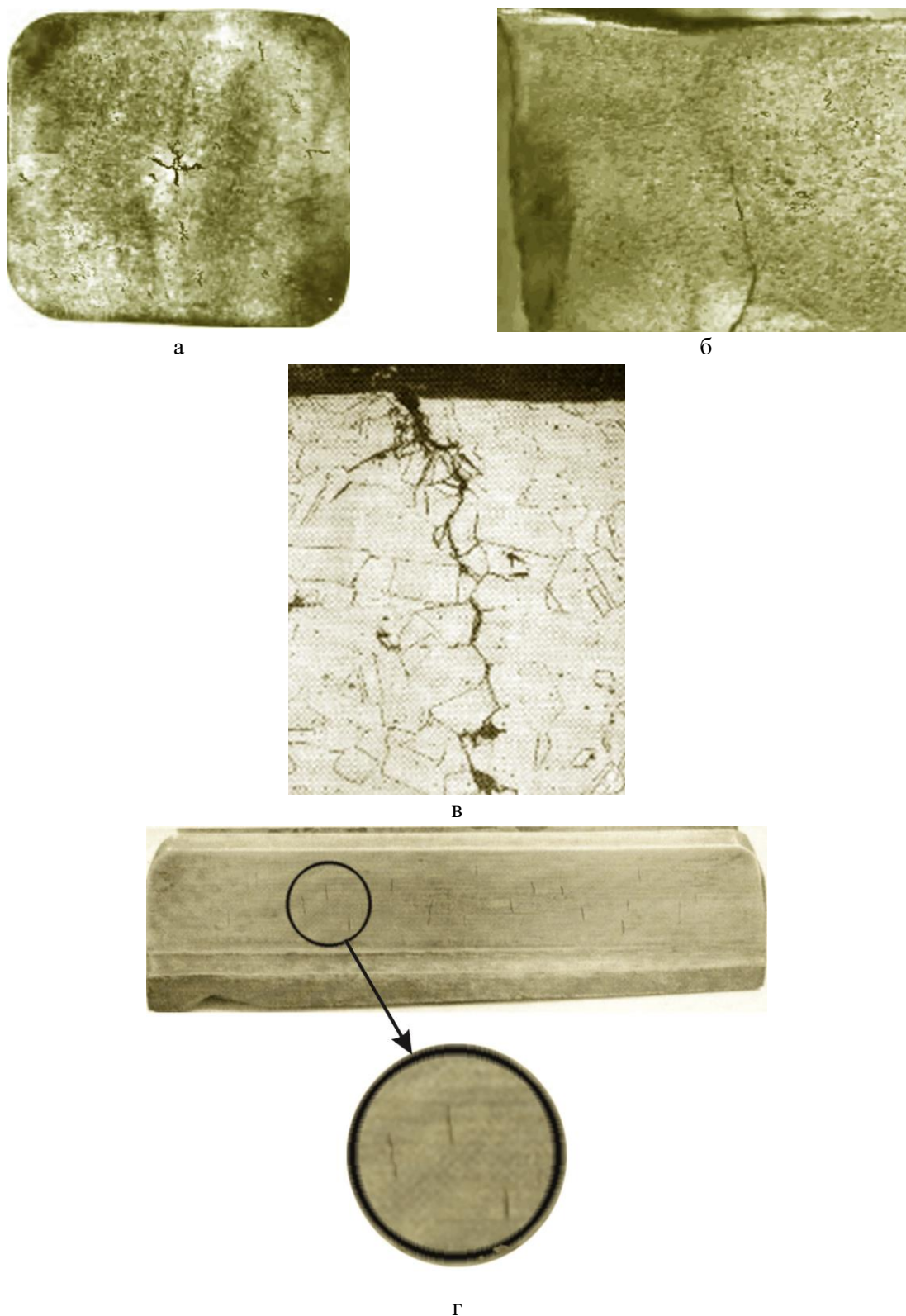
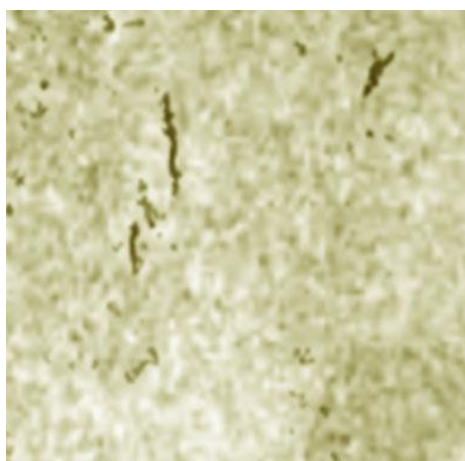
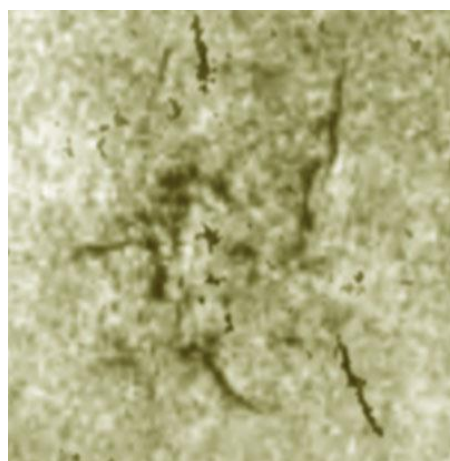


Рис. 4. Трещины различных видов:

а – горячая (макротемплет); б – холодная (макротемплет); в – межкристаллитная (микротемплет); г – шлифовочная



а



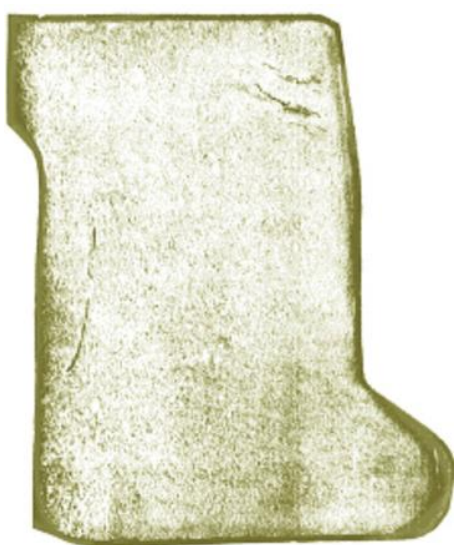
б



в

Рис. 5.Флокены:

а, б – в прокате (макротемплет); в – в кованой стали (макротемплет)



а



б

Рис. 6. Ликвационные зоны:

а – в бандаже железнодорожного колеса (макротемплет); б – в ступице цельнакатаного железнодорожного колеса (сернистый отпечаток)

Объёмные дефекты приводят к локальному уменьшению площади поперечного сечения детали. Согласно фундаментальному соотношению механики материалов:

$$\sigma = \frac{P}{S}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – напряжение, Н/м<sup>2</sup>;  $P$  – приложенная нагрузка, Н;  $S$  – площадь сечения, м<sup>2</sup>.

Снижения площади сечения  $S$  вызывает рост напряжений в дефектной зоне, что снижает несущую способность детали.

Плоскостные дефекты оказывают более критическое влияние на прочность. Нарушение сплошности материала приводит к резкой концентрации напряжений на краях дефекта. Коэффициент концентрации напряжений зависит от остроты дефекта: чем более выражена плоскостная форма (меньше радиус кривизны вершины), тем выше локальные напряжения. Графическая зависимость коэффициента концентрации напряжений  $k_\sigma$  от геометрических параметров овальных дефектов (рис. 7) наглядно демонстрирует этот эффект [3].

Особенно сильное влияние оказывает форма дефекта в случае, когда деталь подвергается знакопеременным нагрузкам.

Наибольшую опасность представляют дефекты, ориентированные перпендикулярно направлению действия максимальных растягивающих напряжений. В этом случае дефект становится эффективным концентратором напряжений и потенциальным очагом зарождения усталостных трещин. Дефекты, совпадающие по ориентации с направлением нагрузки, оказывают значительно меньшее влияние на долговечность.

Детали машин по характеру нагружения подразделяются на три группы: работающие под статическими, динамическими и повторно-переменными нагрузками. Каждая

из этих групп может быть дополнительно разделена на подгруппы в зависимости от наличия или отсутствия конструктивных концентраторов напряжений (например, галтели, отверстия, канавки).

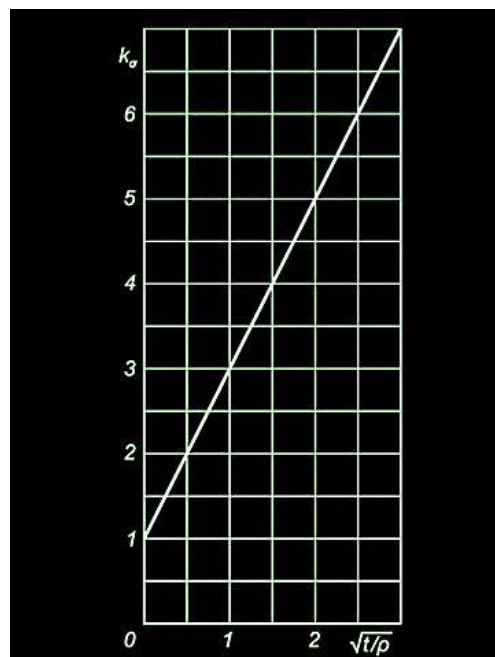


Рис. 7. Зависимость коэффициента концентрации напряжений от остроты внутренних овальных дефектов:  $k_\sigma$  – коэффициент концентрации напряжений;  $\sqrt{t/\rho}$  – характеристика остроты овального внутреннего дефекта

Для деталей с конструктивными концентраторами напряжений критически важно местоположение дефекта. Дефект, расположенный в зоне концентратора, может оказывать более разрушительное воздействие на долговечность, чем аналогичный по размеру и форме дефект вне зоны концентрации.

Для деталей без конструктивных концентраторов определяющими факторами являются местоположение, ориентация, размер и форма самого дефекта, а также уровень действующих напряжений в данной зоне.

При оценке долговечности необходимо также учитывать чувствительность материала к концентраторам напряжений (вязкость разрушения, порог трещиностойкости).

**Выводы.** Анализ влияния макроскопических дефектов позволяет сделать вывод о том, что нарушения сплошности материала являются ключевыми факторами снижения конструкционной прочности и эксплуатационной надёжности деталей машин. Они могут служить инициаторами усталостного разрушения, что создаёт риск возникновения аварийных ситуаций.

В связи с этим актуальной задачей является не только достоверное выявление дефектов на стадиях изготовления и ранней эксплуатации, но и комплексная диагностика их морфологических характеристик: типа, размеров и пространственной ориентации. Только на основе этих данных возможна объективная оценка влияния дефектов на прочность и надёжность конструкции, а также прогнозирование их поведения в процессе дальнейшей эксплуатации. Для этой цели целесообразно применение неразрушающих методов контроля, таких как: ультразвуковой [4, 5, 6], магнитный [7], электромагнитный [8] и радиационный [9].

#### Список источников

1. Баранов А.В. Надёжность и диагностика технических систем: Учебное пособие / А.В. Баранов. – Рыбинск: РГТА, 2006. – 138 с.
2. Шишмарев В.Ю. Надёжность технических систем: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.Ю. Шишмарев. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 304 с.
3. Копельман Л.А. Основы теории прочности сварных конструкций: Учебное пособие / Л.А. Копельман. – СПб.: изд-во «Лань», 2010. – 456 с.
4. Киреев А.Н. Дефектometрия при ручном контроле элементов и систем подвижного состава железных дорог ультразвуковым эхо-

методом / А.Н. Киреев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2015. – № 2 (58). – С. 24-30.

5. Киреев А.Н. Диагностирование стальных поковок ультразвуковым эхо-методом / А.Н. Киреев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – М., 2016. – Том. 82 – № 12. – С. 27-30.

6. Киреев А.Н. Расширение области применения двухчастотного метода дефектometрии при ручном ультразвуковом контроле / А.Н. Киреев // Контроль. Диагностика. – М., 2018. – № 4. – С. 58-63.

7. Добрыднев А.В. Магнитные устройства для контроля состояния узлов роботизированных машин и механизмов / А.В. Добрыднев, В.С. Безкоровайный, Н.В. Безкоровайная, М.А. Киреева // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – Луганск, 2025. – № 2 (3). – С. 31-38.

8. Герасимов В.Г. Неразрушающий контроль. Книга 3. Электромагнитный контроль / В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, В.В. Сухоруков. – М.: Высшая школа, 1992. – 312 с.

9. Клюев В.В. Теория и практика радиационного контроля / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин. – М.: Машиностроение, 1998. – 170 с.

#### References

1. Baranov A.V. Reliability and diagnostics of technical systems: Training manual / A.V. Baranov. – Rybinsk: RGATA, 2006. – 138 s.
2. Shishmarev V.Yu. Reliability of technical systems: a textbook for students. higher. studies. establishments / V.Yu. Shishmarev. – M.: Izdatel'skij centr «Akademiya», 2010. – 304 s.
3. Kopel'man L.A. Fundamentals of the theory of strength of welded structures: A textbook / L.A. Kopel'man. – SPb.: izd-vo «Lan'», 2010. – 456 s.
4. Kireev A.N. Flaw detection during manual inspection of elements and systems of railway rolling stock by ultrasonic echo method // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. – Rostov na Donu, 2015. – № 2 (58). – S. 24-30.
5. Kireev A.N. Diagnosis of steel forgings by ultrasonic echo method / A.N. Kireev // Zavodskaya

laboratoriya. Diagnostika materialov. – M., 2016. – Tom. 82 – № 12. – S. 27-30.

6. Kireev A.N. Expansion of the field of application of the two-frequency flaw detection method for manual ultrasonic testing / A.N. Kireev // Kontrol'. Diagnostika. – M., 2018. – № 4. – S. 58-63.

7. Dobrydnev A.V. Magnetic devices for monitoring the condition of components of robotic machines and mechanisms / A.V. Dobrydnev, V.S. Bezkorovajnyj, N.V. Bezkorovajnaya, M.A. Kireeva // Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo

universiteta imeni Vladimira Dalya. Mashinostroenie. – Lugansk, 2025. – № 2 (3). – S. 31-38.

8. Gerasimov V.G. Non-destructive testing. Book 3. Electromagnetic control / V.G. Gerasimov, A.D. Pokrovskij, V.V. Suhorukov. – M.: Vysshaya shkola, 1992. – 312 s.

9. Klyuev V.V. Theory and practice of radiation control / V.V. Klyuev, F.R. Sosnin. – M.: Mashinostroenie, 1998. – 170 s.

*Статья поступила в редакцию 24.12.2025*

### Информация об авторах

**Киреев Андрей Николаевич**, д-р техн.н., профессор, проректор по научной работе и инновационной деятельности Луганского государственного университета имени Владимира Даля.  
*SPIN-код: 3172-8780, AuthorID: 945387*  
**E-mail:** lifter\_23@mail.ru

**Ливцов Юрий Владимирович**, к-т тех.н., доцент, заведующий кафедрой железнодорожного транспорта Луганского государственного университета имени Владимира Даля.  
*SPIN-код: 3271-0817, AuthorID: 1078752*  
**E-mail:** liwtsoff@yandex.com

**Безкоровайный Владимир Сергеевич**, к-т тех.н., доцент, ведущий научный сотрудник Луганского государственного университета имени Владимира Даля.  
*SPIN-код: 8933-5114, AuthorID: 1220764*  
**E-mail:** bezkorvs@mail.ru

**Киреева Маргарита Анатольевна**, старший преподаватель кафедры железнодорожного транспорта Луганского государственного университета имени Владимира Даля.  
*SPIN-код: 5100-7910, AuthorID: 1101119*  
**E-mail:** kmagt@mail.ru

### Information about the authors

**Kireev Andrey Nikolaevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research and Innovation of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.  
*SPIN-код: 3172-8780, AuthorID: 945387*  
**E-mail:** lifter\_23@mail.ru

**Livtsov Yuri Vladimirovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Railway Transport of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.  
*SPIN-код: 3271-0817, AuthorID: 1078752*  
**E-mail:** liwtsoff@yandex.com

**Bezkorovainyi Vladimir Sergeevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.  
*SPIN-код: 8933-5114, AuthorID: 1220764*  
**E-mail:** bezkorvs@mail.ru

**Kireeva Margarita Anatolyevna**, Senior Lecturer at the Department of Railway Transport of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.  
*SPIN-код: 5100-7910, AuthorID: 1101119*  
**E-mail:** kmagt@mail.ru

---

**Для цитирования:**

Киреев А.Н., Ливцов Ю.В., Безкоровайный В.С., Киреева М.А. Влияние макроскопических дефектов металла на конструкционную прочность и эксплуатационную надежность деталей в машиностроении // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2026. – №1 (6). – С. 20-28.

**For citation:**

Kireev A.N., Livtsov Yu.V., Bezkorovainyi V.S., Kireeva M.A. The influence of macroscopic metal defects on the structural strength and operational reliability of parts in mechanical engineering // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering. – 2026. – №1 (6). – P. 20-28.

---

УДК 621.45.072.2:621.45.076

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСКЛЮЧЕНИЯ ИЗ КОНСТРУКЦИИ БЕЗВАЛЬНЫХ ТУРБОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ РЕАКТИВНЫХ СОПЕЛ

Любченко Д. И., Быкадоров В. В., Данилейченко А. А.

## INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF EXCLUDING JET NOZZLES FROM THE DESIGN OF SHAFT-LESS TURBOJET ENGINES

Lyubchenko D. I., Bykadorov V.V., Danileychenko A. A.

**Аннотация.** Современные турбореактивные двигатели оснащаются дополнительным конструктивным элементом – реактивными соплами, в общем виде соответствующими по форме соплу Лаваля. Выход из такого суженного отверстия сопла отработанных в турбине газов позволяет существенно увеличить тягу двигателей. В статье представлены результаты теоретических исследований возможности исключения реактивного сопла из конструкции турбореактивного двигателя при сохранении параметров тяги отработанных в турбине газов. Для этого за основу взяты запатентованные авторами статьи одноконтурный и двухконтурный турбореактивные двигатели с безвальными турбокомпрессорами, благодаря которым представляется возможным уменьшение осевой длины силовых установок для средних и тяжелых беспилотных летательных аппаратов.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, безвальный двигатель, сопло.

**Abstract.** Modern turbojet engines are equipped with an additional structural element – jet nozzles, which generally correspond in shape to the Laval nozzle. The exit of the exhaust gases in the turbine from such a narrowed nozzle opening makes it possible to significantly increase the thrust of the engines. The article presents the results of theoretical studies of the possibility of excluding a jet nozzle from the design of a turbojet engine while maintaining the thrust parameters of the gases spent in the turbine. For this purpose, single-circuit and dual-circuit turbojet engines with shaft-less turbo compressors, patented by the authors of the article, are used as a basis, thanks to which it is possible to reduce the axial length of power plants for medium and heavy unmanned aerial vehicles.

**Key words:** unmanned aerial vehicle, shaft-less engine, nozzle.

**Введение.** Современное развитие техники и технологий характеризуется научно-техническим скачком, которое можно оценить как переход количества в качество. Примерами такого скачка стало появление различных типов беспилотных технических систем, применительно к задачам Министерства Обороны РФ

которые выражены в создании в 2025 году Войск беспилотных систем [1]. Кроме того, беспилотные летательные аппараты в Воздушном Кодексе Российской Федерации выделены отдельно.

Беспилотные летательные аппараты (далее – БПЛА) оснащаются силовыми установками трех типов:

электродвигателями, поршневыми и реактивными двигателями. Широкое распространение для определенных целей и задач получили газотурбинные микро- и малоразмерные силовые установки, причем сфера применения таких БПЛА постоянно расширяется, что предоставляет возможность оснащения их различными новыми типами двигателей и проведения исследований по определению оптимальных конструктивных схем и технических характеристик таких силовых установок. Одним из подобных решений по подбору оптимальных конструктивных схем и технических параметров может считаться безвальный газотурбинный двигатель по [2], [3], [4], [5], причем для БПЛА безвальные турбореактивные двигатели по [2], [3] способны найти широкое применение, где используется энергия реактивной струи газов – тяга, необходимая для беспилотников самолетного типа.

В обычных турбореактивных двигателях для увеличения тяги зачастую применяется реактивное сопло с суживающимся проходным сечением, в котором эффект сопла Лаваля увеличивает реактивную скорость истекающих газов [6]. Однако реактивное сопло существенно увеличивает осевую длину двигателя, что может быть критично для БПЛА, особенно вертикального взлета и посадки, а также добавляет определенную массу самой силовой установке со снижением запасов топлива или величины полезной нагрузки.

**Задачей исследования является** определение возможности исключения классического реактивного сопла из комплектации турбореактивных двигателей безвальной конструкции по [2], [3], которые могут использоваться в качестве

силовых установок БПЛА самолетного типа и вертикального взлета-посадки.

**Ход исследования.** Принципиальная конструкция турбореактивного двигателя безвальной схемы представлена на рис. 1 и 2, где обозначены: 1 – воздухозаборник с входным направляющим аппаратом ВНА; 2 – наружный корпус; 3 – рабочие лопатки ротора компрессора; 4 – направляющие лопатки статоров ступеней компрессора; 5 – барабан ротора; 6 – спрямляющий аппарат; 7 – задний корпус (для рис. 2: дополнительно со сквозным осевым кольцевым каналом, образующим наружный контур I), и радиальными каналами; 8 – задние стойки с каналами подвода воздуха; 9 – обтекатель (стекатель – прим. авторов) реактивного сопла; 10 – рабочие лопатки второй ступени турбины; 11 – статорные сопловые лопатки второй ступени турбины; 12 – рабочие лопатки первой ступени турбины; 13 – вторая опора с подшипником качения барабана 5 ротора; 14 – статорные сопловые лопатки первой ступени турбины; 15 – кольцевая камера сгорания с жаровой трубой, форсунками, свечами зажигания, воспламенителями; 16 – проходные отверстия и каналы во внутреннем корпусе для сжатого воздуха; 17 – внутренний корпус; 18 – полость внутреннего корпуса; 19 – первая опора с подшипником качения барабана 5 ротора; 20 – зубчатый венец барабана 5 ротора для привода от стартера; 21 – передние стойки, на одной из которых закреплен стартер; 22 – кок; для рис. 2: I – наружный контур струи воздуха; II – внутренний контур струи газов.

Как видно, на обеих иллюстрациях, взятых из [2], [3], реактивные сопла в патентах не приведены, так как они не относятся к концептуальному устройству

таких двигателей с безвальным турбокомпрессором.

Для изготовления опытных образцов таких двигателей требуются полные расчеты и разработка конструкторской документации. В статье представлены предварительные математические выкладки и пояснения. Например, в связи с тем, что

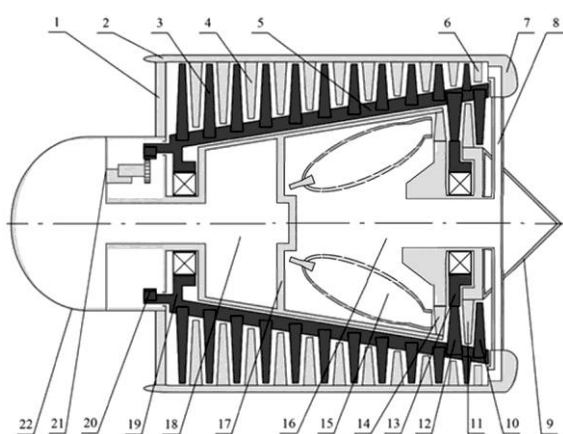


Рис. 1. Принципиальная схема одноконтурного турбореактивного двигателя с безвальным турбокомпрессором

Количество ступеней 3 и 4 осевого компрессора определяется по задаваемым требованиям к двигателю, подача топлива к форсункам осуществляется через полость внутреннего корпуса 18 и, как вариант, топлипроводы в коке 22 либо первую опору 19.

Как указано в [2], «реактивное сопло образовано коническим стекателем 9, который установлен на внутреннем корпусе 17 со стороны второй опоры вращения 13, и внутренней поверхностью заднего корпуса 7». В соответствии с, [3] – «реактивное сопло образовано сквозным осевым кольцевым каналом в заднем корпусе компрессора 7 и наружной поверхностью внутреннего корпуса 17 со стороны второй опоры вращения 13, на который установлен конический обтекатель 9 за турбиной 10».

Таким образом, реактивное сопло как элемент конструкции, из которого наружу

диаметр турбины меньше диаметра компрессора, а значит, крутящий момент турбины снижен, для приведения его в заданные параметры передачи мощности на ротор компрессора введены две ступени 12 и 10 турбины вместо одной для классической схемы вального турбокомпрессора.

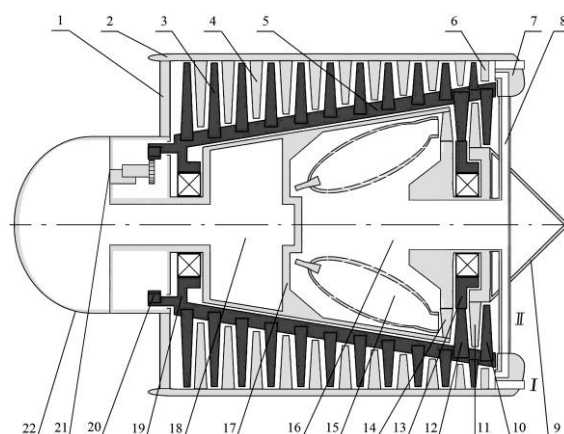


Рис. 2. Принципиальная схема двухконтурного турбореактивного двигателя с безвальным турбокомпрессором

вытекает реактивная струя отработанных в турбине газов, уже образовано конструктивными элементами самого двигателя. Поэтому представляется обоснованным проведение предварительного исследования по возможности замещения им стандартного классического реактивного сопла.

Конструкция обоих двигателей допускает монтаж к заднему корпусу 7 такого классического съемного реактивного сопла (рис. 3) с более меньшим в диаметре проходным сечением выходного канала, чем диаметр выходного канала двигателя за второй ступенью турбины. По наличию такого дополнительно установленного классического сопла далее представлены основные показатели концептуального расчета.

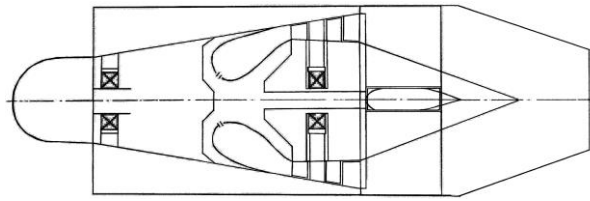


Рис. 3. Принципиальный вид безвального турбореактивного двигателя по рис. 1 и 2 с дополнительно установленным реактивным соплом

На рис. 1, 2 и 3 стекатель 9 имеет условные габариты по осевой длине, но удовлетворяет требованиям соответствия диаметру задней втулки ротора внутреннего корпуса 17 и осевой длине задних стоек 8 с каналами подвода воздуха от компрессора к камере сгорания 15.

Теоретический предварительный расчет газодинамических параметров газозавоздушного турбореактивного двигателя и реактивного сопла представлен во множестве работ, например в [7, с. 194 – 200], [8, с. 22 – 24], [9, с. 99 – 103], [10, с. 26, 27, 135 – 142] и др.

При газодинамических расчетах габаритных параметров двигателя безвальной конструкции условно выбран десяти ступенчатый осевой компрессор со степенью повышения давления в ступени 1,25, тягой 1 кН силы с суживающимся соплом (рис. 3) при старте с места на уровне земли.

В расчетах двигателя применяется формула определения наружного диаметра  $D_{BH}$  корпуса компрессора, то есть габаритный диаметр двигателя:

$$D_{BH} = \sqrt{\frac{4F_B}{\pi(1-d_B^2)}}, \quad (1)$$

где  $F_B$  – площадь проходного сечения воздухозаборника двигателя;

$d_B$  – относительный диаметр втулки по сечению воздухозаборника двигателя, принят стандартный параметр 0,45.

Однако по (1) частота вращения турбокомпрессора превышает 80 тысяч

об/мин, что затрудняет подбор подшипника качения во вторую опору 13 (рис. 1 и 2). Проблема решается с применением газодинамического подшипника, что положительно сказывается на себестоимости серийного или массового изготовления двигателя. Однако в расчетах условно принят стандартный подшипник качения, поэтому применена формула (2)

$$D_{BH} = \sqrt{\frac{4F_B}{\pi(1-d_B)}}, \quad (2)$$

которая приводит к некоторому увеличению габаритов двигателя, однако снижет частоту вращения турбокомпрессора до приемлемых 47 тысяч об/мин при окружной скорости до 290 м/с законцовок лопаток ротора компрессора, что ниже максимально допустимых 450 м/с.

Конструкция безвального двигателя подразумевает в предварительных газодинамических расчетах реактивного сопла соблюдение равенства наружного диаметра по законцовкам лопаток 10 второй ступени турбины  $D_{TH}$  и внутреннего диаметром барабана 5 (это внутренняя втулка на выходе из компрессора  $D_{X BH}$ ):

$$D_{X BH} = D_{TH},$$

или

$$\sqrt{D_{X BH}^2 - \frac{4F_K}{\pi}} = D_{Tc} + h_T,$$

где  $D_{\text{ХН}}$  – наружный диаметр на выходе из компрессора;

$F_{\text{К}}$  – площадь проходного сечения на выходе из компрессора, это зона заднего корпуса 7;

$D_{\text{Тс}}$  – средний диаметр на выходе из турбины;

$h_{\text{Т}}$  – высота лопатки на выходе из турбины, это рабочие лопатки 10 второй ступени турбины.

Расчет диаметра проходного сечения  $D_{\text{С}}$  на выходе из реактивного сопла производится по формуле

$$D_{\text{С}} = \sqrt{\frac{4F_{\text{С}}}{\pi}},$$

где  $F_{\text{С}}$  – площадь сечения установленного реактивного сопла.

Согласно расчету площадь его сечения составила  $F_{\text{С}} = 0,00515 \text{ м}^2$ , при этом рассчитанный с реактивным соплом расход воздуха через проточную часть двигателя  $G_{\text{В}} = 1,75 \text{ кг/с}$ .

В свою очередь, диаметр проходного сечения  $D_{\text{С}}$  на выходе из установленного реактивного сопла составил 0,081 м при наружном диаметре двигателя 0,155 м.

Таким образом, исключение из компоновки двигателя по рис. 3 условно рассчитанного. дополнительно установленного реактивного сопла и приведение двигателя в комплектацию по рис. 1 и 2 требует соблюдения площади проходного сечения на выходе непосредственно из двигателя  $F_{\text{С}} = 0,00515 \text{ м}^2$ .

Согласно особенностям конструкции двигателя такая проходная площадь должна быть ограничена суммой проходных сечений, образованных поверхностями задних стоек 8 с каналами подвода воздуха в камеру сгорания, максимальным

диаметром стекателя 9 (со стороны монтажа к задней части внутреннего корпуса 17) и внутренним диаметром заднего корпуса 7.

Данный принцип суммы проходных сечений с условно четырьмя стойками 8 (рис. 1 и 2) представлен на рис. 4. Как видно, проходное сечение на выходе из стоек 8 в зоне стекателя 9 имеет меньшую площадь по отношению к проходному сечению непосредственно на выходе из турбины 10.

Предварительные расчеты позволяют концептуально определить габаритные параметры и количество стоек 8 (правое изображение на рис. 4) для получения задаваемого проходного сечения  $F_{\text{С}} = 0,00515 \text{ м}^2$  и исключения из комплектации двигателя дополнительно монтируемого реактивного сопла.

Проведенные по [11, с. 130 – 140] минимально достаточные расчеты камеры сгорания позволили рассчитать параметры стоек 8 (рис. 4) подвода сжатого воздуха из компрессора в камеру сгорания.

Расчет проходного сечения  $F_{1.\text{ТР}}$  каждого воздуховода 8 определен по

$$F_{1.\text{ТР}} = F_{\text{К}} / Z_{\text{ТР}}, \quad (3)$$

где  $Z_{\text{ТР}}$  – выбираемое количество стоек-воздуховодов 8 (на правом изображении рис. 4 их условно четыре единицы).

Расчет предварительно произведен с перерасчетом по прямоугольному проходному сечению, максимально близко соответствующему требуемой обтекаемой каплевидной форме стоек 8 (рис. 3 и 4). При этом учитывалась толщина стенок воздуховодов в стойках 8, расчет которых дал 1,6 мм жаропрочного сплава.

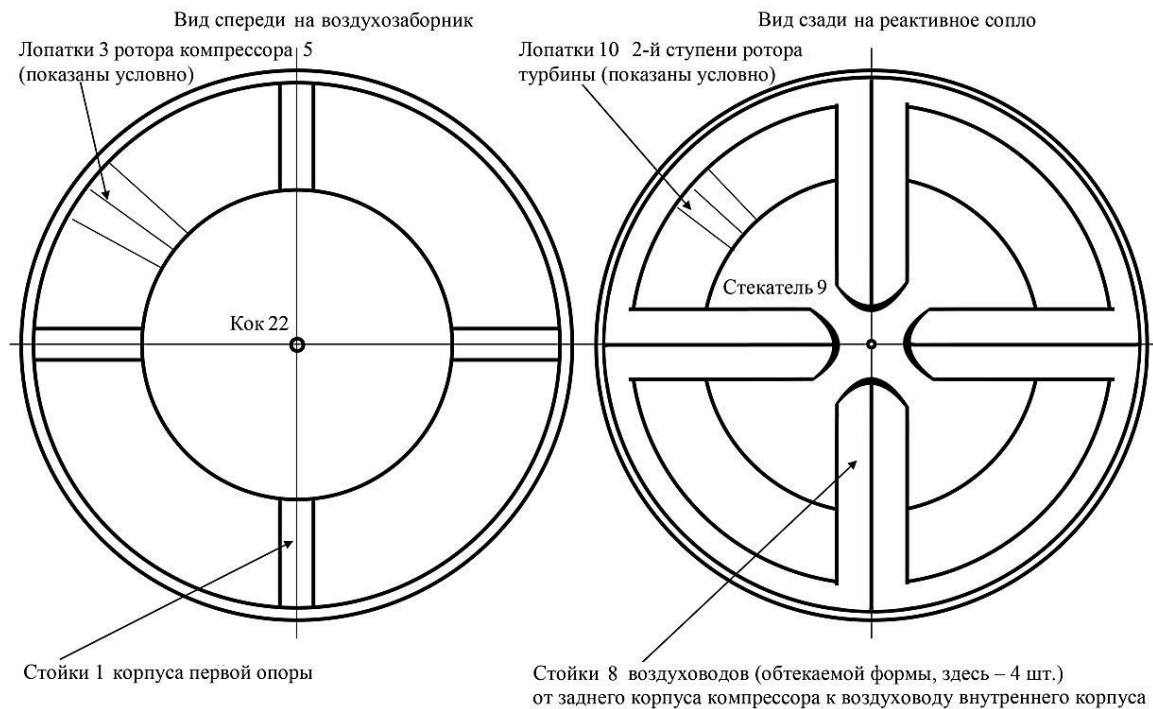


Рис. 4. Принципиальный вид стоек 1 ВНА и стоек 8 воздухопроводов

Расчет согласно (3) для 4 стоек (по рис. 4),  $Z_{\text{ТР}} = 4$  ед.:

$$F_{1,\text{ТР}} = 0,0007 \text{ м}^2 \text{ или } 740 \text{ мм}^2.$$

При этом дальнейшие расчеты с учетом лобовой площади двигателя, по расчетам равной  $F_{\text{ТРД}} = 0,01897 \text{ м}^2$ , и лобовой площади  $F_{4\text{ССТ.СОП}} = 0,0114 \text{ м}^2$  четырех стоек 8 в сопле двигателя показали существенный запас в проходном сечении  $F_{\text{СОПЛ}}$  сопла двигателя:

$$F_{\text{СОПЛ}} = F_{\text{ТРД}} - F_{4\text{ССТ.СОП}} \quad (4)$$

$F_{\text{СОПЛ}} = 0,0075 \text{ м}^2$ , превышающий контрольный показатель  $F_{\text{С}} = 0,00515 \text{ м}^2$  в 1,462 раза.

Перерасчет на пять стоек 8 воздухопроводов, основанный на (3) и (4), дает требуемый результат:

$$F_{\text{СОПЛ}} = 0,0051 \text{ м}^2 = F_{\text{С}} = 0,00515 \text{ м}^2$$

Развертка полученного результата концептуально представлена на рис. 5.

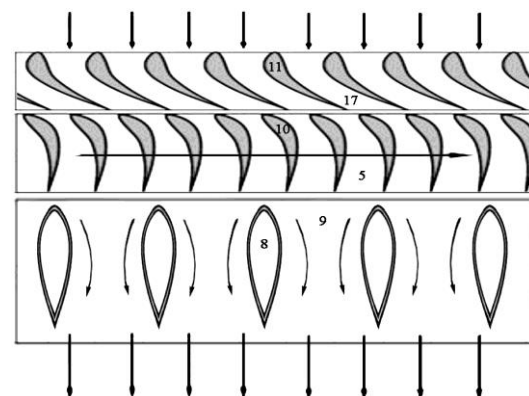


Рис. 5. Развертка проходного сечения сопла двигателя по стойкам 8 в зоне истечения из турбины отработанных газов

Обозначения на рис. 5 соответствуют обозначениям на рис. 1 и 2. Горизонтальной стрелкой обозначено направление вращения барабана ротора 5 с установленными на нем рабочими лопатками 10 второй ступени турбины. Вертикальные стрелки обозначают движение реактивной струи газов через вторую ступень турбины с последующим обтеканием задних стоек 8, создающих форму сопла Лавеля и, тем самым,

обеспечивающих принцип работы реактивного сопла.

**Выводы.** Исследование возможности исключения классического реактивного сопла из комплектации турбореактивных двигателей безвальной конструкции по [2], [3] подтвердило использования модуля сопла, включающего в себя задний корпус 7, задние стойки 8 с каналами подвода воздуха, стекатель 9, с различными геометрическими параметрами стоек 8 и стекателя 9 как собственного реактивного сопла, что позволяет рассматривать безвальные турбореактивные двигатели как перспективные силовые установки для БПЛА самолетного типа и летательных аппаратов вертикального взлета и посадки.

Установление необходимой тяги безвальных двигателей может производиться изменением поперечного сечения стоек 8 и их количеством.

Для определения наилучших характеристик безвальных двигателей требуются дальнейшие полные расчеты с изготовлением опытных образцов, проведение стендовых исследовательских испытаний с выбором оптимального модуля сопла по геометрическим параметрам.

#### Список источников

1. Федеральный закон Российской Федерации от 19.03.1997 г. № 60-ФЗ «Воздушный кодекс Российской Федерации». URL: <https://favt.gov.ru/public/materials/6/2/d/b/1/62db1c89d5987df3b086aa02970dc4db.pdf/> (дата обращения 01.04.2026 г.).
2. Патент на полезную модель № 237161 U1 Российская Федерация, МПК F02K 3/00, F01D 5/03. Турбореактивный двигатель : заявл. 06.06.2025 : опубл. 11.09.2025 / Д. И. Любченко, В. В. Быкадоров, А. А. Данилейченко [и др.]. – EDN DAULSD.
3. Патент на полезную модель № 241540 U1 Российская Федерация, МПК F02K 3/02, F01D 5/03. Турбореактивный двухконтурный двигатель: заявл. 31.10.2025 : опубл. 24.02.2026 / В. Д. Рябичев, В. В. Мирошников, Н. В. Клипаков, Д. И. Любченко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Луганский государственный университет имени Владимира Даля». – EDN HFLTYS.
4. Патент на полезную модель № 241538 U1 Российская Федерация, МПК F02C 3/10, F01D 5/03. Турбовальный двигатель со свободной турбиной: заявл. 12.11.2025 : опубл. 24.02.2026 / В. Д. Рябичев, В. В. Быкадоров, А. А. Данилейченко, Д. И. Любченко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Луганский государственный университет имени Владимира Даля». – EDN INLUIG.
5. Патент на полезную модель № 241537 U1 Российская Федерация, МПК F02C 6/08, F01D 5/03. Вспомогательный газотурбинный двигатель : заявл. 12.11.2025 : опубл. 24.02.2026 / В. Д. Рябичев, А. Н. Киреев, А. А. Стоянов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Луганский государственный университет имени Владимира Даля». – EDN KZVMDW.
6. Сопло Лавалея. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Сопло\\_Лавалея?ysclid=mnfvhy4ojo907061612/](https://ru.wikipedia.org/wiki/Сопло_Лавалея?ysclid=mnfvhy4ojo907061612/) (дата обращения 01.04.2026).
7. Михальцев В. Е. Теория и проектирование газовой турбины: учеб. пособие / В. Е. Михальцев, В. Д. Моляков; под ред. А. Ю. Вараксина. – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2020. – 230 с. – ISBN 978-5-7038-5164-7. – Текст: электронный. URL: <https://znanium.com/catalog/product/1972703> (дата обращения: 01.04.2026).
8. Шулекин В. Т. Теория авиационных двигателей: учеб. пособие / В. Т. Шулекин, В. В. Медведев; Федеральное агентство воздушного трансп., Федеральное гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «Московский гос. технический ун-т гражданской авиации», Каф. двигателей

летательных аппаратов. – М.: Московский гос. технический ун-т ГА, 2009. – 92 с. – ISBN 978-5-86311-692-1. – EDN QNVVMB.

9. Теория авиационных двигателей. URL: [https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1775050027&tld=ru&lang=ru&name=Teoriya\\_aviatsionnih\\_dvigateli\\_ch1.pdf&text/](https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1775050027&tld=ru&lang=ru&name=Teoriya_aviatsionnih_dvigateli_ch1.pdf&text/) (дата обращения 01.04.2026).

10. Кузнецов В. И. Рабочий процесс двухконтурных турбореактивных двигателей / В. И. Кузнецов, А. В. Кочегаров. – Омск: Омский государственный технический университет, 2014. – 212 с. – ISBN 978-5-8149-1703-4. – EDN RVCMWZ.

11. Расчет авиационных газотурбинных двигателей: учеб. пособие / Ю. В. Кожухов, А. М. Яблоков, И. С. Янин [и др.]. – СПб : Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2020. – 168 с. – ISBN 978-5-7422-7155-0. – EDN RDZPFE.

### References

1. Federal Law of the Russian Federation of March 19, 1997 No. 60-FZ "Air Code of the Russian Federation". Available: <https://favt.gov.ru/public/materials/6/2/d/b/1/62db1c89d5987df3b086aa02970dc4db.pdf/> (accessed 01.04.2026).

2. Patent for utility model No. 237161 U1 Russian Federation, IPC F02K 3/00, F01D 5/03. Turbojet engine : declared 06.06.2025 : published 11.09.2025 / D. I. Lyubchenko, V. V. Bykadorov, A. A. Danileychenko [et al.]. – EDN DAULSD.

3. Utility Model Patent No. 241540 U1 Russian Federation, IPC F02K 3/02, F01D 5/03. Turbofan engine : declared 31.10.2025 : published 24.02.2026 / V. D. Ryabichev, V. V. Miroshnikov, N. V. Klipakov, D. I. Lyubchenko; applicant Lugansk State University named after Vladimir Dahl. – EDN HFLTYS.

4. Utility Model Patent No. 241538 U1 Russian Federation, IPC F02C 3/10, F01D 5/03. Turboshift engine with a free turbine : declared 12.11.2025 : published 24.02.2026 / V. D. Ryabichev, V. V. Bykadorov, A. A. Danileychenko,

D. I. Lyubchenko; applicant Lugansk State University named after Vladimir Dahl. – EDN INLUIG.

5. Utility Model Patent No. 241537 U1 Russian Federation, IPC F02C 6/08, F01D 5/03. Auxiliary Gas Turbine Engine : declared 12.11.2025 : published 24.02.2026 / V. D. Ryabichev, A. N. Kireev, A. A. Stoyanov [et al.] ; applicant Lugansk State University named after Vladimir Dahl. – EDN KZVMDW.

6. Laval nozzle. Available: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Сопло\\_Лавал?ysclid=mnfvhy4ojo907061612/](https://ru.wikipedia.org/wiki/Сопло_Лавал?ysclid=mnfvhy4ojo907061612/) (accessed 01.04.2026).

7. Mikhaltsev V. E. Theory and design of a gas turbine: a tutorial / V. E. Mikhaltsev, V. D. Molyakov; edited by A. Yu. Varaksin. – Moscow: Publishing house of Bauman Moscow State Technical University, 2020. – 230 p. – ISBN 978-5-7038-5164-7. – Text: electronic. Available: <https://znanium.com/catalog/product/1972703/> (accessed 01.04.2026).

8. Shulekin V. T. Theory of aircraft engines: a tutorial / V. T. Shulekin, V. V. Medvedev; Federal Air Transport Agency, Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow State Technical University of Civil Aviation", Department of aircraft engines. – Moscow: Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2009. – 92 p. – ISBN 978-5-86311-692-1. – EDN QNVVMB.

9. Theory of aircraft engines. Available: [https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1775050027&tld=ru&lang=ru&name=Teoriya\\_aviatsionnih\\_dvigateli\\_ch1.pdf&text/](https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1775050027&tld=ru&lang=ru&name=Teoriya_aviatsionnih_dvigateli_ch1.pdf&text/) (accessed 01.04.2026).

10. Kuznetsov V. I. The working process of two-circuit turbojet engines / V. I. Kuznetsov, A. V. Kochegarov. – Омск: Омск State Technical University, 2014. – 212 p. – ISBN 978-5-8149-1703-4. – EDN RVCMWZ.

11. Calculation of aircraft gas turbine engines : a tutorial / Yu.V. Kozhukhov, A. M. Yablokov, I. S. Yanin [et al.]. – Saint Petersburg: Federal state autonomous educational institution of higher education "Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University", 2020. – 168 p.

*Статья поступила в редакцию 12.12.2025*

**Информация об авторах**

**Любченко Дмитрий Иванович**, к-т тех. н., доцент, доцент кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Луганского государственного университета имени Владимира Даля.  
*ORCID 0009-0009-1290-9186*  
*SPIN-код: 8741-6601, AuthorID: 1130478*  
**E-mail:** vottako@rambler.ru

**Данилейченко Александр Анатольевич**, к-т тех. н., доцент, заведующий кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания» Луганского государственного университета имени Владимира Даля.  
*ORCID 0009-0008-6248-748X*  
*SPIN-код: 6030-1239, AuthorID: 1185129*  
**E-mail:** 280376@rambler.ru.

**Быкадоров Вадим Викторович**, к-т тех.н., доцент, директор Института транспорта и логистики Луганского государственного университета имени Владимира Даля.  
**E-mail:** 311transport@gmail.com.

**Information about the authors**

**Lyubchenko Dmitry Ivanovich**, candidate of technical sciences, a dosent of the department «Internal combustion engines» of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.  
*ORCID 0009-0009-1290-9186*  
*SPIN-код: 8741-6601, AuthorID: 1130478*  
**E-mail:** vottako@rambler.ru.

**Danileychenko Alexander Anatolievich**, candidate of technical sciences, a dosent, a head of the of the department «Internal combustion engines» of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.  
*ORCID 0009-0008-6248-748X*  
*SPIN-код: 6030-1239, AuthorID: 1185129*  
**E-mail:** 280376@rambler.ru.

**Bykadorov Vadim Viktorovich**, candidate of technical sciences, a dosent, director of the Institute of transport and logistics of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.  
**E-mail:** 311transport@gmail.com

**Для цитирования:**

Любченко Д. И., Быкадоров В. В., Данилейченко А. А. Исследование возможности исключения из конструкции безвальных турбореактивных двигателей реактивных сопел / Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2026. – № 1(6). – С. 29-37.

**For citation:**

Lyubchenko D. I., Danileychenko A. A., Bykadorov V. V. Investigation of the possibility of excluding jet nozzles from the design of shaft-less turbojet engines / Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering. – 2026. – № 1(6). – P. 29-37.

УДК 629.4.027.4

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛАСТОМЕРА КАК КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Петров А. С., Коструб В. А., Мирошников А. А.

## MATHEMATICAL MODELING OF ELASTOMER AS A STRUCTURAL MATERIAL

Petrov A. S., Kostrub V. A., Miroshnikov A. A.

**Аннотация.** Предложен метод расчёта напряженно-деформированного состояния резинометаллических элементов, основой которого является системный учёт геометрических размеров, динамических параметров и свойств упруго-вязкого материала. Разработан и предложен обобщенный параметр, выраженный как отношение произведения вязкости материала и частоты вибрации к динамическому давлению, который использовался при решении задач многопараметрической оптимизации. Проведены натурные эксперименты и компьютерное моделирование. Получено хорошее соответствие результатов численных решений ходовым испытаниям.

**Ключевые слова:** математическая модель, эластомерный элемент, алгоритм, подрезиненное колесо, моделирование, напряженно-деформированное состояние.

**Abstract.** Disclosed is a method of calculating the stress-strain state of rubber-metal elements, the basis of which is a system accounting of geometric dimensions, dynamic parameters and properties of elastic-viscous material. A generalized parameter is developed and proposed, expressed as the ratio of the product of the viscosity of the material and the vibration frequency to the dynamic pressure, which was used to solve multivariable optimization problems. Field experiments and computer modeling were carried out. Good compliance of the results of numerical solutions with sea trials was obtained.

**Key words:** mathematical model, elastomer element, algorithm, rubber wheel, simulation, stress-strain state.

**Введение.** В работах научных коллективов ЦНИИ МПС, ВНИТИ, МИИТ, ЛИИЖТ под руководством А.И. Беляева, В.Н. Иванова, И.П. Исаева, А.А. Камаева, В.А. Камаева, Д.Е. Карминского, А.Я. Когана, М.Л. Коротенко, С.М. Куценко, В.А. Лазаряна, В.Б. Медея, Г.С. Михальченко, А.П. Павленко, М.П. Пахомова, Э.Д. Тартаковского, Т.А. Тибилова, И.И. Челнокова и др. теоретически доказано и экспериментально

подтверждено, что эффективным средством снижения динамического воздействия на рельсовый путь и улучшения условий работы деталей и узлов колесно-моторного блока железнодорожных экипажей и мостовых кранов является уменьшение необрессоренных масс экипажной части. Показано, что эффективным методом дальнейшего совершенствования эксплуатационных качеств подвижного состава является формирование силовых

связей ходовых частей на основе элементов с упруго-диссипативными свойствами, способствующих достижению заданных эксплуатационных характеристик.

Было установлено, что существуют резервы повышения эффективности силовых связей, в структуре которых содержатся элементы, имеющие упруго-диссипативные свойства. Однако использование этих резервов возможно при условии решения сопутствующих научно-практических проблем, связанных с исследованием процессов, протекающих в силовых связях рельсовых колесно-моторных блоков под влиянием внутренних и внешних силовых и тепловых воздействий в переходных и стационарных режимах работы, а также их математического описания, обеспечивающего практический и научный прогноз эксплуатационных качеств.

Из анализа литературных источников следует, что перспективным является исследование функциональной взаимосвязи между физико-механическими, тепло-физическими свойствами эластомеров, напряженно-деформированным состоянием материала, условиями динамического нагружения и рабочими параметрами силовых связей в рельсовых колесно-моторных блоках.

В этой связи является актуальным. проведение исследований по математическому моделированию процессов, протекающих в предварительно напряженном эластомерном элементе под влиянием внешних нагрузочно-силовых и тепловых факторов. Особенности влияния факторов соответствовали условиям, характерным для работы резинометаллических элементов силовых связей при высокоскоростном движении

железнодорожного подвижного состава и рельсового крана [1–6].

**Цель работы.** Разработка научных основ прогнозирования функциональных характеристик эластомерных силовых связей.

#### **Задачи работы:**

- исследование взаимосвязи между характеристиками полей напряжений, уровнем деформаций, переменными реологическими параметрами и отношением геометрических размеров к длине волны, а также зависимости интегральных показателей напряжений и деформаций от длины волны в условиях нагружения упругого материала;

- математическое описание динамического процесса распространения колебаний в объеме упругого материала с учётом влияния физико-механических свойств, температурных характеристик и вибропараметров системы.

#### **Содержание исследования.**

Рассмотрены методы, обеспечивающие при прочих равных условиях, снижение нагруженности ходовых частей, повышение устойчивости движения и плавности хода рельсовых экипажей, снижение шума, вибрации и интенсивности изнашивания рабочих поверхностей.

**Основная часть.** Эластомерный элемент представлен как сплошная среда в виде реологического тела Кельвина-Фойгта (неупругое сопротивление пропорционально скорости деформации) и описан системой дифференциальных уравнений в частных производных с определенными начальными и граничными условиями (доказательство устойчивости решения выполнено на основании цепей Маркова) [1].

Рассмотрено уравнение теплопроводности (параболического типа)

при явной и неявной схемах решения уравнения Фоккера-Планка, а также уравнения колебаний упруго-вязкой среды для одномерной, двухмерной и объемной задач при явной и неявной схемах решения (гиперболического типа).

Математическая модель распространения колебаний в упруго-вязкой сплошной несжимаемой среде при плоско-параллельном движении представлена в виде [7, 8]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nu \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + c^2 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

где  $u$  – деформация,  $c$  – скорость звука,  $\nu$  – вязкость,  $x, y$  – координаты,  $t$  – время.

Основываясь на теории цепей Маркова, согласно которой каждый из коэффициентов конечно-разностного аналога уравнения (1) не может превышать по модулю единицу, получим:  $2 + 4c_1 \leq 1 + 4c_1 + 4c_2$ .

Учитывая, что

$$c_1 = \frac{\nu \cdot \tau}{h^2} = \frac{\nu}{c^2 \cdot \tau} \cdot \frac{c^2 \cdot \tau^2}{h^2} = m \cdot c_2,$$

имеем

$$c_1 + c_2 = c_2 \cdot (1 + m),$$

где  $m > 0$ .  $m \approx 0,10$ .

Значение коэффициентов  $c_1$  и  $c_2$  является оценкой влияния на численное решение параметров упругости и вязкости материала.

Для уравнения гиперболического типа вида (модель Кельвина-Фойгта):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (2)$$

при граничных условиях

$$u(0, t) = -A \cos \omega t, \quad \frac{\partial u}{\partial x}(h, t) = 0, \quad t \in (0; \infty)$$

и начальных условиях

$$u(x, 0) = -A, \quad x \in [0; h], \quad \frac{\partial u(x, 0)}{\partial t} = 0,$$

где  $u(x, t)$  – перемещение элементарного объема сплошной среды;  $x$  – декартова координата;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;  $t$  – время;  $c$  – скорость звука в среде;  $A$  – амплитуда колебаний;  $\omega$  – угловая скорость.

Уравнение (2) описывает распространение колебаний в сплошной упруго-вязкой среде, моделируемой в виде одномерного стержня высотой  $h$ , к нижней границе которого приложено вибровоздействие, а верхний конец – свободная поверхность.

Для получения устойчивого алгоритма решения предложен вариант построения явной разностной схемы, основанный на аппроксимации частных производных в уравнении разложением в ряд Тейлора с более высоким порядком точности. Формула получена с использованием теории планирования экспериментов:

$$u_x = \frac{1}{6-D} \left( 6 \cdot (-u_0 + u_2 + u_8) + 2 \cdot (u_0 + u_5 - u_4 - u_6) + \right. \\ \left. + D \cdot (12u_0 - 15u_1 + 4 \cdot (u_2 + u_8 - u_4 - u_6) + 2u_5 + (u_1 - u_5/3)) \right),$$

где  $u_x$  соответствует  $u_{m+1,n}$  (рис. 1).

Разработанный алгоритм использован для исследования напряженно-

деформированного состояния резинометаллических амортизаторов,

применяемых в силовых связях колесно-моторного блока. Изучены вопросы поглощения энергии и затухания колебаний в упруго-диссипативных элементах амортизаторов.

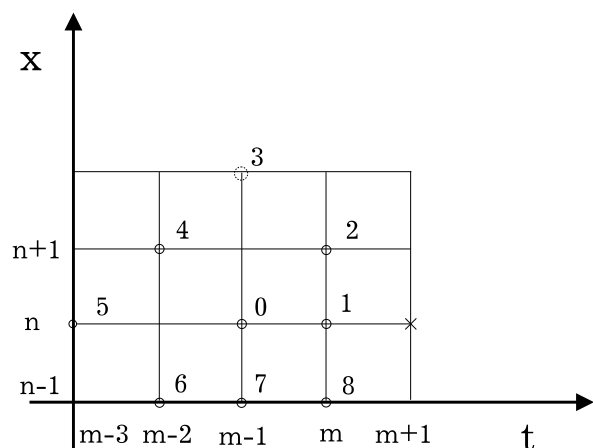


Рис. 1. Схема сетки и шаблона

При математическом моделировании упруго-диссипативных связей подрезиненных колесных пар приняты идеализация реальной механической системы (где параметры упругой  $C_u$  и неупругой  $C_t$  составляющих в общем случае могут быть переменными) и следующие допущения: массы абсолютно твердые, не имеющие геометрических отклонений; упругие и диссипативные характеристики амортизаторов линейны пренебрежимо мала (по сравнению с жесткостью рессорного подвешивания); инерционные и упругие характеристики пути учтены в виде постоянной приведенной массы.

Для исследования распространения возмущений во вращающемся резиновом кольце, моделируемом в виде упруго-вязкой сплошной несжимаемой среды (тело

Кельвина-Фойгта),

получена

математическая модель в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = C_x^2 \cdot \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} - v_x \cdot \frac{\partial u_x}{\partial t}, \\ \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = C_y^2 \cdot \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} - v_y \cdot \frac{\partial u_y}{\partial t} \end{cases}, \quad (3)$$

где  $u_x$ ,  $u_y$  — соответственно проекции перемещения элемента сплошной среды на оси  $X$  и  $Y$ ;  $C_x$ ,  $C_y$  — соответственно скорости звука в среде в направлении осей  $X$  и  $Y$ ;  $v_x$ ,  $v_y$  — коэффициенты потерь на неупругое сопротивление по осям  $X$ ,  $Y$ ;  $v_x = v_y = v$ ;  $t$  — время.

Для решения предложенной модели использован метод конечных разностей.

Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при статическом нагружении эластомерных элементов выполнено с допущением, что эластомер представлен в системы материальных точечных масс, соединенных между собой упругими связями.

При моделировании динамического напряженно-деформированного состояния эластомеров (с учетом закономерностей распространения колебаний) принимается допущение, что эластомер — это упруго-вязкая сплошная среда.

Среда моделируется в виде системы материальных точек, соединенных пружинами с демпфирующими вставками. Для такой взаимосвязанной системы материальных точек перемещение каждой элементарной материальной точки определяется перемещениями, скоростями и ускорениями соседних материальных точек (рис. 2.)

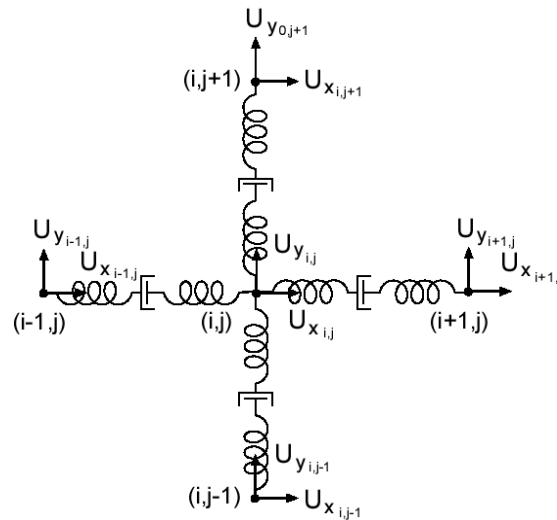


Рис. 2. Расчётная схема к определению связи между напряжениями и деформациями

Математическая модель напряженно-деформированного состояния резины для плоской задачи получена в виде [9]:

$$\frac{\partial^2 U_x}{\partial t^2} = c_x^2 \cdot \left( q_1 \cdot \frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + q_2 \cdot \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} + q_3 \cdot \frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + q_4 \cdot \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} \right) - \nu_x \cdot \frac{\partial U_x}{\partial t},$$

$$\frac{\partial^2 U_y}{\partial t^2} = c_y^2 \cdot \left( q_3 \cdot \frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + q_4 \cdot \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} + q_2 \cdot \frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + q_1 \cdot \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} \right) - \nu_y \cdot \frac{\partial U_y}{\partial t}.$$

В каждой точечной массе при вычислении вертикальной и горизонтальной проекций перемещений материальной точки определялись вторые производные на основе перемещений четырех соседних материальных точек. Производные учтены с разными коэффициентами, что позволило моделировать движение в анизотропной среде.

деформированного состояния эластомера предложено в случае объемной задачи учитывать сложную форму нагружения. При этом в каждой точечной массе при вычислении проекций перемещений материальной точки учитывались вторые производные на основе перемещений в шести соседних материальных точках. Эти производные также учтены с разными коэффициентами:

В отличие от известных подходов к моделированию напряженно-

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 U_x}{\partial t^2} = c^2 \left( q_1 \frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + q_2 \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} + q_3 \frac{\partial^2 U_x}{\partial z^2} + q_4 \frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + q_5 \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} + q_6 \frac{\partial^2 U_y}{\partial z^2} + q_7 \frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2} + q_8 \frac{\partial^2 U_z}{\partial y^2} + q_9 \frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} \right) + \nu \frac{\partial U_x}{\partial t}, \\ \frac{\partial^2 U_y}{\partial t^2} = c^2 \left( q_4 \frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + q_5 \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} + q_6 \frac{\partial^2 U_x}{\partial z^2} + q_1 \frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + q_2 \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} + q_3 \frac{\partial^2 U_y}{\partial z^2} + q_7 \frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2} + q_8 \frac{\partial^2 U_z}{\partial y^2} + q_9 \frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} \right) + \nu \frac{\partial U_y}{\partial t}, \\ \frac{\partial^2 U_z}{\partial t^2} = c^2 \left( q_8 \frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + q_9 \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} + q_6 \frac{\partial^2 U_x}{\partial z^2} + q_4 \frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + q_5 \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} + q_7 \frac{\partial^2 U_y}{\partial z^2} + q_2 \frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2} + q_3 \frac{\partial^2 U_z}{\partial y^2} + q_1 \frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} \right) + \nu \frac{\partial U_z}{\partial t}. \end{cases}$$

где  $u_x, u_y, u_z$  – соответственно проекции деформаций на оси  $x, y, z$ ,  $q_1, q_2, \dots, q_9$  – коэффициенты учёта влияния членов в уравнениях системы,  $C$  – скорость звука,  $\nu$  – вязкость,  $x, y$  – координат,  $t$  – время.

На основе математических моделей исследована и оценена вертикальная и горизонтальная динамика свободных и

вынужденных колебаний обрессоренных масс в центральной и буксовой ступенях рессорного подвешивания в зависимости от параметров резино-металлических амортизаторов (геометрических размеров, реологических характеристик резины и условий нагружения). Математическая модель колебаний имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u_{xk}}{\partial t^2} = c_{xk}^2 \cdot \frac{\partial^2 u_{xk}}{\partial x^2} - \nu_{xk} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial^2 u_{xk}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_{xk}}{\partial y^2} \right), \\ \frac{\partial^2 u_{yk}}{\partial t^2} = c_{yk}^2 \cdot \frac{\partial^2 u_{yk}}{\partial y^2} - \nu_{yk} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial^2 u_{xk}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_{xk}}{\partial y^2} \right), \\ \frac{\partial^2 u_{xm}}{\partial t^2} = c_{xm}^2 \cdot \frac{\partial^2 u_{xm}}{\partial x^2} - \nu_{xm} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial^2 u_{xm}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_{xm}}{\partial y^2} \right), \\ \frac{\partial^2 u_{ym}}{\partial t^2} = c_{ym}^2 \cdot \frac{\partial^2 u_{ym}}{\partial y^2} - \nu_{ym} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial^2 u_{xm}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_{xm}}{\partial y^2} \right), \end{cases} \quad (4)$$

где  $u$  – деформация,  $C$  – скорость звука в резиновом амортизаторе,  $\nu$  – его вязкость,  $xk, xm, yk, ym$  – индексы, обозначающие проекции соответствующих величин прогибов кузова или тележки

по осям  $X, Y$  [19].

Для решения математической модели (4) принят численный метод, где смещения, скорости и ускорения определялись по уравнениям (5) – (12)

а) в проекции на ось  $X$ :

$$a_x = -C_x \cdot \left( e_{hx} + \frac{\Delta e_x}{2} \right) - C_v \cdot V_{cp.x}, \quad (5)$$

$$V_{kx} = V_{hx} + a_x \cdot \Delta t; \quad (6)$$

$$V_{cp.x} = (V_{hx} + V_{kx})/2, \quad (7)$$

$$\Delta e_x = V_{cp.x} \cdot \Delta t; \quad e_{kx} = e_{hx} + \Delta e_x; \quad (8)$$

б) в проекции на ось  $Y$ :

$$a_y = -C_y \cdot \left( e_{hy} + \frac{\Delta e_y}{2} \right) - C_v \cdot V_{cp.y}, \quad (9)$$

$$V_{ky} = V_{hy} + a_y \cdot \Delta t; \quad (10)$$

$$V_{cp.y} = (V_{hy} + V_{ky})/2; \quad (11)$$

$$\Delta e_y = V_{cp.y} \cdot \Delta t; \quad e_{ky} = e_{hy} + \Delta e_y; \quad (12)$$

где  $e_{кх}$ ,  $e_{нх}$ ,  $e_{срх}$ ,  $e_{ку}$ ,  $e_{ну}$ ,  $e_{сру}$  – соответственно проекции деформации на оси  $x$ ,  $y$  и средней в начале и конце интервала по времени,  $V_{кх}$ ,  $V_{нх}$ ,  $V_{срх}$ ,  $V_{ку}$ ,  $V_{ну}$ ,  $V_{сру}$  – соответственно проекции скорости на оси  $x$ ,  $y$  и средней в начале и конце интервала по времени,  $a_x$ ,  $a_y$  – проекции ускорения,  $C_x, C_y$  – проекции скорости звука на оси,  $C_v$  – коэффициент вязкого сопротивления,  $\Delta t$  – приращение времени,

В качестве исследуемых факторов приняты следующие: ( $x_1$ , н/м<sup>2</sup>) модуль упругости по оси  $x$ ; ( $x_2$ , н/м<sup>2</sup>) модуль упругости по оси  $y$ ; ( $X_3$ ) коэффициент неупругого сопротивления; ( $x_4$ , м) начальное отклонение сосредоточенной массы от положения равновесия по оси  $x$ ; ( $X_5$ , м) начальное отклонение сосредоточенной массы от положения равновесия по оси  $y$ .

**Результаты исследований.** Зависимость времени переходного процесса от коэффициентов упругости  $Cu_x$ ,  $Cu_y$ , начальных смещений  $e_{нх}$ ,  $e_{ну}$  и коэффициента неупругого сопротивления  $C_t$  получена в виде:

$$T_{пер.} = 20,58 - 2,94x_3 + 0,55x_4 + 0,55x_5 + 0,52x_3^2 - 0,2x_4x_5 - 0,16x_1x_2 - 0,12x_2x_3 \quad (13)$$

Показано, что определяющими факторами являются коэффициент неупругого сопротивления, начальные смещения сосредоточенной массы по оси  $x$  и  $y$ , а также квадрат коэффициента неупругого сопротивления.

Для вынужденных колебаний, моделируемых системой уравнений (5) – (12) учтено гармоническое возмущение по закону:

$$A\omega^2 \sin \omega t.$$

При проведении и планировании экспериментов использованы планы, построенные на основе случайных чисел с применением стохастических методов. Разработаны методика построения таких планов и соответствующее программное обеспечение.

В эксперименте учтены следующие факторы:  $x_1$  – коэффициент неупругого сопротивления;  $x_2$ , н/м<sup>2</sup> – модуль упругости по оси  $x$ ;  $X_3$ , н/м<sup>2</sup> – модуль упругости по оси  $y$  (модуль сдвига);  $x_4$ , м – амплитуда;  $X_5$ , 1/с – угловая скорость.

В результате получена зависимость (для вынужденных колебаний) времени переходного процесса в виде:

$$T_{пер.} = 19,37 - 2,78x_1 + 0,40x_1^2 - 0,06x_4^2 - 0,04x_5^2 + 0,03x_4 + 0,03x_2 - 0,02x_1x_3. \quad (14)$$

Установлено, что определяющими факторами являются коэффициент неупругого сопротивления и квадрат коэффициента неупругого сопротивления, квадраты амплитуды и угловой скорости вынуждающего воздействия.

Получены зависимости максимального интегрального напряжения в слое при  $i = 0$  и времени переходного процесса от неупругой характеристики среды в виде:

$$\sum_{i=1, i=0}^n |\sigma_{0,j}| = 6,364 + \frac{0,241}{C_v},$$

$$l_t = e^{1,902 - 1,047 \cdot \ln C_v},$$

где коэффициент корреляции равен 0,998.

На рис. 3, а и рис. 3, б представлены кривые распределения интегрального значения напряжений в слое  $i=0$  по радиусу резинового кольца.

Анализ показал, что в средней части кольца, наиболее удаленной от границ, имеется зона наибольшего напряжения и диссипативного разогрева. Полученные результаты не противоречат экспериментальным результатам по

распределению температур в резиновых элементах при динамических нагрузках [10].

С помощью предложенного алгоритма исследован переходной процесс распространения возмущающего воздействия при наличии и отсутствии диссипативных потерь в подрезиненном элементе колесной пары, изучено воздействие напряженно-деформированного состояния резины на эксплуатационные характеристики.

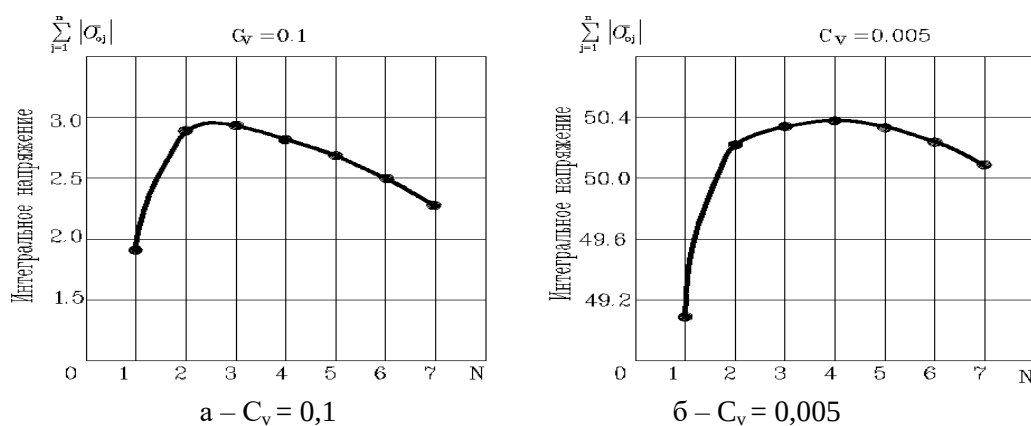


Рис. 3. Распределение интегрального напряжения в кольце по радиусу

Также получено распределение деформаций и напряжений при различных условиях статического нагружения,

различных формах границ контура интегрирования и различных свойствах резины (рис. 5).

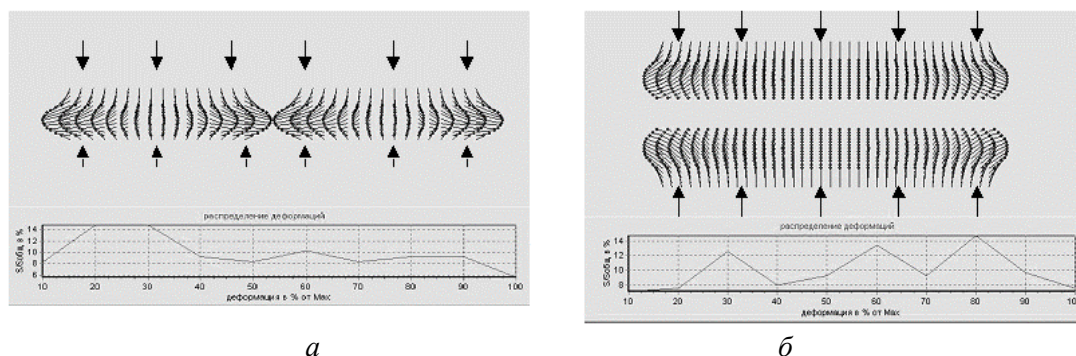


Рис. 4. Распределение деформаций в резиновом элементе для прямоугольного сечения с внутренним отверстием при сжатии а – опоры, б – втулки

Показано, что характер распределения деформаций и напряжений зависит от геометрии границ контура, свойств

материала и особенностей приложения нагрузки.

В результате экспериментальной проверки была найдена зависимость между

усреднённой деформацией и зависимыми факторами.

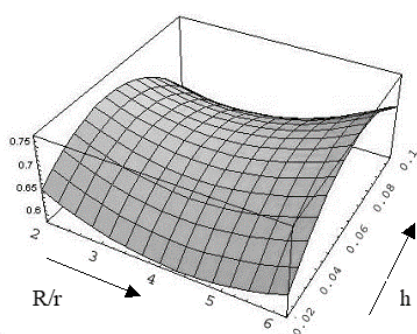
Для опоры:

$$Y = 2.0054 - 0.0298X_1 + 0.0689X_2 + 0.6377X_3 + 0.0077X_1X_2 - 0.0193X_1X_3 + 0.0334X_2X_3 + 0.0136X_1^2 - 0.0248X_2^2 - 0.009423X_3^2,$$

где вариация – 2 %, а корреляционное отношение – 0,999.

Для втулки:

$$Y = 0.709 + 0.016X_1 + 0.036X_2 + 0.226X_3 - 0.0085X_1X_2 + 0.016X_2X_3 - 0.011X_1^2,$$



где вариация – 4 %; корреляционное отношение – 0,995;

$X_1$  – отношение радиусов,  $X_2$  – толщина,  $X_3$  – деформация.

Эта зависимость была использована для построения поверхности с фиксированным третьим фактором. На рис. 5 показана зависимость деформаций от отношения радиусов и высоты при фиксированной скорости звука.

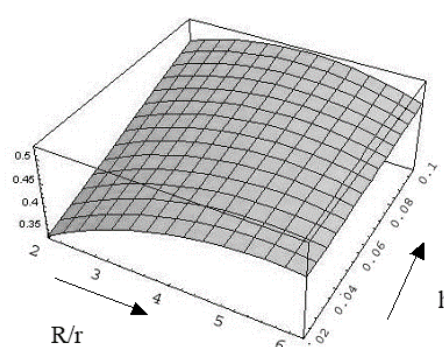


Рис. 5. Зависимость деформации в резинометаллическом элементе от отношения  $R/r$  и толщины  $h$  (а – опора, б – втулка)

В результате решения системы (4) определены собственные частоты колебаний тележки, критические скорости движения, амплитудно-частотные характеристики и демпфирующие свойства рессорного подвешивания [7 – 9].

Полученные результаты положены в основу разработанных рекомендаций по определению рациональных параметров и совершенствованию конструкций резинометаллических элементов в силовых связях колесных рельсовых пар.

#### Выводы:

1. Предложен метод расчёта напряженно-деформированного состояния резинометаллических элементов, основой которого является системный учёт геометрических размеров, динамических параметров и свойств упруго-вязкого материала.

2. Разработан и предложен обобщенный параметр, выраженный как

отношение произведения вязкости материала и частоты вибрации к динамическому давлению, который использовался при решении задач многопараметрической оптимизации.

#### Список источников

1. Петров А.С. Численные методы решения задач динамики подвижного состава рельсовых транспортных средств. – Луганск: Изд-во ВУГУ, 1998. – 364с.
2. Беляков Н.А., Карасев М.А., Трушко В.Л. Механика сплошной среды. – Санкт-Петербургский горный университет, СПб, 2019. – 114 с.
3. Добросердова А.Б., Смагин Д.А., Шапочкин В.Э., Санчез Ромеро П. А., Канторович С. С. Компьютерное моделирование магнитоактивных эластомеров методом молекулярной динамики. – Электронный научный архив УрФу. – 2020.
4. Седов Л.И. Механика сплошной среды. – Том 1. – М.: Наука, 1970. – 492 с.
5. Люсова Л.Р., Буканов А.М., Кузин В.С.,

Овсянников Н.Я., Наумова Ю.А. Основы технологии переработки эластомеров. – М.: 2011.

6. Корнев А.Е., Буканов А.М., Шевердяев О.Н. «Технология эластомерных материалов». – М. – 2000.

7. Соколов А.К., Гаришин О.К., Свистков А.Л. Моделирование процесса возникновения тяжелей в эластомерных композитах. – Журнал: Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2019. № 2

8. Петров А.С., Кашлюк С.В. Разработка программного комплекса для обработки результатов экспериментальных исследований //: Сб. трудов 6-й Междунар. науч.-техн. конф. «Машиностроение и техносфера на рубеже 21-го века». – Т. 2, Донецк, 1999. – С. 257-259.

9. Петров А.С. Математическое моделирование статического напряженно-деформированного состояния резиновых упругих элементов в экипажной части локомотива // Науч.-техн. журн. «Вісник СУДУ», 1997. – №2(6), С. 207-216.

10. Петров А.С. Использование резины для рессорного подвешивания // Вісник СУДУ, 1998, №5 (15). – С. 164 – 168.

### References

1. Petrov A.S. Numerical Methods for Solving Rolling Stock Dynamics Problems of Rail Vehicles. Lugansk: VUGU Publishing House, 1998. – 364 p.

2. Belyakov N.A., Karasev M.A., Trushko V.L. Continuum Mechanics. Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, 2019. 114 p.

3. Dobroserdova A.B., Smagin D.A., Shapochkin V.E., Sanchez Romero P.A., Kantorovich S.S. Computer Simulation of Magnetoactive Elastomers Using Molecular Dynamics. UrFU Electronic Scientific Archive. 2020.

4. Sedov L.I. Continuum Mechanics. Vol. 1. Moscow: Naukaa, 1970. 492 p.

5. Lyusova L.R., Bukanov A.M., Kuzin V.S., Ovsyannikov N.Ya., Naumova Yu.A. Fundamentals of Elastomer Processing Technology. Moscow: 2011.

6. Kornev A.E., Bukanov A.M., Sheverdyayev O.N. "Technology of Elastomeric Materials". Moscow: 2000.

7. Sokolov A.K., Garishin O.K., Svistkov A.L. Modeling the Process of Strand Formation in Elastomeric Composites. Journal: Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Article in issue: 2, 2019.

8. Petrov A.S., Kashlyuk S.V. Development of a Software Package for Processing the Results of Experimental Studies// Proc. of the 6th Int. Sci. – Tech. Conf. "Mechanical Engineering and the Technosphere at the Turn of the 21st Century." – Vol. 2, Donetsk, 1999. – pp. 257-259.

9. Petrov A.S. Mathematical Modeling of the Static Stress-Strain State of Rubber Elastic Elements in the Locomotive Crew Section // Scientific and Technical Journal "Bulletin of the Court of Justice", No. 2 (6), 1997. – pp. 207-216.

10. Petrov A.S. Use of Rubber for Spring Suspension // Bulletin of the Court of Justice, 1998, No. 5 (15). – pp. 164-168.

*Статья поступила в редакцию 12.01.2026*

### Информация об авторах

**Петров Александр Степанович**, д-р тех. н., профессор кафедры подъемно-транспортной техники Луганского государственного университета имени Владимира Даля.

SPIN-код: 7528-0306, AuthorID: 1262737

E-mail: lugu\_ptt@mail.ru.

### Information about the authors

**Petrov Alexander Stepanovich**, doctor of technical sciences, Professor of the department «Handling equipment» of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

SPIN-код: 7528-0306, AuthorID: 1262737

E-mail: lugu\_ptt@mail.ru.

**Коструб Владимир Алексеевич**, к-т тех.н.,  
доцент кафедры подъемно-транспортной  
техники Луганского государственного  
университета имени Владимира Даля.  
**E-mail:** lugu\_ptt@mail.ru.

**Мирошников Алексей Александрович**,  
старший преподаватель кафедры подъемно-  
транспортной техники Луганского  
государственного университета имени Владимира  
Даля.  
*SPIN-код:* 9902-6208, *AuthorID:* 1343422  
**E-mail:** mirr\_001@mail.ru.

**Kostrub Vladimir Alekseevich**, Candidate of  
Technical Sciences, Associate Professor of the  
department « Handling equipment» of the Lugansk  
State University named after Vladimir Dahl.  
**E-mail:** lugu\_ptt@mail.ru.

**Miroshnikov Alexey Aleksandrovich**, senior  
lecturer of the department « Handling equipment»  
of the Lugansk State University named after Vladimir  
Dahl.  
*SPIN-код:* 9902-6208, *AuthorID:* 1343422  
**E-mail:** mirr\_001@mail.ru.

---

**Для цитирования:**

Петров А. С., Коструб В. А., Мирошников А. А. Математическое моделирование эластомера как конструкционного материала // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2026 – № 1(6). – С. 38-48.

**For citation:**

Petrov A. S., Kostrub V. A., Miroshnikov A. A. Mathematical modeling of elastomer as a structural material // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering. – 2026 – № 1(6). – P. 38-48.

---

**ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ  
И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ****TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR MECHANICAL  
AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING**

УДК 681.7.054.43; 621.671

**РАЗРАБОТКА ДИНАМОМЕТРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СИЛ И  
МОМЕНТОВ НА ВРАЩАЮЩЕМСЯ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ  
КОЛЬЦЕВОМ РОТОРЕ СТАНКА РЕЗКИ****Брешев В. Е., Рябичев В. Д., Брюховецкий А. Н., Корсунов К. А.****DEVELOPMENT OF A DYNAMOMETER FOR RESEARCH OF FORCES  
AND TORS ON A ROTATING RING ROTOR OF A CUTTING MACHINE  
IN AN ELECTROMAGNETIC FIELD****Breshev V. E., Ryabichev V. D., Brjuhoveckij A. N., Korsunov K. A.**

**Аннотация.** Представлена разработка двухкомпонентного динамометра с измерительным комплексом для исследования сил и моментов на кольцевом роторе, который без механических опор вращается под действием электромагнитного поля и выполняет резку монокристаллов своей внутренней алмазной кромкой. Устойчивость вращения кольцевого ротора без механического закрепления и выполнение им полезной работы обеспечивается особым образом распределёнными движущими силами электромагнитной природы. При нахождении кольцевого ротора в центральном положении они приводят только к вращающему моменту, а при смещении – к вращающему моменту и радиальной равнодействующей движущих сил, которая направлена против смещения и обеспечивает устойчивость движения ротора. Разрабатываемый динамометр предназначен для их измерения на всех режимах функционирования. Актуальность работы заключается в том, что бесшпиндельный станок резки монокристаллов с ротором-инструментом без механических опор позволяет снять ограничения на размеры обрабатываемой заготовки, снизить энергопотребления в 2,5...3 раза, уменьшить массу и габариты станка резки в 5 раз и более. Разработана конструкция и изготовлен двухкомпонентный динамометр, который устанавливается вместо механизма подачи в экспериментальную установку станка резки. Он позволяет имитировать технологический процесс резки, измерять радиальную силу и вращающий момент как в центральном положении равновесия кольцевого ротора, так и при его радиальном смещении до 30 мм. Одна пара пластин с датчиками предназначена для измерения тангенциальных сил и вращающего момента, а вторая, перпендикулярно расположенная, для измерения равнодействующей радиальных движущих сил. Созданы измерительная аппаратура, ПО и интерфейс для управления процессом динамометрических измерений с фиксацией и обработкой измерительной информации в цифровом виде, включая синхронное измерение частоты вращения кольцевого ротора.

**Ключевые слова:** экспериментальные исследования, динамометр, кольцевой ротор, бесшпиндельный станок резки.

**Abstract.** The development of a two-component dynamometer with a measuring complex for the study of forces and moments on the ring rotor, which rotates under the influence of an electromagnetic field without mechanical supports and performs cutting of single crystals with its internal diamond edge, is presented. The stability of the ring rotor's rotation without mechanical fixation and its ability to perform useful work are ensured by the specially distributed driving forces of an electromagnetic nature. When the ring rotor is in the central position, they are only subjected to torque, but when it is displaced, they are subjected to torque and a radial resultant of the driving forces, which is directed against the displacement and ensures the stability of the rotor's motion. The developed dynamometer is designed to measure these forces in all operating modes. The relevance of the work is that a spindleless single crystal cutting machine with a rotor-tool without mechanical supports allows you to remove restrictions on the size of the workpiece being processed, reduce energy consumption by 2.5...3 times, and reduce the mass and dimensions of the cutting machine by 5 times or more. A two-component dynamometer has been designed and manufactured, which is installed instead of the feed mechanism in the experimental cutting machine. It allows you to simulate the cutting process, measure the radial force and torque both in the central equilibrium position of the ring rotor and with its radial displacement up to 30 mm. One pair of plates with sensors is designed to change the tangential forces and torque, while the second pair, located perpendicularly, is used to measure the resultant of the radial driving forces. The measuring equipment, software, and interface have been developed to control the dynamometric measurement process and record and process the measurement information.

**Keywords:** experimental research, dynamometer, ring rotor, spindleless cutting machine.

**Введение.** Натурные измерительные эксперименты как метод познания, при помощи которого в контролируемых и управляемых условиях исследуются новые технические объекты, такие как бесшпиндельный станок резки с ротором-инструментом без механических опор, остаются важной частью исследований при разработке нового оборудования [1-2]. Идея разработки бесконтактных приводов вращения, в которых кольцевой ротор вращается под действием электромагнитного поля и при этом не имеет механических опор, какого-либо механического закрепления, имеет перспективу применения в различных машинах – компрессорах, насосах, сатураторах, бесшпиндельных станках резки монокристаллов [3, 4, 5].

Кольцевой ротор, который одновременно является рабочим органом рабочей машины и вторичным элементом асинхронной электрической машины, может выполнять полезную работу. Под действием электромагнитного поля на кольцевой ротор из парамагнитного

материала действуют движущие электромагнитные силы, формирующие вращающий момент [6, 7]. При отсутствии механических опор и какого-либо механического закрепления эти же движущие силы должны обеспечивать устойчивость движения и положения кольцевого ротора при функционировании машины [8, 9]. В этом случае привод машины становится бесконтактным – в нём исключается твердотельный механический контакт между движущимися и неподвижными деталями аналогично приводам на газостатических или гидростатических подшипниках [3, 10, 11].

В ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля» разработана конструкция бесшпиндельного станка резки монокристаллов с кольцевым ротором-инструментом, который внутренней алмазной режущей кромкой разрезает монокристаллы на тонкие пластины, используемые затем для изготовления микросхем [3, 4, 12]. При этом задача устойчивости кольцевого ротора без механических опор решена за счёт особого пространственного

распределения элементарных движущих сил электромагнитной природы. В центральном положении кольцевого ротора они приводятся только к вращающему моменту, а при смещении – вращающему моменту и радиальной силе, действующей против смещения. Именно для измерения вращающего момента и радиальной равнодействующей движущих сил на «свободном» роторе разрабатывается динамометр.

**Постановка задачи.** Выполнение натурных экспериментальных исследований при разработке бесшпиндельного станка резки с кольцевым ротором-инструментом, который вращается под действием электромагнитного поля и не имеет механических опор, электрических контактов и какого-либо механического закрепления требует решения следующих научно-технических задач:

- Бесконтактного измерения частоты вращения, чтобы не нарушать устойчивости движения и положения вращающегося ротора-режущего инструмента в магнитном поле при отсутствии механического закрепления. Для измерения частоты вращения рабочего органа нами разработан и изготовлен оптический измеритель частоты. Преимущество применения данного измерителя заключается, во-первых, в отсутствии механического воздействия на кольцевую пластину, во-вторых, он устойчив к воздействию переменного магнитного поля и, в-третьих, измерительный сигнал после преобразования выводится на монитор.

- Плавного и точного регулирования частоты вращения электромагнитного поля, которое приводит к такому же плавному и точному регулированию частоты вращения кольцевого ротора с учётом характерного для асинхронных электрических машин скольжения. В экспериментальной установке

для регулирования частоты вращения электромагнитного поля используется преобразователь частоты *MITSUBISHI transistorized inverter fr-E540-3,7k-ec*, имеющий номинальную мощность 3,7 кВт и позволяющий регулировать частоту выходного напряжения от 0,5 до 400 Гц. Благодаря тому, что индуктор (статор) имеет две пары полюсов, частота вращения магнитного поля может регулироваться от 15 до 12000 об/мин. Кроме того, преобразователь *fr-E540-3,7k-ec* позволяет программно устанавливать различные скоростные режимы вращения [4].

- Измерение радиальной равнодействующей движущих сил, возникающих под действием электромагнитного поля при смещении кольцевого ротора от центрального положения равновесия, когда центры вращения электромагнитного поля кольцевого ротора совпадают. Радиальная равнодействующая всегда направлена против возникшего смещения ротора от центрального положения и стремится его вернуть в центральное положение равновесия, а потому обеспечивает требуемую устойчивость движения кольцевого ротора – режущего инструмента.

- Измерение вращающего (крутящего) момента от движущих сил в центральном положении равновесия кольцевого ротора инструмента, а также при его смещении в радиальном направлении.

Решение перечисленных выше задач позволяет исследовать основные характеристики привода – зависимость частоты вращения ротора от частоты вращения электромагнитного поля, материала и геометрических размеров кольцевого ротора, механическую характеристику (зависимость частоты

вращения ротора от приложенного момента сопротивления), а также зависимость радиальной равнодействующей движущих сил при возникновении смещения ротора от центрального положения равновесия. Вращающий момент, при условии сохранения устойчивости движения, позволяет кольцевому ротору с внутренней режущей кромкой выполнять резку заготовок новым способом – напроход, полностью проходя через образуемую прорезь, как это показано на рис. 1 [3].

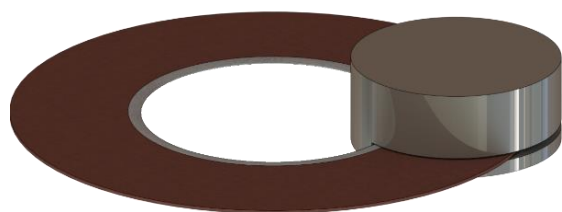


Рис. 1. Резка заготовки напроход кольцевым ротором-инструментом, вращающимся под действием электромагнитного поля

Из рассмотренных выше научно-технических задач наиболее сложными являются две последние – измерение радиальной равнодействующей движущих сил и измерение вращающего момента на кольцевом роторе, который приводит его во вращение и обеспечивает выполнение полезной работы. Для измерения сил и моментов на роторе, вращающемся без механического закрепления, необходимо разработать динамометр особой конструкции, устанавливаемый в экспериментальную установку и обеспечивающий тарированный контакт со «свободным» кольцевым ротором.

**Целью работы** является разработка принципа действия, конструкции и аппаратного обеспечения динамометра для

исследования сил и моментов на вращающемся в электромагнитном поле кольцевом роторе станка резки.

**Методика исследований.** Разработка динамометра состоит в последовательной реализации следующих этапов:

1. Априорный анализ видов контактного взаимодействия динамометра и кольцевого ротора, которые бы позволили измерить крутящий момент и радиальную равнодействующую движущих сил при условии сохранения устойчивости вращения кольцевого ротора. На их основе может быть сформулирован принцип действия динамометра в части регулируемого контактного взаимодействия, способа измерения сил контактного взаимодействия динамометра и кольцевого ротора, метода обработки, вывода на монитор и записи измерительной информации.

2. Разработки конструкции динамометра в соответствии с сформулированным принципом действия и при условии его монтажа в экспериментальный макет станка. Замена механизма подачи заготовки динамометром позволит имитировать работу привода и производит измерения на различных режимах функционирования – в центральном положении равновесия кольцевого ротора и при его смещении, а также на различных скоростных режимах.

3. Разработка и изготовление аппаратного обеспечения для динамометра, которое включает разработку программного интерфейса измерений, а также программного обеспечения для записи и статистической обработки измерительной информации.

4. Статические и динамические испытания динамометра, его тарировка для обеспечения заданной точности измерений

радиальной силы и вращающего момента на кольцевом роторе, вращающемся без механического закрепления.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Разрабатываемый динамометр является составной частью экспериментальной установки (макета) бесшпиндельного станка резки монокристаллов. В нём режущим инструментом является медный кольцевой ротор с внутренней режущей кромкой, который не имеет механических опор и механического закрепления, устойчиво вращается под действием электромагнитного поля и разрезает подаваемый на него монокристалл на тонкие пластины (рис. 2).

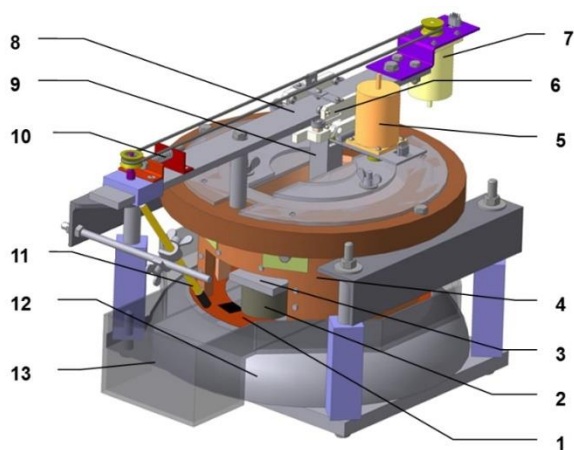


Рис. 2. 3D-модель экспериментальной установки станка резки монокристаллов с кольцевым ротором-инструментом без механических опор

На рис. 2 указаны следующие позиции:

- 1 – ротор без механических опор с внутренней режущей кромкой;
- 2 – разрезаемый на пластины монокристалл кремния;
- 3 – кронштейн механизма подачи монокристалла;
- 4 – верхний неактивный магнитопровод с вырезом;

- 5 – шаговый двигатель механизма продольной подачи (на толщину);
- 6 – каретка поперечной подачи;
- 7 – шаговый двигатель механизма поперечной подачи на резание;
- 8 – направляющая механизма поперечной подачи;
- 9 – кронштейн с механизмом подачи на толщину отрезаемой пластины;
- 10 – устройство для натяжения круглоремненной передачи;
- 11 – оптический датчик измерения частоты вращения кольцевого ротора;
- 12 – защитный кожух индуктора;
- 13 – поддон.

Динамометр имеет уникальную конструкцию, так как для проведения измерений предполагается его монтаж в данную экспериментальную установку вместо механизма поперечной подачи (поз. 3, 6, 7, 8 на рис. 2). Он должен имитировать взаимодействие с заготовкой в процессе резки монокристалла (2), а также создавать тарированные внешние силы и внешний момент сопротивления на кольцевом роторе-инструменте (1) с внутренней режущей кромкой. При этом силовое воздействие на кольцевой ротор должно осуществляться за счёт локального механического контакта по внутренней кромке кольцевого ротора (1), что позволяет вращающемуся ротору сохранять устойчивость своего положения. В работе [3] было показано, что приложение сосредоточенной нагрузки по внешнему контуру кольцевого ротора приведёт к возникновению возмущающего момента, к потере устойчивости вращения и уходу от заданного положения.

Приложение внешних сил к внутренней кромке имеет локальный характер, реализуется через «контактные

наконечники» динамометра, что позволяет считать внешние силы сосредоточенными и прикладываемыми по центру пятна контакта кромки ротора и наконечников динамометра.

Для осуществления технологического процесса резки необходимо, чтобы ротору сообщался достаточный по величине вращающий (крутящий) момент. На установившемся режиме он равен моменту сопротивления внешних сил, который и создаёт динамометр двумя разводимыми наконечниками, расположенными диаметрально. Их силы трения о кромку ротора имеют тангенциальное (касательное) направление и образуют пару сил, которые измеряются динамометром. Момент сопротивления равен произведению тангенциальной силы на диаметр внутренней кромки кольцевого ротора, вычисляется аппаратными средствами и выводится на монитор.

Устойчивость движения кольцевого ротора обеспечивается равнодействующей радиальных движущих сил, которая возникает при смещении ротора от положения равновесия. Для измерения радиальной силы динамометр своими наконечниками создаёт радиальные внешние силы на внутренней кромке ротора. Силы радиального давления наконечников динамометра и радиальная равнодействующая движущих сил уравновешиваются, что позволяет определить величину последней. При этом на кольцевой ротор может действовать как один наконечник (только в смещённом положении ротора), так и два наконечника одновременно (в центральном или смещённом положении ротора). Радиальная

равнодействующая движущих вычисляется аппаратными средствами и выводится на монитор.

В соответствии с перечисленными особенностями функционирования привода с ротором без механического закрепления, а также способами измерения сил и вращающего момента на нём, разработана конструкция двухкомпонентного динамометра, показанная на рис. 3.

Корпус 1 динамометра крепится к плите верхнего магнитопровода, на нём смонтированы все составные части измерительного устройства. Динамометр имеет два чувствительных элемента 2 и 3, каждый из которых представляет собой независимый двухкомпонентный динамометр. Чувствительные элементы с помощью кареток 4 и 5 соединены с корпусом 1 и могут перемещаться по направляющим в радиальном направлении с минимальным люфтом.

С помощью винтовых пар (левой 6 и правой 7) каретки могут совершать синхронное относительное перемещение в противоположные стороны, т.е. расходиться или сходиться, а с помощью винтового штока 8 – двигаться в радиальном направлении без относительного смещения. Конструкция динамометра позволяет смещать кольцевой ротор под нагрузкой на расстояние до 30 мм от центрального положения и измерять значение сил и вращающего момента на кольцевом роторе в каждом положении, что принципиально важно для исследования привода с кольцевым ротором без механических опор и механического закрепления.

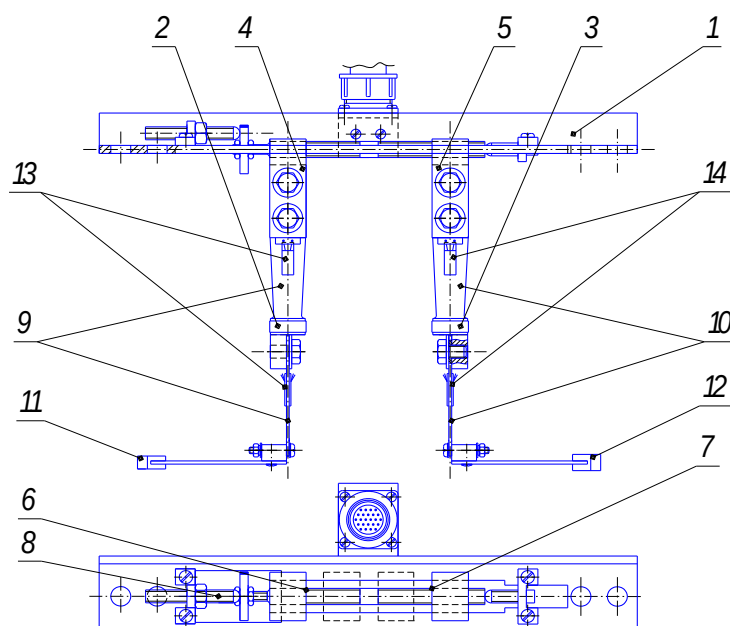


Рис. 3. Конструкция двухкомпонентного динамометра для измерения сил и вращающего момента на кольцевом роторе без механического закрепления:

1 – корпус; 2 и 3 – чувствительные элементы с тензодатчиками; 4 и 5 – каретки; 6 и 7 – винтовые пары для перемещения чувствительных элементов; 8 – шток; 9 и 10 – упругие пластины; 11 и 12 – наконечники; 13 и 14 – тензометры ПКБ-5-100-III-ТУ-01-17-66

Чувствительные элементы динамометра имеют пары упругих пластин 9 и 10, развёрнутые друг относительно друга на  $90^\circ$ . Это даёт возможность проводить отдельно измерения тангенциальных и радиальных сил. Чувствительные элементы динамометра воздействуют на рабочий орган с помощью наконечников 11 и 12. Взаимодействие может происходить в двух диаметрально противоположных точках по внутреннему контуру (симметричное нагружение) или в одной точке внутреннего контура (несимметричное нагружение).

Положение кольцевого ротора и величина нагрузки определяются расположением чувствительных элементов 2 и 3 относительно друг друга, а также относительно оси экспериментальной установки, что устанавливается регулировочными винтами 6, 7 и 8. При разведении чувствительных элементов 2 и

3, их давление на внутреннюю кромку возрастает и наоборот. При смещении от центрального положения возникает радиальная возвращающая сила, которая увеличивает давление на наконечник 11 или 12, который «уводит» кольцевой ротор от исходного центрального положения относительно индуктора.

На пластины 9 и 10 наклеены тензометры 13 и 14. (ПКБ-5-100-III-ТУ-01-17-66) номинальным сопротивлением 100 Ом. Реакция кольцевого ротора через наконечники 11 и 12 передаётся на чувствительные элементы 2 и 3, что приводит к деформации пластин с тензометрами. Изменения сил взаимодействия кольцевого ротора и динамометра проводится непрямым методом [28, 29]. Он основан на изменении активного сопротивления тензометров при их деформировании вместе с упругой пластиной под действием измеряемой

силы. Это приводит к разбалансированию полумоста постоянного тока. Напряжение разбалансирования с диагонали каждого полумоста подаётся на тензо-АЦП.

Общий вид изготовленного двухкомпонентного динамометра показан на рис. 4.

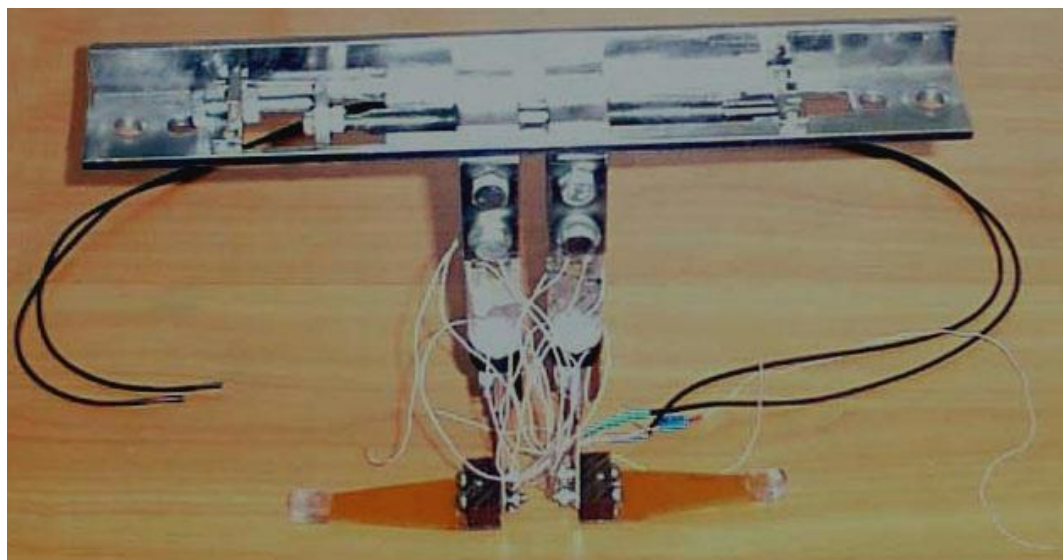


Рис. 4. Динамометр двухкомпонентный

Измерительный комплекс на базе ПК оснащён модулем *SDI-ADC-16-32HLV1/1*, который представляет собой многоканальный быстродействующий 16-разрядный аналого-цифровой преобразователь. Модуль позволяет измерять значение напряжений по 16 дифференциальным каналам в произвольном порядке и используется как тензо-АЦП, у которого задействованы 4 дифференциальных канала – по числу упругих пластин с тензодатчиками.

Специально для работы модуля *SDI-ADC-16-32HLV1/1* с динамометром разработано программное обеспечение. Оно позволяет осуществлять запуск процесса измерения по команде с компьютера, а именно считывать результаты после включения, проводить

аппаратную обработку и выборочную запись результатов в отдельные файлы. При этом результаты измерения частоты вращения кольцевого ротора синхронизируются с измерением сил и крутящего момента, а затем выводятся на монитор в режиме online (рис. 5).

Перед непосредственным применением на экспериментальной установке динамометр и его аппаратный комплекс проходили процесс тарировки. Приложение внешней заранее известной нагрузки к наконечникам динамометра и верификация их с показаниями на интерфейсе измерений (см. рис. 5) позволили в дальнейшем выполнять измерения радиальной силы с точностью до 0,005 Н, а крутящего (вращающего) момента – 0,005 Нм.

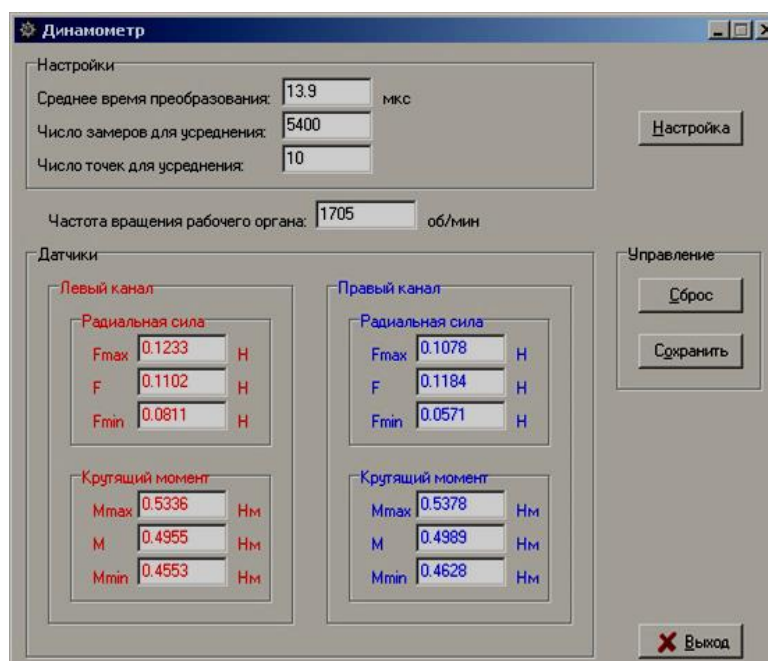


Рис. 5. Программный интерфейс измерений

Таким образом, специально для экспериментальной установки бесшпиндельного станка резки монокристаллов была разработана оригинальная конструкция двухкомпонентного динамометра с программным измерительным комплексом. Решена научно-техническая задача высокоточного измерения радиальных сил и вращающего момента на кольцевом роторе-инструменте, который устойчиво вращается в электромагнитном поле без механических опор и механического закрепления. Динамометрические измерения на «свободном» кольцевом роторе позволяют исследовать параметры и характеристики бесшпиндельного станка резки монокристаллов, обладающего рядом технико-технологических преимуществ в сравнении со станками традиционных конструкций. Наиболее важные из них: снятие ограничений на размеры обрабатываемой заготовки благодаря резки новым способом – напроход, снижение энергопотребления в 2,5...3 раза,

уменьшение массы и габаритов станка в 5 раз и более.

**Выводы.** 1. Анализ конструкции бесшпиндельного станка резки с кольцевым ротором-инструментом, вращающемся в электромагнитном поле без механического закрепления, показал возможность контактного измерения вращающего момента и радиальной равнодействующей движущих электромагнитных сил на «свободном» кольцевом роторе. Для этого динамометр должен быть двухкомпонентным, устанавливаться в экспериментальную установку вместо механизма подачи и прикладывать внешнюю тарированную нагрузку по внутренней кромке кольцевого ротора в процессе измерений.

2. Разработан принцип динамометрических измерений, который состоит в приложении тарированной контактной внешней нагрузки по внутренней кромке за счёт разведения наконечников чувствительных элементов в противоположные стороны в

диаметральном направлении. Силы трения наконечников о внутреннюю кромку имеют тангенциальное направление, регулируются величиной разведения и уравниваются вращающим кольцевой ротор моментом. Силы давления на внутреннюю кромку имеют радиальное направление, уравниваются силами упругости кольцевого ротора и радиальной равнодействующей движущих электромагнитных сил.

3. Разработана конструкция и изготовлен двухкомпонентный динамометр, который устанавливается вместо механизма подачи в экспериментальную установку станка резки. Он позволяет имитировать технологический процесс резки, измерять радиальную силу и вращающий момент как в центральном положении равновесия кольцевого ротора, так и при радиальном смещении до 30 мм. Одна пара пластин с датчиками предназначена для измерения тангенциальных сил и вращающего момента (первый компонент), а вторая – перпендикулярно расположенная – пара пластин с датчиками измеряет равнодействующую радиальных движущих сил (второй компонент динамометра).

4. Созданы измерительная аппаратура, ПО и интерфейс для управления процессом динамометрических измерений с фиксацией и обработкой измерительной информации в цифровом виде, включая синхронное измерение частоты вращения кольцевого ротора.

#### Список источников

1. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных. – Л.: Судостроение, 1980. – 384 с.
2. Протасов К.В. Статистический анализ экспериментальных данных. – М.: Мир, 2005. – 142 с.

3. Брешев В.Е. Развитие теории и методов проектирования приводов бесконтактного типа с комбинированным и пассивным обеспечением устойчивости: монография. – Луганск: Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2016. – 208 с.

4. Брешев В.Е., Шевченко С.В. Приводы машин с кольцевыми рабочими органами без механических опор: монография. – Луганск: Изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2017. – 186 с.

5. Брешев В.Е., Долженко Ю.С. Концепция создания бесконтактных приводов вращения и их применение в машинах различного назначения // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2025. – Вып. 2(89) – С. 19–26.

6. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин: учебник в 2-х кн. Кн.1. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 464 с.

7. Осокин Ю.А., Герди В.Н., Майков К.А., Станкевич Н.Н. Теория и применение электромагнитных подвесов / – М.: Машиностроение, 1980. – 284 с.

8. Меркин Д.Р. Введение в теорию устойчивости движения. – СПб.: Лань, 2003. – 304 с.

9. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики: учебник в 2 т. – СПб.: Лань, 2002. – 736 с.

10. Brian Rowe W. Hydrostatic, Aerostatic, and Hybrid Bearing Design. – Oxford, 2012 – 334 p.

11. Wiley J. Air Bearings. Theory, Design and Applications. – Farid Al-Bender KU Leuven, Department of Mechanical Engineering Leuven Belgium, 2021. – 595 p.

12. Рябичев В.Д., Брешев В.Е., Синдеева Е.В. Исследование прочности быстровращающегося медного кольцевого режущего инструмента без механического закрепления // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2026. – Том 28, №1. – С. 78–85.

#### References

1. Montgomeri D.K. Experiment planning and data analysis. – L.: Sudostroenie, 1980. – 384 p.
2. Protasov K.V. Statistical analysis of experimental data. – M.: Mir, 2005. – 142 p.
3. Breshev V.E. Development of theory and methods of design of contactless type drives with combined and passive stability assurance: monografija. – Lugansk: Izd-vo LGU im. V. Dalja, 2016. – 208 p.

4. Breshev V.E., Shevchenko S.V. Drives of machines with ring-shaped working bodies without mechanical supports: a monograph. – Lugansk: Izd-vo LNU im. V. Dalja, 2017. – 186 p.

5. Breshev V.E., Dolzhenko Ju.S. The concept of creating contactless rotary drives and their application in various machines // *Progressivnye tehnologii i sistemy mashinostroenija*. – Doneck: Izd-vo DonNTU, 2025. – Vyp. 2(89) – P. 19–26.

6. Kopylov I.P., Klovov B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F. Design of electric machines: *uchebnik v 2-h kn. Kn.1*. – M.: Jenergoatomizdat, 1993. – 464 p.

7. Osokin Ju.A., Gerdi V.N., Majkov K.A., Stankevich N.N. Theory and application of electromagnetic suspensions / – M.: Mashinostroenie, 1980. – 284 p.

8. Merkin D.R. Introduction to the theory of motion stability. – SPb.: Lan', 2003. – 304 p.

9. Butenin N.V., Lunc Ja.L., Merkin D.R. Course of theoretical mechanics: *uchebnik v 2 t.* – SPb.: Lan', 2002. – 736 s. 10. Brian Rowe W. Hydrostatic, Aerostatic, and Hybrid Bearing Design. – Oxford, 2012 – 334 p.

11. Wiley, J. Air Bearings. Theory, Design and Applications. – Farid Al-Bender KU Leuven, Department of Mechanical Engineering Leuven Belgium, 2021. – 595 p.

12. Rjabichev V.D., Breshev V.E., Sindeeva E.V. Study of the strength of a fast-rotating copper ring cutting tool without mechanical fastening // *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*. – 2026. – Tom 28, №1. – P. 78–85.

*Статья поступила в редакцию 02.12.2025*

#### Информация об авторах

**Брешев Владимир Евгеньевич**, д-р тех.н., доцент, заведующий кафедрой «Станки, инструменты и инженерная графика» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

*SPIN-код: 1923-7263, AuthorID: 1248354*

**E-mail:** veb\_lug@mail.ru

**Рябичев Виктор Дронович**, д-р тех.н., профессор, ректор Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

*SPIN-код: 5471-6304, AuthorID: 1048809*

**E-mail:** dahl.univer@yandex.ru

**Брюховецкий Андрей Николаевич**, д-р тех.н., проф., профессор кафедры транспортных технологий Луганского государственного аграрного университета им. К.Е. Ворошилова.

*SPIN-код: 1062-8296, AuthorID: 1100016*

**E-mail:** bruhoveckiy67@rambler.ru

**Корсунов Константин Анатольевич**, д-р тех.н., профессор, заведующий кафедрой физики Луганского государственного университета имени Владимира Даля.

*SPIN-код: 4174-9186, AuthorID: 1185459*

**E-mail:** korsunof@mail.ru

#### Information about the authors

**Breshev Vladimir Evgen'evich**, Doctor of technical sciences, Associate Professor, Head of the Department «Machines, Tools and Engineering Graphics» of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

*SPIN-код: 1923-7263, AuthorID: 1248354*

**E-mail:** veb\_lug@mail.ru

**Ryabichev Viktor Dronovich**, prof., doctor of technical sciences of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

*SPIN-код: 5471-6304, AuthorID: 1048809*

**E-mail:** dahl.univer@yandex.ru

**Bryukhovetskiy Andrey Nikolaevich**, D.Sc. (Eng.), Prof., Professor of the Department of Transport Technologies of the Lugansk State Agrarian University named after K.E. Voroshilov.

*SPIN-код: 1062-8296, AuthorID: 1100016*

**E-mail:** bruhoveckiy67@rambler.ru

**Korsunov Konstantin Anatolyevich**, doctor of technical Sciences, Professor, head of the Department of physics of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

*SPIN-код: 4174-9186, AuthorID: 1185459*

**E-mail:** korsunof@mail.ru

---

**Для цитирования:**

Брешев В. Е., Рябичев В. Д., Брюховецкий А. Н., Корсунов К. А. Разработка динамометра для исследований сил и моментов на вращающемся в электромагнитном поле кольцевом роторе станка резки // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2026 – № 1(6). – С. 49-60.

**For citation:**

Breshev V. E., Ryabichev V. D., Brjuhoveckij A. N. Development of a dynamometer for research of forces and tors on a rotating ring rotor of a cutting machine in an electromagnetic field // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering. – 2026 – № 1(6). – P. 49-60.

---

УДК 621.43

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ТУРБОКОМПРЕССОРОВ ЭЛЕКТРОХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ДОВОДКОЙ ВТУЛОК ТОРЦЕВОГО УПЛОТНЕНИЯ****Замота Т. Н., Чижевская Д. Ю.****INCREASING OF TURBOCHARGERS RESOURCE THROUGH ELECTROCHEMICAL-MECHANICAL RUNNING-IN OF SEALING END BUSHINGS****Zamota T. N., Chizhevskaya D. Y.**

**Аннотация.** Статья посвящена актуальной теме повышения ресурса турбокомпрессоров электрохимико-механической доводкой втулок торцевого уплотнения. Приведены результаты применения разработанной методики ЭХМД деталей турбокомпрессора. По результатам исследований было определено, что электрохимико-механическая доводка торцевых поверхностей канавки втулки кольцевого уплотнения турбокомпрессора устраняет искажение макрогеометрии и приводит к формированию износостойкого микрорельефа, что позволяет снизить приработочный износ деталей кольцевого уплотнения на 30...40% и, соответственно, повысить его ресурс.

**Ключевые слова:** электрохимико-механическая приработка, техническое обслуживание и ремонт, турбокомпрессор

**Abstract.** The article is devoted to the actual topic of increasing the resource of turbochargers by electrochemical-mechanical running-in of sealing end bushings. The results of applying the developed electrochemical-mechanical running-in technique for turbochargers parts are presented. Based on the research results, it was determined that electrochemical-mechanical running-in of the groove end surfaces of the turbo compressor ring seal bush eliminates distortion of the macrogeometry and leads to the formation of an abrasion-resistant microrelief, which reduces the initial wear of the ring seal parts by 30-40% and, consequently, increases its resource.

**Keywords:** electrochemical-mechanical running-in, maintenance and repair, turbocharger

**Введение.** Повышение ресурса узлов и агрегатов машин возможно на этапах проектирования, изготовления и обкатки. После сборки механизма остается один из возможных путей – это обеспечение повышения долговечности при обкатке, во время которой происходит приработка трущихся поверхностей деталей. Это в полной мере относится к такому сложному узлу каким является турбокомпрессор двигателя внутреннего сгорания.

Проведение процессов приработки торцевых уплотнений должно обеспечивать минимальный приработочный износ, формировать оптимальную, с позиций повышения ресурса сопряжения, шероховатость и обеспечивать гидравлическую плотность данного сопряжения. Таким требованиям отвечает применение электрохимико-механической приработки, которая доказала свою

эффективность при приработке других сопряжений [1].

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время послеремонтный ресурс турбокомпрессоров значительно ниже регламентированного техническими условиями [2]. Это связано с низким качеством запасных частей, поступающих в ремонтное производство, в т.ч. несоответствием установленным требованиям макро- и микрогеометрии поверхностей трения деталей, отвечающих за ресурс турбокомпрессора. Это приводит к незавершенности процессов приработки [3]. Известно, что ресурс турбокомпрессора регламентирует кольцевое торцевое уплотнение как с холодной, так и с горячей стороны [4].

По существующей методике, ранее разработанной в ЛГАУ им. К.Е. Ворошилова, при ремонте

турбокомпрессоров применяется селективный подбор колец к канавкам втулки, чтобы обеспечить зазор в сопряжении канавка-кольцо торцевого уплотнения в пределах 0,02...0,04 мм. Кольцо затем подгоняется в диаметральном направлении для обеспечения плотного соединения с охватываемой деталью. После сборки вал с деталями (см. рис.1а) устанавливается в средний корпус турбокомпрессора и поступает на обкатку. В начале и в конце обкатки контролируется наличие подтеканий масла из торцевых кольцевых уплотнений горячей и холодной стороны. Если подтекания отсутствуют, то продолжительность обкатки составляет 15...20 мин. После этого подсобранный турбокомпрессор поступает на окончательную сборку. При наличии подтекания масла производится замена кольца или втулки.

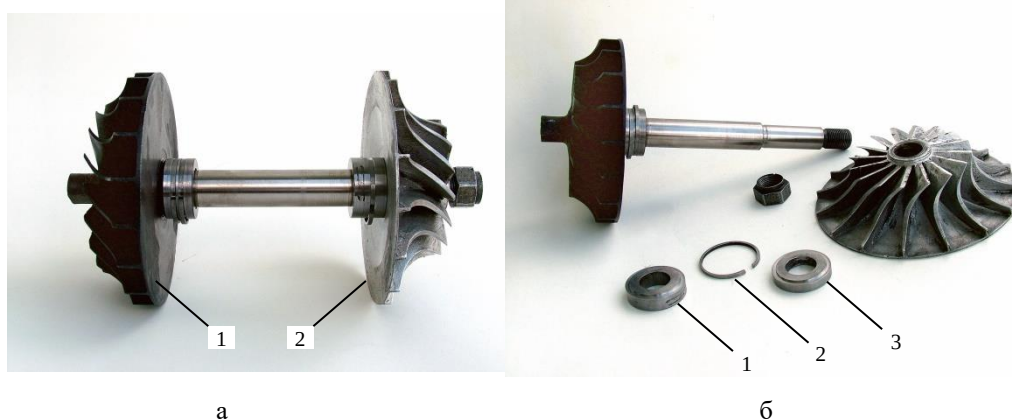


Рис. 1. Вал турбокомпрессора в сборе:

а – вал в сборе, 1 – горячая крыльчатка, 2 – холодная крыльчатка; б – вал со снятой холодной крыльчаткой, 1, 3 – горячая и холодная части разрезной втулки, 2 – кольцо

Анализ возникновения подтекания масла показал, что его причиной является отклонения макрогеометрии и микрошероховатости поверхностей деталей торцевого уплотнения, и особенно втулки. В данной работе рассмотрена возможность

устранения данного дефекта использованием способа электрохимико-механической доводки (ЭХМД) [5].

Исследования проводились на опытных и контрольных турбокомпрессорах ТКР-11. Для сравнимости результатов втулка

уплотнения разрезалась на две части (полувтулки 1, 3 рис.1б), что позволило контролировать изменение макро- и микрогеометрии рабочих торцевых поверхностей втулки, приработанных с применением ЭХМД и обычным способом. У опытных турбокомпрессоров разрезные уплотнительные втулки вначале подвергались доводке внутренних боковых поверхностей канавки способом ЭХМД, после чего турбокомпрессоры дособирались и подвергались стендовой обкатке.

Для сравнения контрольные разрезные втулки прирабатывались при обкатке контрольных турбокомпрессоров. Сравнивались износ и изменение шероховатости опытных и контрольных втулок и колец.

Массовый износ колец и частей разрезных втулок определялся на аналитических весах WA-31 с точностью 0,1мг. Изменение шероховатости рабочих поверхностей кольца и втулки

устанавливалось с помощью профилограмм снятых на профилографе-профилометре модели 201 завода «Калибр».

Опыты по доводке боковых поверхностей канавки уплотнительной разрезной втулки проводились на машине трения СМЦ-2 (рис.2). В опытах применялся электролит, содержащий смесь глицерина с 20% водным раствором  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  в соотношении 84:16 [6].

Доводка способом ЭХМД происходила в следующем порядке: разрезная втулка 2 устанавливалась на вал 4 (рис. 2) машины трения СМЦ-2. Втулка вращалась с частотой  $100 \text{ мин}^{-1}$ . Внутри канавки втулки подавалось технологическое кольцо 1 с зазором 0,02 мм, закрепленное с помощью оправки 3 на верхнем валу 5 машины трения. Кольцо и втулка вращались с проскальзыванием 20%. В зону трения самотеком поступал электролит и через детали пропусклся переменный ток силой 1А. Продолжительность опыта – 10 мин. Повторность опытов трехкратная.

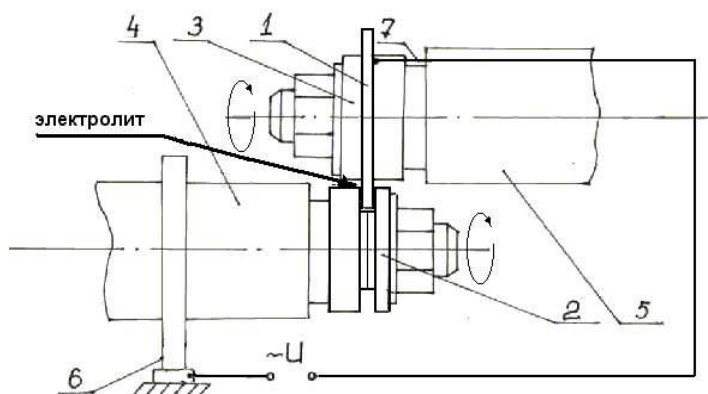


Рис. 2. Схема приработки разрезной втулки:

1 – верхнее кольцо; 2 – разрезная втулка; 3 – верхняя оправка; 4 – нижний вал машины трения СМЦ-2; 5 – верхний вал СМЦ-2; 6 – нижний токоподвод; 7 – верхний токоподвод

За счет совместного электрохимико-механического воздействия формировался более качественный микро- и макрорельеф поверхностей втулки. Об улучшении макрогеометрии поверхностей втулки и

кольца судили по постоянству токовых параметров: при наличии макроискажений ток изменялся от 0,8 до 1,2А, а к концу опыта за счет улучшения макрогеометрии между деталями образовывался

постоянный зазор и ток становился постоянным – 1А. Затем втулки поступали на сборку и турбины подвергались обкатке.

Исследования показали, что шероховатость боковых поверхностей втулок контрольных турбокомпрессоров после стендовой обкатки не меняла своего характера (рис. 3, а и 4, а: рабочие участки поверхности занимают правую часть профилограмм).

Боковая поверхность кольца при этом заглаживалась, а его микрометрирование зафиксировало формирование канавки, что сделало его неравномерным по толщине (рис.3, б и 4, б). В то же время износ кольца со стороны горячей крыльчатки (рис.3б) был несколько больше, чем со стороны холодной крыльчатки (рис. 4, б).

При ЭХМД втулки наблюдалось изменение параметров шероховатости

боковых поверхностей канавки: относительная опорная длина профиля увеличивалась, а высота неровностей уменьшалась (микропрофили 1 и 2, рис. 3, в и 4, в). Шероховатости втулки и кольца по своему характеру приближались друг к другу (микропрофили 2 рис. 3, в и 4, в и микропрофили 1 рис. 3, г и 4, г), и были лучшими, чем при использовании существующей методики (микропрофиль 1 рис. 3, а, б и 4, а, б). По-видимому, именно это являлось причиной того, что у опытных турбокомпрессоров перед обкаткой подтекание масла отсутствовало, в то время как у контрольных имело место. У контрольных турбокомпрессоров подтекания масла прекращалось лишь после обкатки.

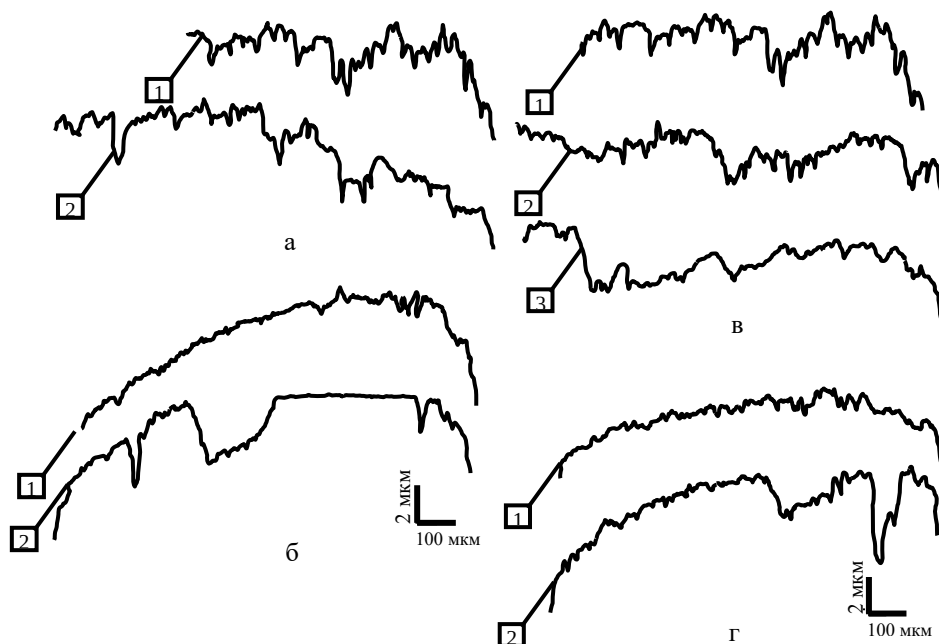


Рис.3. Профилограммы рабочих поверхностей деталей кольцевого уплотнения турбокомпрессора со стороны горячей крыльчатки:

а – втулка, б – кольцо, приработанные по существующей методике 1 – исходная шероховатость, 2 – шероховатость после обкатки; в, г – детали, приработанные по разработанной методике: в – втулка 1 – исходная шероховатость, 2 – шероховатость после ЭХМД, 3 – шероховатость после ЭХМД и обкатки; г – кольцо: 1 – исходная шероховатость, 2 – шероховатость после обкатки

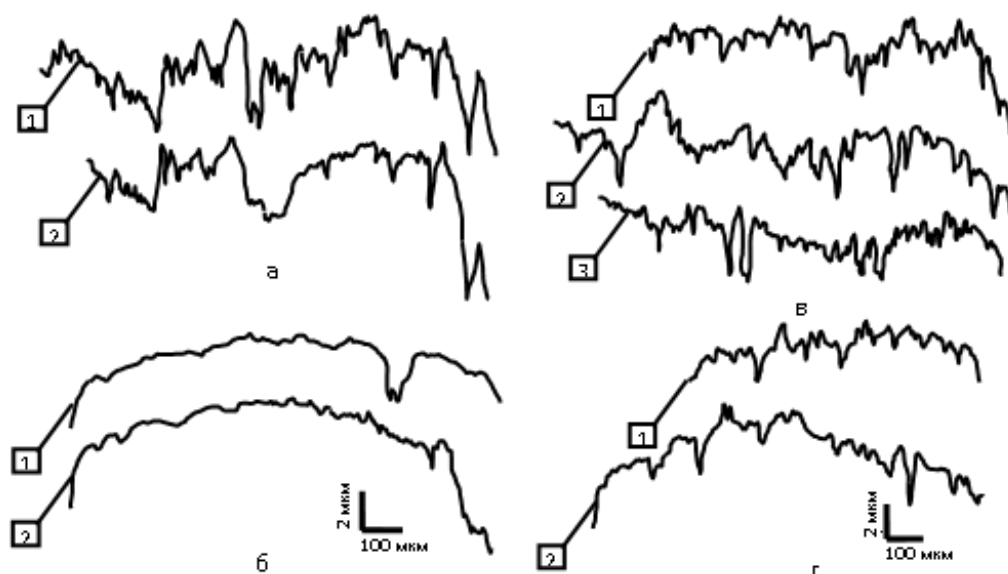


Рис.4. Профилотграммы рабочих поверхностей деталей кольцевого уплотнения турбокомпрессора со стороны холодной крыльчатки:

а – втулка, б – кольцо, приработанные по существующей методике 1 – исходная шероховатость, 2 – шероховатость после обкатки; в, г – детали, приработанные по разработанной методике: в – втулка 1 – исходная шероховатость, 2 – шероховатость после ЭХМД, 3 – шероховатость после ЭХМД и обкатки; г – кольцо: 1 – исходная шероховатость, 2 – шероховатость после обкатки

Втулка в среднем изнашивалась у контрольного турбокомпрессора на 1,35 мг, а у опытного – на 0,8 мг. В тоже время после ЭХМД и обкатки поменялась картина изнашивания полувтулок: у опытного турбокомпрессора втулка со стороны холодной крыльчатки имела износ на 2 мг меньше, чем у втулки со стороны горячей

крыльчатки, а у контрольного турбокомпрессора – наоборот.

Эти данные говорят о лучшем формировании поверхностей после ЭХМД втулки, что привело к уменьшению начального приработочного износа деталей на 30...40%, и это позволяет сделать предположение о увеличении послеремонтного ресурса турбокомпрессора.

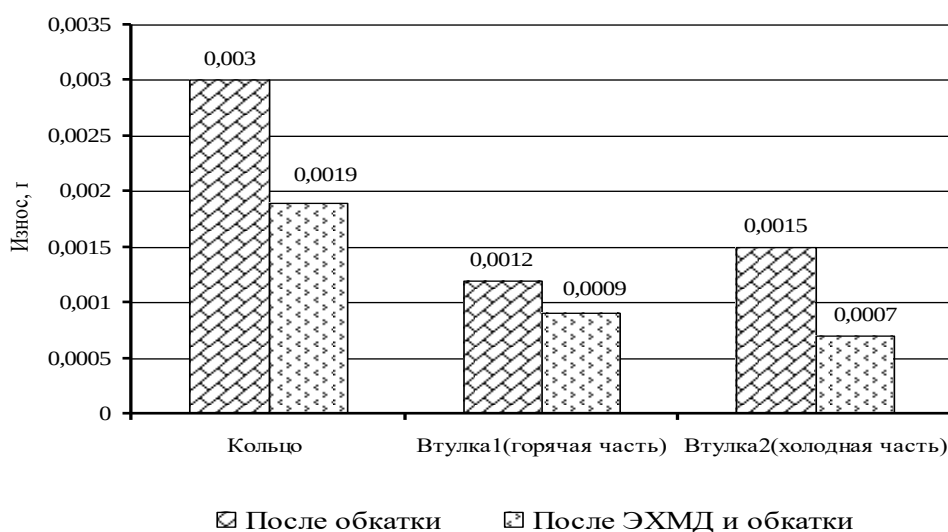


Рис. 5. Массовый износ деталей кольцевого уплотнения

По результатам исследований можно сделать вывод, что электрохимико-механическая доводка торцевых поверхностей канавки втулки кольцевого уплотнения турбокомпрессора устраняет искажение макрогеометрии и приводит к формированию износостойкого микрорельефа, что позволяет снизить приработочный износ деталей кольцевого уплотнения на 30...40% и, соответственно, повысить его ресурс.

#### Список источников

1. Замота Т.Н., Чижевская Д.Ю., Бондарец О.А. Повышение долговечности ресурсопределяющих сопряжений машин электрохимико-механической приработкой: Монография / Т.Н. Замота, Д.Ю. Чижевская, О.А. Бондарец. – Луганск: Изд-во ЛГУ им. В.Даля; ИП Орехов Д.А., 2025. – 430 с.
2. ГОСТ Р 53637-2009 Турбокомпрессоры автотракторные. Общие технические требования и методы. – М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2010 – 10 с.
3. Билык Ш.М. Макрогеометрия деталей машин. Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1973. –344 с.
4. Голубев А.И. Торцовые уплотнения вращающихся валов. Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1974.-325 с.
5. А.с. 1045049 СССР. Способ приработки деталей. / Алексеев В.П., Болдарь Л.Н., Михалев В.Д. Опубл. 30.09.83. Бюл. №36.
6. Замота Т.Н. Управление процессами

#### Информация об авторах

**Замота Тарас Николаевич**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой автомобильного транспорта, Институт транспорта и логистики Луганского государственного университета имени Владимира Даля.

*SPIN-код: 4443-7346, AuthorID: 1176118*

**E-mail:** zamota71@gmail.com

приработки основных сопряжений деталей машин при изготовлении и ремонте: Монография // Т.Н. Замота, В.В. Аулин. – Кировоград: издатель Лысенко В.Ф.; 2015. – 303 с.

#### References

1. Zamota T.N., Chizhevskaya D.Yu., Bondarets O.A. Increasing the durability of resource-determining machine interfaces by electrochemical and mechanical running-in: A monograph / T.N. Zamota, D.Yu. Chizhevskaya, O.A. Bondarets. - Lugansk: Publishing House of the Leningrad State University named after V.Dahl; IP Orekhov D.A., 2025. – 430 C.
2. GOST R 53637-2009 Automotive turbochargers. General technical requirements and methods. Moscow: FSUE "STANDARTINFORM", 2010 – 10 p.
3. Bilyk Sh.M. Macrogeometry of machine parts. Ed. 2nd edition. and add. – M.: Mechanical Engineering, 1973. -344 p.
4. Golubev A.I. Mechanical seals of rotating shafts. 2nd edition. and add. – M.: Mashinostroenie, 1974. 325 p.
5. A.S. 1045049 USSR. The method of running in parts. Alekseev V.P., Boldar L.N., Mikhalev V.D. Publ. 30.09.83. Bul. No.36.
6. Zamota T.N. Control of the running-in processes of the main interfaces of machine parts during manufacture and repair: A monograph // T.N. Zamota, V.V. Aulin. Kirovograd: publisher Lysenko V.F.; 2015. – 303 p.

*Статья поступила в редакцию 02.12.2025*

#### Information about the authors

**Zamota Taras Nikolaevich**, D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of the Department of Automobile Transport of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

*SPIN-код: 4443-7346, AuthorID: 1176118*

**E-mail:** zamota71@gmail.com

---

**Чижевская Дарья Юрьевна**, к-т тех.н.,  
доцент, доцент кафедры автомобильного  
транспорта, Институт транспорта и логистики  
Луганского государственного университета  
имени Владимира Даля.

*SPIN-код: 5817-4530, AuthorID: 1251550*

**E-mail:** shevchenkodu@mail.ru

**Chizhevskaya Daria Yuryevna**, PhD in  
Engineering, Associate Professor, Associate  
Professor of the Department of Automobile  
Transport, of the Lugansk State University named  
after Vladimir Dahl.

*SPIN-код: 5817-4530, AuthorID: 1251550*

**E-mail:** shevchenkodu@mail.ru

---

**Для цитирования:**

Замота Т. Н., Чижевская Д.Ю. Повышение ресурса турбокомпрессоров электрохимико-механической доводкой втулок торцевого уплотнения // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2026. – № 1(6). – С. 61-67.

**For citation:**

Zamota T. N., Chizhevskaya D. Yu. Increasing of turbochargers resource through electrochemical-mechanical running-in of sealing end bushings // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering. – 2026. – № 1(6). – P. 61-67.

---

УДК 539.3

## ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКОГО ВРЕМЕНИ РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Солодовник М. Д., Ясуник С. Н., Волков И. В., Кузнецова М. Н.

## ASSESSMENT OF CRITICAL TIME OF DESTRUCTION OF CONSTRUCTION ELEMENTS

Solodovnik M. D., Yasunik S. N., Volkov I. V., Kuznetsova M. N.

**Аннотация.** В статье рассмотрен вопрос оценки времени функционирования детали до разрушения. Аналитически определено критическое время разрушения для стержня, вала и оболочки. Для рассматриваемых элементов конструкций учтены параметры ползучести, температурный фактор, эффект хлопка. Приведены результаты вычислений.

**Ключевые слова:** стержень, оболочка, нагрузки, момент, напряжение, деформация, ползучесть, разрушение, время, длительная прочность.

**Abstract.** The article discusses the issue of assessing the time of a part's operation before failure. The critical failure time for a rod, shaft, and shell is determined analytically. The parameters of creep, temperature factor, and the cotton effect are taken into account for the considered structural elements. The results of calculations are presented.

**Keywords:** rod, shell, loads, moment, stress, deformation, creep, failure, time, long-term strength.

**Введение.** В процессе научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок машин и механизмов, используемых в промышленности, на транспорте, в энергетике и т.д., исследователи сталкиваются с проявлениями появляющихся дефектов, что требует деформационно-силового расчета их звеньев. Рассмотрим этот вопрос для двух типов элементов конструкций: стержней – протяженных прямолинейных элементов (валы, оси, штоки и др.) и оболочек – тел, толщина которых много меньше двух других размеров (резервуары, корпуса подводных лодок, обшивка фюзеляжа самолета и др.).

И для стержневых систем, и для оболочек возможна потеря устойчивости за счёт сжимающих (растягивающих) воздействий (например, при работе шатуна двигателя) [1]. Естественно, что необходимо препятствовать образованию дефектов, таких как изменение структуры, износ, деформация, ползучесть и разрушение. При этом следует учитывать, что наряду с критическим напряжением имеет место и критическое время разрушения, разное для разных материалов (для стали, титановых сплавов, дюралюминия и т.д.).

Изначально рассмотрим прямолинейный стержень с выработанным ресурсом, для которого необходимо

оценить: сколько данная деталь ещё может функционировать до разрушения.

Так, для стареющего стержня выбираем математическую модель – функционал в виде набора физических параметров:  $\Phi(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, \sigma, \dot{\sigma}, t)$ , связь между которыми описывается законом ползучести:

$$\varphi(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, \sigma, \dot{\sigma}, t) = 0, \quad (1)$$

$$\sigma + n\dot{\sigma} = E\varepsilon + nB\dot{\varepsilon}, \quad (2)$$

где  $n$  – порядковые номера параметров;

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + k\sigma^n t - \text{деформация стержня}; \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} - \text{скорость деформации};$$

$\sigma$  – напряжение;

$t$  – время, характеризующее продолжительность ползучести, до разрушения;

$E$  – длительный,  $B$  – мгновенный модули упругости.

Предположим, что стержень сжат продольным усилием  $P_z$  [2], испытывает осевую деформацию  $\varepsilon$ , которая характеризуется параметрами (3), вызывая напряжение  $\sigma$ . В дальнейшем точки над переменными обозначают производную по времени (как в общей механике). Поэтому формулу (3) представим в дифференциальной форме:

$$d\varepsilon = \left( \frac{1}{E} + kn\sigma^{n-1}t \right) d\sigma. \quad (4)$$

Интегрируя (4) и выделяя  $t$ , получим:

$$t = \frac{1}{n} \cdot \frac{(1-\sigma)}{kE\sigma_3^{(n+1)}} + C, \quad (5)$$

где  $\sigma_3$  – эйлерово напряжение.

Здесь с учетом ползучести дополнительно необходимо учесть, что  $\sigma = \frac{E_k}{E}$ , а также

$$E_k = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\sigma}{\sigma_3} E, \quad (6)$$

где  $E_k$  – касательный модуль ползучести, который связан с  $E$  формулой:

$$\frac{\varepsilon}{\sigma} E_k = \frac{1}{n} + \frac{E_k}{E} \left( 1 - \frac{1}{n} \right). \quad (7)$$

В дополнение к формуле (5) приведем значение критического времени по теории динамического критерия разрушения:

$$t_{\text{крит}} = \frac{\sigma - \sigma_3}{\sigma_k E \sigma^3} \ln W_0^2, \quad (8)$$

где  $W_0$  – наибольший начальный прогиб стержня.

Приведенные соотношения определяют  $C$  в (5) как постоянную интегрирования, а при  $n = 1$  дают критическое время разрушения  $t_{\text{крит}}$  по приведенной выше общей формуле (5) с учетом (6) и (7) и отвечающей касательно-модульной теории ползучести.

Приведенные зависимости (5)–(8) являются наиболее удобными в практических расчетах. Так, например, если взять стержень, нагруженный осевым усилием  $P_z = 500$  кг, вызывающим напряжение  $\sigma = 310 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$  с модулем упругости  $E = 4 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{см}}$  и начальным прогибом  $W_0 = 0,01$  см, то при стандартных  $h$  и  $R$  формула (8) дает  $t_{\text{крит}} \approx 3,5$  часа. Такое решение соответствует напряжению при тех же геометрических и физических параметрах:

$$\sigma_z = \sigma_{\text{крит}} \leq \frac{2}{3} \left( \frac{h}{R} \right) \sqrt{EE_k}, \quad (9)$$

где  $h$  – толщина стержня,

$R$  – его радиус.

Расчет по вышеприведенной формуле (5) дает результат  $t_{\text{крит}} \approx 2,5$  часа.

Расхождение временных результатов частично объясняется неоднозначностью

аналитических выкладок и различием приборов измерения, что согласуется с [2] и [3]. Поэтому к приведенным формулам (5)-(9) присоединим решения и уточнения результатов с учетом температурного фактора  $T$  для осевого напряжения сжатия:

$$\sigma_{\text{крит}} = \sigma_z = -\frac{2}{3} \left( \frac{r}{l} \right) \alpha E (T - T_0), \quad (10)$$

где  $r$  – радиус вала;

$l$  – длина вала;

$\alpha$  – температурная постоянная;

$T$  – температура текущая;

$T_0$  – начальная температура.

Т.е. повышение температуры снижает  $\sigma_{\text{крит}}$  [4].

При рассмотрении деформации кручения валов предложим полученный выше универсальный более точный степенной метод определения угла кручения  $\varphi$  под воздействием момента  $M = \sigma J \theta$ :

$$\varphi = (1 + a) \left( \frac{1}{1+a} \right) \left( \frac{M}{J} \right)^{\left( \frac{b}{1+a} \right)} c^{\left( \frac{1}{1+a} \right)} z t^{\left( \frac{1}{1+a} \right)}, \quad (11)$$

где  $a, b, c$  – постоянные асимптотического метода.

При  $z = l$  имеем  $\varphi_{\text{max}}$ , что характеризуется окончательным разрушением вала при

$$t_{\text{крит}} = \frac{\varphi_{\text{max}}}{A}, \quad (12)$$

где  $A = \text{const}$  – коэффициент, стоящий перед степенным по времени параметром  $t^{\left( \frac{1}{1+a} \right)}$ ;

$J$  – полярный момент инерции вала.

По упрощенной формуле [2] и дополнительным экспериментам

$$\varphi = 6,6 + 3\sqrt{t}, \text{ град.} \quad (13)$$

Откуда

$$t_{\text{крит}} = \frac{(\varphi_{\text{max}} - 6,6)^2}{9}, \text{ часов.} \quad (14)$$

Разумеется, что с появлением температурного фактора определяющим и корректирующим является касательное напряжение:

$$\tau = \frac{1}{c} \rho^{\frac{1+a}{b}} \theta^{\frac{1}{b}} \theta^{\frac{a}{b}}, \quad (15)$$

где  $\theta = \frac{\partial \varphi}{\partial z}$  – угол относительного поворота вала вокруг своей оси  $z$ .

Входящие в (11) параметры со степенями получены опытным путем в пределах температуры  $300^\circ\text{C}$  приведены ниже:

$$a = 1, \quad b = 13, \quad l = 0,4 \text{ м,}$$

модуль сдвига  $G = \frac{E}{2(1-\mu)} = 7 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{см}^2}$

количественно и качественно отличается от

модуля упругости  $E = 4 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{см}^2}$ ,

используемый в задачах изгиба и сжатия валов.

Приборная градуировка по  $\varphi_{\text{крит}}$  и  $t_{\text{крит}}$  показывают граничные значения зоны ползучести для угла скручивания  $\varphi_{\text{max}} = 36,5^\circ$  и достигается за 100 часов, т.е. имеется дополнительное, но рискованное время доработки, что в ответственных отраслях не допустимо.

Известно [1, 3], что задачи кручения с учетом ползучести относятся к наиболее сложным, поэтому их решения возможно только при комплексном подходе и, как заметил академик А.Н. Крылов: «Сколько бы ни было точно математическое решение, оно не может быть точнее тех приближенных предпосылок, на коих основано», так что исследователям было,

есть и будет, чем заниматься в прочностной науке [4].

Далее рассмотрим задачу о кручении цилиндрической оболочки как одного звена при защемленном нижнем и «свободном» верхнем краях, что имитирует резервуар большого объема, нагруженный вихревыми штормовыми потоками, равнодействующей силой  $F$  с результирующим моментом:

$$M_z = -2\pi R^2 F, \quad (16)$$

создающим внутреннее силовое критическое напряженно-деформированное поле в режиме ползучести со значениями (11).

Ниже приведены значения напряжений и деформаций, при которых оболочка с «плавающей» крышей утрачивает несущую способность с эффектом хлопка:

$$\sigma_{\text{крит}} \leq \frac{7}{8} \frac{Eh}{R} \frac{1}{\sqrt{3(1-\mu^2)}}, \quad (17)$$

$$\varepsilon_{\text{крит}} = \frac{\sigma_{\text{крит}}}{E} + \frac{1}{n} (1 - \sigma_{\text{крит}}), \quad (18)$$

где  $\mu$  – коэффициент пластичности, упругости.

$$\varepsilon_{\text{крит}} \approx 0,18 \frac{h}{R}. \quad (19)$$

Критические деформации определяют критическое предразрушительное состояние за время (длительность этапа разрушения), иногда называемое «длительной прочностью»:

$$t_{\text{крит}} = \frac{1}{n k E \sigma_{\text{крит}} \sigma_3^{(n-1)}}, \quad (20)$$

где  $k$  и  $n$  – коэффициенты, зависящие от свойств материала оболочки по касательно-модульной теории [3], базирующейся на

панельно-оболочечной аналогии с хлопковым разрушением.

На рис. 1 четко просматриваются как касательные, так и вертикальные составляющие вмятин, предшествующих окончательному хлопковому разрушению емкости.



Рис. 1. Случай одновременного действия кручения и значительного внутреннего давления

Численный графо-аналитический метод определения «длительной прочности» приведен для больших объемов в [3].

В статье вычисления проведены при  $\mu = 0,5$ ,  $\frac{R}{h} \leq 250$   $E = 4 \cdot 10^5 \frac{H}{\text{см}^2}$ .

Вычисления  $\mu = 0,5$   $k = 5 \cdot 10^{-12}$  (малая величина)  $n = 3$ ,  $\sigma_3 = 470 \frac{H}{\text{см}^2}$   $R \approx H$  – высота емкости.

**Выводы.** Зависимости, приведенные в статье, могут быть использованы для оценки критического времени разрушения для различных элементов конструкций, а именно стержней, валов, оболочек.

#### Список источников

1. Беляев Н.М. Устойчивость призматических стержней под действием переменных продольных сил // Инженерные сооружения и строительная механика. – Изд-во «Путь», 1984.

2. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. В 2 ч. Часть 2: учебное пособие для бакалавриата и магистратуры. – М.: Юрайт, 2018. – 480 с.

3. Бидерман В.Л. Основы современных методов расчета на прочность в машиностроении. – М.: Mashgiz, 1950. – 704 с.

4. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. – М.: Высшая школа, 1961. – 537 с.

### References

1. Belyaev N.M. Stability of prismatic rods under the action of variable longitudinal forces //

Engineering structures and structural mechanics. – Publishing house “Put”, 1984.

2. Volmir A.S. Stability of deformable systems. In 2 parts. Part 2: textbook for bachelor's and master's degrees. – M.: Yurayt, 2018. – 480 p.

3. Biderman V.L. Fundamentals of Modern Methods of Strength Calculation in Mechanical Engineering. – Moscow: Mashgiz, 1950. – 704 p.

4. Bezukhov N.I. Fundamentals of the Theory of Elasticity, Plasticity, and Creep. – Moscow: Vysshaya Shkola, 1961. – 537 p.

*Статья поступила в редакцию 02.12.2025*

### Информация об авторах

**Солодовник Михаил Дмитриевич**, к-т.физ.-матем.н., доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения и инженерный консалтинг» Луганского государственного университета имени Владимира Даля.

**E-mail:** tm.univer@yandex.ru

**Ясуник Светлана Николаевна**, к-т тех. н., доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения и инженерный консалтинг» Луганского государственного университета имени Владимира Даля.

**E-mail:** jsn7628620@mail.ru

**Волков Игорь Владимирович**, к-т тех. н., доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения и инженерный консалтинг» Луганского государственного университета имени Владимира Даля.

**E-mail:** volnaana@mail.ru

**Кузнецова Марина Николаевна**, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения и инженерный консалтинг» Луганского государственного университета имени Владимира Даля.

**E-mail:** kuz\_mari@rambler.ru

### Information about the authors

**Solodovnik Mikhail Dmitrievich**, candidate of Physical and Mathematical sciences, associate professor, associate professor of the department of engineering technology and engineering consulting of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

**E-mail:** tm.univer@yandex.ru

**Yasunik Svetlana Nikolaevna**, candidate of Technical sciences, associate professor, associate professor of the department of engineering technology and engineering consulting of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

**E-mail:** jsn7628620@mail.ru

**Volkov Igor Vladimirovich**, candidate of Technical sciences, associate professor, associate professor of the department of engineering technology and engineering consulting of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

**E-mail:** volnaana@mail.ru

**Kuznetsova Marina Nikolaevna**, senior lecturer of the department of engineering technology and engineering consulting of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

**E-mail:** kuz\_mari@rambler.ru

---

**Для цитирования:**

Солодовник М. Д., Ясуник С. Н., Волков И. В., Кузнецова М. Н. Оценка критического времени разрушения элементов конструкций // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2026. – № 1(6). – С. 68-73.

**For citation:**

Solodovnik M. D., Yasunik S. N., Volkov I. V., Kuznetsova M. N. Assessment of the critical time of destruction of structural elements // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering. – 2026. – № 1 (6). – P. 68-73.

---

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА****TECHNOLOGIES, MACHINERY, AND EQUIPMENT  
FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX**

УДК 631.361.022

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОЛОТИЛЬНО-СЕПАРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА  
АКСИАЛЬНО-РОТОРНОГО ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА  
МЕТОДОМ ПОСТРОЕНИЯ МАТРИЦЫ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ПАРАМЕТРОВ****Бахарев Д. Н., Пастухов А. Г., Вольвак С. Ф.****INVESTIGATION OF THE THRESHING AND SEPARATING DEVICE  
OF THE AXIAL-ROTARY GRAIN HARVESTER BY BUILDING A MATRIX  
OF PARAMETER INTERRELATIONS****Bakharev D. N., Pastukhov A. G., Volvak S. F.**

***Аннотация.** Совершенствование зерноуборочных комбайнов с аксиально-роторным молотильно-сепарирующим устройством требует всестороннего изучения параметров ротора и деки, оказывающих наибольшее влияние на эффективность процесса обмолота. С позиции воздействия на обмолачиваемую массу, ротор и дека работают как единая техническая система, обладающая взаимосвязанными конструктивными и технологическими параметрами. Анализ данной технической системы позволил построить матрицу взаимосвязей ее параметров. В результате этого установлено, что совершенствование высокопроизводительного аксиально-роторного молотильно-сепарирующего устройства для зерноуборочного комбайна требует увеличения площади зоны сепарации деки на 30% и более. Кроме того, необходимо усовершенствовать конструкцию направлятелей потока обмолачиваемой массы и расширить существующий диапазон регулировки угла их установки  $\pm 10^\circ$ . При этом необходимо модернизировать сегменты молотильной (бичи) и сепарирующей (винтовые планки) части ротора, расширить существующий диапазон частоты вращения ротора 250...1000 мин<sup>-1</sup>, а постоянную частоту вращения деки 8 мин<sup>-1</sup> перевести в регулируемый диапазон частот вращения как по ходу ротора, так и в его противоход. Вышеперечисленное обеспечивает увеличение пропускной способности комбайна на 1 кг/с и выше, и при этом не требует роста мощности применяемого двигателя.*

***Ключевые слова:** зерноуборочный комбайн, матрица взаимосвязей параметров, молотильный аппарат, совершенствование конструкции, пропускная способность.*

**Abstract.** Improving grain harvesters with an axial-rotor threshing and separating device requires a comprehensive study of the rotor and deck parameters that have the greatest impact on the efficiency of the threshing process. From the point of view of the impact on the threshed mass, the rotor and the deck work as a single technical system with interrelated design and technological parameters. The analysis of this technical system has allowed us to build a matrix of the relationships between its parameters. As a result, it has been established that the improvement of a high-performance axial-rotary threshing and separating device for a grain harvester requires an increase in the separation area of the deck by 30% or more. In addition, it is necessary to improve the design of the flow guides for the threshed mass and expand the existing range of adjustment of their installation angle by  $\pm 10^\circ$ . At the same time, it is necessary to modernize the segments of the threshing (beams) and separating (screw bars) parts of the rotor, expand the existing range of the rotor rotation speed from 250 to 1000 min<sup>-1</sup>, and convert the constant deck rotation speed of 8 min<sup>-1</sup> into an adjustable range of rotation speeds in both the rotors forward and reverse directions. This ensures an increase in the combine's throughput capacity by 1 kg/s or more, without requiring an increase in the engines power.

**Key words:** grain harvester, matrix of parameter interrelations, threshing apparatus, design improvement, throughput capacity.

**Введение.** Зерноуборочные комбайны с аксиально-роторным молотильно-сепарирующим устройством (АР МСУ) обладают рядом перспективных характеристик:

- повышенная пропускная способность;
- наиболее полная реализация принципа дифференцированного обмолота;
- повышенная износостойкость на уборке кукурузы;
- более совершенная, по сравнению с барабанно-дековыми комбайнами, система

управления процессом обмолота.

Данные эффекты являются результатом высокоэффективного взаимодействия аксиального ротора и активной деки.

Сравнительный анализ технической характеристики отечественных зерноуборочных комбайнов показал, что перспективными уборочными машинами являются высокопроизводительные комбайны Ростсельмаш серии TORUM, укомплектованные перспективным АР МСУ (рис. 1).

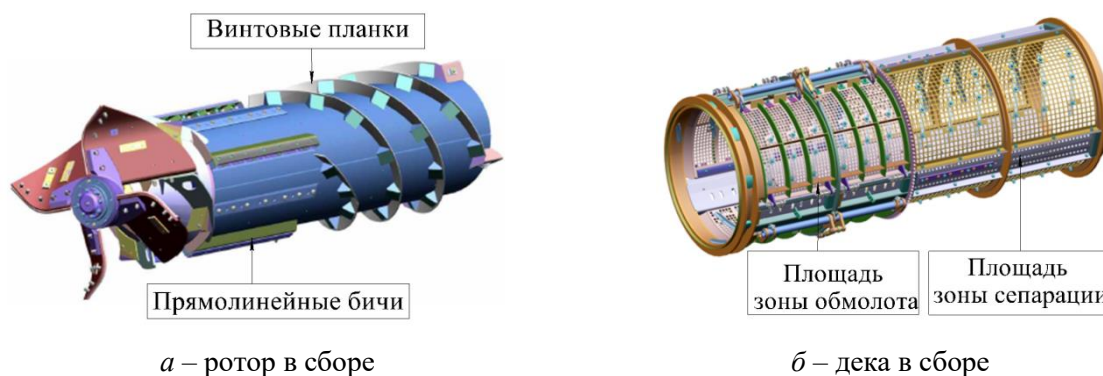


Рис. 1. Основные узлы АР МСУ комбайна Ростсельмаш серии TORUM

Для совершенствования данной серии зерноуборочных комбайнов необходимо выделить наиболее значимые совокупности параметров ротора и деки, функционально и конструктивно, влияющие на эффективность обмолота зерновых и масличных культур. Это можно сделать посредством системного метода построения матрицы взаимосвязей параметров технической системы.

#### **Анализ литературных источников.**

Ранее автором обоснована зависимость диаметра ротора от его длины, однако не указана связь данных параметров с конструктивными особенностями деки АР МСУ и частотой ее вращения [1].

В исследованиях проф. Алдошина Н.В. установлена зависимость повреждения зерна от величины зазора между ротором и декой в АР МСУ при фиксированных частотах вращения рабочих органов. При этом обоснование причин повреждений зерна сводится к упрощенной модели, учитывающей только два параметра [2].

Кроме того, в исследованиях Липовского М.И. установлены закономерности повышения эффективности АР МСУ в зависимости от замены рифленых бичей ротора на зубовые, однако нет данных как это влияет на конструкцию деки и режимы ее работы [3, 4].

Автором, предварительно на основе применения метода теории подобия размерности выявлена закономерность между диаметром ротора, его массой и общей пропускной способностью АР МСУ [5]. При этом сведений о влиянии на эти параметры особенностей конструкции деки не отмечено.

Следовательно, на современном этапе развития комбайновой техники с АР МСУ исследование взаимосвязей параметров основных узлов молотильного аппарата не находится на завершенном этапе.

Все взаимосвязи конструктивных и технологических параметров деки и ротора еще не систематизированы, а фрагментарно изложены в разных научных работах, не связанных между собой. Это не позволяет выделить наиболее значимые взаимосвязи параметров данной технической системы, определяющие общие тенденции дальнейшего развития и совершенствования конструкции комбайнов и режимов их работы.

В этой связи поставлена следующая **цель исследования:** посредством метода построения и анализа матрицы взаимосвязей параметров технической системы установить наиболее значимые совокупности параметров ротора и деки, оказывающие наибольшее влияние на уровень технического совершенства АР МСУ.

**Результаты исследования.** Изучение технической документации высокопроизводительных комбайнов Ростсельмаш серии TORUM позволило сформировать таблицу данных для построения матрицы взаимосвязей параметров АР МСУ (табл. 1).

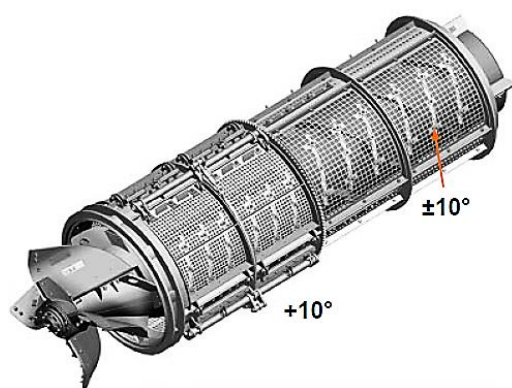
Для полноты анализа технической информации использована уточняющая визуализация (рис. 2).

Кодирование ячеек матрицы выполнено в соответствии с табл. 2. На основании табл. 1 и 2 построена матрица взаимосвязей параметров (рис. 3).

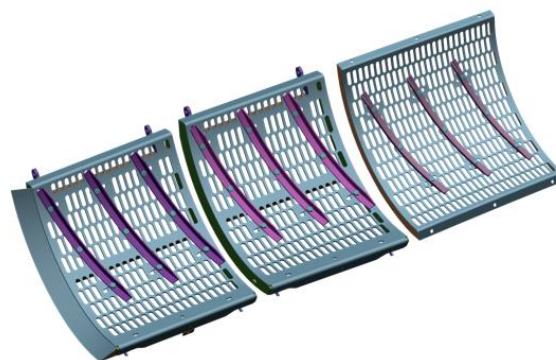
Таблица 1

**Данные для построения матрицы взаимосвязей параметров АР МСУ  
комбайнов Ростсельмаш серии TORUM [6]**

| Анализируемый параметр                                                                          | Значение параметра*                                             | Код             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------|
| Конструктивный параметр ротора                                                                  |                                                                 | Кр              |
| Диаметр ротора                                                                                  | 0,762 м                                                         | Кр <sub>1</sub> |
| Длина ротора                                                                                    | 3,20 м                                                          | Кр <sub>2</sub> |
| Тип загрузочной части                                                                           | многолопастной конус                                            | Кр <sub>3</sub> |
| Тип сегментов молотильной части                                                                 | прямолинейные бичи                                              | Кр <sub>4</sub> |
| Тип сегментов сепарирующей части                                                                | винтовые планки                                                 | Кр <sub>5</sub> |
| Количество бичей                                                                                | изменяется                                                      | Кр <sub>6</sub> |
| Привод ротора без ременной передачи                                                             | гидромеханический привод                                        | Кр <sub>7</sub> |
| Бесступенчатая регулировка частоты вращения ротора                                              | посредством планетарного редуктора                              | Кр <sub>8</sub> |
| Технологический параметр ротора                                                                 |                                                                 | Тр              |
| Диапазон частоты вращения ротора                                                                | 250...1000 8 мин <sup>-1</sup>                                  | Тр <sub>1</sub> |
| Конструктивный параметр деки                                                                    |                                                                 | Кд              |
| Диаметр деки                                                                                    | 0,865 м                                                         | Кд <sub>1</sub> |
| Длина деки                                                                                      | 2,66 м                                                          | Кд <sub>2</sub> |
| Угол обхвата ротора декой                                                                       | 360°                                                            | Кд <sub>3</sub> |
| Площадь зоны обмолота                                                                           | 2,4 м <sup>2</sup>                                              | Кд <sub>4</sub> |
| Площадь зоны сепарации                                                                          | 3,0 м <sup>2</sup>                                              | Кд <sub>5</sub> |
| Угол установки и конструкция направителей потока                                                | ±10°                                                            | Кд <sub>6</sub> |
| Тип сменных решетчатых секций молотильной части                                                 | квадратная ячейка 16X16; 25X25<br>овальная ячейка 6,6X20; 15X50 | Кд <sub>7</sub> |
| Регулировка зазора                                                                              | Механически снаружи                                             | Кд <sub>8</sub> |
| Технологический параметр деки                                                                   |                                                                 | Тд              |
| Частоты вращения деки                                                                           | 8 мин <sup>-1</sup>                                             | Тд <sub>1</sub> |
| * Справочные данные, обеспечивающие полноту анализа параметров исследуемой технической системы. |                                                                 |                 |

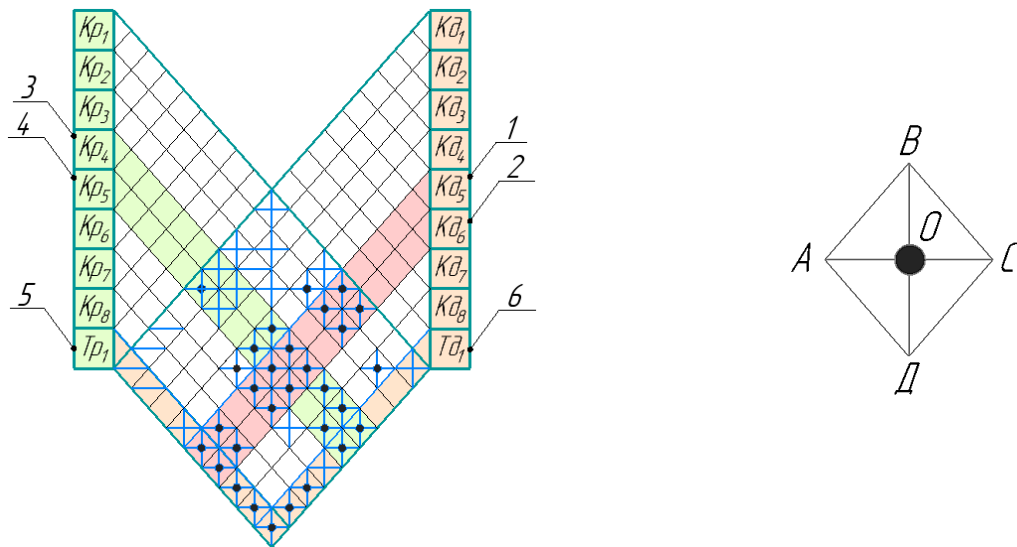


*a* – регулировка угла установки направителей потока



*б* – сменные решетчатые секции деки с направителями потока

Рис. 2. Дополнительная визуализация к выполняемому анализу



а – матрица взаимосвязей параметров АР МСУ комбайна Ростсельмаш серии TORUM

б – кодирование ячейки матрицы в соответствии с табл. 2

Рис. 3. К реализации метода построения матрицы взаимосвязей параметров технической системы

Матрица показывает, что наибольшим количеством взаимосвязей обладают следующие параметры:

- площадь зоны сепарации деки (7 полных ячеек матрицы);
- угол установки и конструкция направляющих потока (7 полных ячеек матрицы);
- тип сегментов молотильной части ротора (6 полных ячеек матрицы);
- тип сегментов сепарирующей части ротора;
- диапазон частоты вращения ротора (5 полных ячеек матрицы);
- частота вращения деки (5 полных ячеек матрицы).

Все выделенные в матрице параметры обладают наибольшим количеством взаимосвязей и представлены по мере уменьшения уровня значимости (от наиболее значимого к наименее значимому параметру). Последние два параметра являются технологическими, поэтому их развитие заключается в расширении рабочего диапазона.

В связи с этим сделано заключение, что диапазон частоты вращения ротора  $250 \dots 1000 \text{ мин}^{-1}$  должен быть расширен как в меньшую, так и в большую сторону, а постоянная частота вращения деки, составляющая  $8 \text{ мин}^{-1}$ , переведена в регулируемый диапазон частот вращения как по ходу ротора так и в его противоход. Это позволит повысить управляемость процессом обмолота в целом.

Опираясь на данные, полученные из матрицы взаимосвязей параметров АР МСУ комбайна Ростсельмаш серии TORUM целесообразно перейти к прогнозируемой пропускной способности через теорию параметрических индексов, получивших развитие в работах профессора Э.В. Жалнина [7].

Согласно источнику [1, 7-10], пропускная способность АР МСУ комбайна определяется выражением:

$$q_T = 1,83 \cdot i_k - 0,8, \quad (1)$$

где  $i_k$  – параметрический индекс комбайна с АР МСУ.

В развернутом виде выражение (1) имеет вид [7]:

$$q_T = 1,83 \cdot \left( \frac{N_e}{126} + 0,5 \cdot (F_{nc} + F_p) - 0,83 \right), \quad (2)$$

где  $N_e$  – мощность двигателя комбайна, л.с.;  $F_{nc}$  – сепарационная площадь всей деки МСУ, м<sup>2</sup>;  $F_p$  – площадь очистительных решет, м<sup>2</sup>.

Понимая, что сепарационная площадь всей деки  $F_{nc}$  состоит из площади зоны обмолота  $F_{nzo}$  и площади зоны сепарации  $F_{nzc}$ , с учетом прогноза увеличения  $F_{nzc}$  выражение (2) примет вид:

$$q_T = 1,83 \cdot \left( \frac{N_e}{126} + 0,5 \cdot ((k_m + k_c) \cdot F_{nzo} + \alpha \cdot F_{nzc} + F_p) - 0,83 \right), \quad (3)$$

где  $k_m$  – коэффициент, учитывающий модернизацию сегментов молотильной части ротора;  $k_c$  – коэффициент,

учитывающий модернизацию сегментов сепарирующей части ротора и направителей потока в деке;  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий прогнозируемый рост площади зоны сепарации (всегда больше единицы и показывает на сколько процентов возросла  $F_{nzc}$ ).

Расчет проведен при  $N_e = 400$  л.с.;  $F_{nzo} = 2,4$  м<sup>2</sup>;  $F_{nzc} = 3,0$  м<sup>2</sup>;  $F_p = 5,2$  м<sup>2</sup>;  $(k_m + k_c) = 1,1$ ;  $\alpha = 1,0 \dots 1,5$  (с шагом 0,1), соответственно. Цифровые данные для расчета взяты из источника [8]. Результаты расчета представлены на рисунке 4.

В начале расчета при  $\alpha = 1,0$ ,  $(k_m + k_c) = 1,0$ . Далее сумма коэффициентов  $k_m$  и  $k_c$  постоянна и составляет 1,1. Это характеризует гипотезу, что модернизация сегментов молотильной и сепарирующей части ротора и направителей потока в деке эквивалентна увеличению площади зоны обмолота на 10 %.

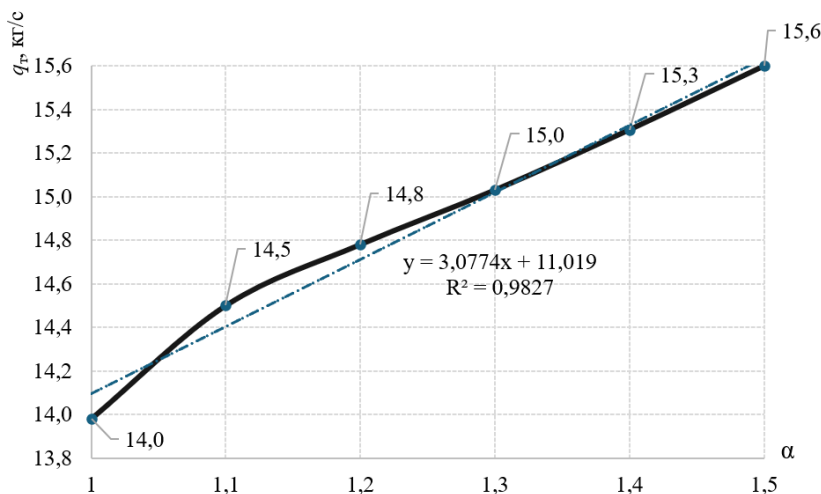


Рис. 4. Результаты расчета пропускной способности комбайна Ростсельмаш серии TORUM по модели с уточненным параметрическим индексом

Модернизация сегментов молотильной и сепарирующей частей ротора и направителей потока в деке во взаимосвязи с увеличением площади зоны сепарации ведет к линейному росту пропускной способности АР МСУ. Это показывает существенный потенциал роста пропускной

способности комбайнов Ростсельмаш серии TORUM при неизменной величине мощности применяемого в комбайне двигателя. Из вышеприведенного графика видно, что увеличение площади зоны сепарации более чем на 30% обеспечивает

рост пропускной способности комбайна на 1 кг/с и более. %

**Выводы.** 1. Повышение эффективности АР МСУ достигается увеличением площади зоны сепарации деки (минимум 3,0 м<sup>2</sup>) и совершенствованием конструкции направителей потока обмолачиваемой массы, которые должны иметь диапазон регулировки угла установки шире существующего диапазона  $\pm 10^\circ$ .

2. Конструкторскую реализацию совершенствования АР МСУ по двум вышеперечисленным параметрам необходимо вести во взаимосвязи с модернизацией сегментов молотильной (бичи) и сепарирующей (винтовые планки) части ротора.

3. Вышеприведенные технические решения по совершенствованию АР МСУ требуют расширения существующего диапазона частот вращения ротора 250...1000 мин<sup>-1</sup> и перевода постоянной частоты вращения деки 8 мин<sup>-1</sup> в регулируемый диапазон частот вращения как по ходу ротора, так и в его противоход.

4. Реализация данных технических решений позволит увеличить пропускную способность комбайнов Ростсельмаш серии TORUM без увеличения мощности двигателя. При этом прослеживается четкая зависимость увеличения площади зоны сепарации АР МСУ и его пропускной способности.

#### Список литературы

1. Бахарев Д.Н. Аналитическое обоснование размерных характеристик ротора молотильно-сепарирующего устройства для кукурузоуборочного комбайна / Д.Н. Бахарев, А.А. Добрицкий // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2023. – № 2(38). – С. 11-16. – EDN DKTOMF.
2. Алдошин Н.В. Уборка смешанных посевов аксиально-роторными зерноуборочными комбайнами / Н.В. Алдошин, М.А. Мехедов, М. Бахаа // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 55. – С. 166-173. – DOI 10.24411/2078-1318-2019-12166. – EDN XTQXVN.
3. Липовский М.И. Повышение эффективности обмолота в аксиально-роторном комбайне / М. И. Липовский // Тракторы и сельхозмашины. – 2017. – № 4. – С. 45-50. – EDN УТХОНН.
4. Липовский М.И. Энергосберегающее аксиальное молотильно-сепарирующее устройство / М.И. Липовский, Н.С. Махмудова // Инновации в сельском хозяйстве. – 2014. – № 5(10). – С. 98-101. – EDN TAQPAJ.
5. Бахарев, Д. Н. Системное обоснование ряда типоразмеров молотильно-сепарирующих устройств для селекционных зерноуборочных комбайнов аксиально-роторного типа / Д. Н. Бахарев, А.Г. Пастухов, С.Ф. Вольвак // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2025. – № 2(3). – С. 54-61. – EDN JOXWTQ.
6. Ростсельмаш. Зерноуборочные комбайны. TORUM 785. URL: <https://rostselmash.com/products/combine/torum-785/>
7. Жалнин Э.В. Расчет основных параметров зерноуборочных комбайнов с использованием принципа гармоничности их конструкции / Э.В. Жалнин. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, 2011. – 104 с. – ISBN 5-94600-002-0. – EDN UDFOGV.
8. Сравнительные испытания сельскохозяйственной техники: коллективная монография. Под общей редакцией В.М. Пронина. – М.: ФНБНУ «Росинформагротех», 2014. – 416 с.
9. Study of seed corn threshing process / D. Bakharev, A. Pastukhov, S. Volvak, S. Kovalev // Engineering for Rural Development: 19, Jelgava, 20–22 мая 2020 года. – Jelgava, 2020. – P. 1036-1041. – DOI 10.22616/ERDev.2020.19.TF243. – EDN FNGIUH.

10. Ряднов А.И. Теоретическая оценка пропускной способности рабочих органов зерноуборочного комбайна / А.И. Ряднов, С.В. Тронеv, И.П. Скворцов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2014. – № 2(34). – С. 189-194. – EDN SFFKZV.

### References

1. Bakharev D.N. Analytical substantiation of the dimensional characteristics of the rotor of the threshing and separating device for a corn harvester / D.N. Bakharev, A.A. Dobritsky // Innovations in the AIC: Problems and Prospects. – 2023. – No. 2(38). – P. 11-16. – EDN DKTOMF.

2. Aldoshin N.V. Harvesting of mixed crops with axial-rotor grain harvesters / N.V. Aldoshin, M.A. Mekhedov, M. Baha // Izvestiya of the St. Petersburg State Agrarian University. – 2019. – No. 55. – Pp. 166-173. – DOI 10.24411/2078-1318-2019-12166. – EDN XTQXVN.

3. Lipovsky M.I. Increasing the efficiency of threshing in an axial-rotor combine harvester / M.I. Lipovsky // Tractors and Agricultural Machinery. – 2017. – No. 4. – Pp. 45-50. – EDN YTXOHH.

4. Lipovsky M.I. Energy-saving axial threshing and separating device / M.I. Lipovsky, N.S. Makhmudova // Innovations in Agriculture. – 2014. – No. 5(10). – Pp. 98-101. – EDN TAQPAJ.

5. Bakharev D.N. System justification of a number of typesizes of threshing-separating devices for selective grain harvesters of the axially-rotor type

/ D.N. Bakharev, A.G. Pastukhov, S.F. Volvak // Bulletin of Lugansk State University named after Vladimir Dal. Mechanical Engineering. – 2025. – No. 2(3). – Pp. 54-61. – EDN JOXWTQ.

6. Rostselmash. Grain Harvesters. TORUM 785. URL: <https://rostselmash.com/products/combine/torumm-785/>

7. Zhalnin E.V. Calculation of the main parameters of grain harvesters using the principle of harmony in their design / E.V. Zhalnin. – Moscow: All-Russian Research Institute of Agricultural Mechanization, 2011. – 104 p. – ISBN 5-94600-002-0. – EDN UDFOGV.

8. Comparative Testing of Agricultural Machinery: A Collective Monograph. Edited by V.M. Pronin. Moscow: Rosinformagrotekh, 2014. 416 p.

9. Study of seed corn threshing process / D. Bakharev, A. Pastukhov, S. Volvak, S. Kovalev // Engineering for Rural Development: 19, Jelgava, 20–22 мая 2020 года. – Jelgava, 2020. – P. 1036-1041. – DOI 10.22616/ERDev.2020.19.TF243. – EDN FNGIUH.

10. Ryadnov A.I. Theoretical Assessment of the Capacity of the Working Bodies of a Grain Harvester / A.I. Ryadnov, S.V. Tronev, and I.P. Skvortsov // Izvestiya of the Nizhny Novgorod Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2014. – No. 2(34). – Pp. 189-194. – EDN SFFKZV.

*Статья поступила в редакцию 14.02.2026*

### Информация об авторах

**Бахареv Дмитрий Николаевич**, д-р тех. н., профессор кафедры автомобильного транспорта Луганского государственного университета имени Владимира Даля.

SPIN-код: 1175-0650, AuthorID: 925271

E-mail: baharevdn\_82@mail.ru

### Information about the authors

**Bakharev Dmitry Nikolaevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automobile Transport of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

SPIN-код: 1175-0650, AuthorID: 925271

E-mail: baharevdn\_82@mail.ru

**Пастухов Александр Геннадиевич**, д-р тех. н., профессор инженерного факультета ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет имени В. Я. Горина», г. Белгород.  
*SPIN-код: 3891-3927, AuthorID: 575599*  
**E-mail:** pastukhov\_ag@mail.ru

**Pastukhov Alexander Gennadievich** Doctor of Technical Sciences, Professor of the Faculty of Engineering of the Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin, Belgorod.  
*SPIN-код: 3891-3927, AuthorID: 575599*  
**E-mail:** pastukhov\_ag@mail.ru

**Вольвак Сергей Федорович**, к-т тех. н., профессор инженерного факультета ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет имени В. Я. Горина», г. Белгород.  
*SPIN-код: 7701-7068, AuthorID: 770984*  
**E-mail:** volvak.s@yandex.ru

**Volvak Sergey Fedorovich** Candidate of Technical Sciences, Professor of the Faculty of Engineering of the Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin, Belgorod.  
*SPIN-код: 7701-7068, AuthorID: 770984*  
**E-mail:** volvak.s@yandex.ru

---

**Для цитирования:**

Бахареv Д.Н., Пастухов А.Г., Вольвак С.Ф. Матрица взаимосвязей параметров молотильно-сепарирующего устройства аксиально-роторного зерноуборочного комбайна // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2026. – № 1(6). – С. 74-82.

**For citation:**

Bakharev D.N., Pastukhov A.G., Volvak S.F. Matrix of interconnections between the parameters of the threshing and separating device of an axial-rotor grain harvester // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering. – 2026. – № 1(6). – P. 74-82.

---

УДК: 674.06

**СОВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ  
ОТРАСЛИ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ****Стородубцева Т. Н., Гриненко В. С., Бондарев В. А.****MODERN DEVELOPMENT OF THE WOODWORKING  
INDUSTRY IN THE FORESTRY REGIONS OF RUSSIA****Storodubtseva T. N., Hrynenko V. S., Bondarev V. A.**

**Аннотация.** В данной статье представлен комплексный анализ современного состояния и ключевых тенденций развития деревообрабатывающей отрасли в лесопромышленных регионах Российской Федерации в период 2022–2025 гг. Особое внимание уделено анализу внедрения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) на базе отечественного программного обеспечения и элементной базы как фактору обеспечения технологического суверенитета. Актуальность исследования обусловлена необходимостью переосмысления стратегий развития отрасли в условиях беспрецедентного санкционного давления, разрыва традиционных логистических цепочек и переориентации экспортных потоков с европейского на азиатский рынки. Сформулированы рекомендации по совершенствованию отраслевой политики для лесопромышленных регионов.

В работе использованы статистические данные Росстата, аналитические обзоры Лесопромышленного комплекса, материалы научных периодических изданий и патентная документация. Методологическую базу составили системный анализ, сравнительно-географический метод, а также методы эконометрического моделирования.

**Ключевые слова:** деревообрабатывающая промышленность, лесопромышленный комплекс, лесопромышленные регионы, глубокая переработка древесины, цифровизация производства, лесовосстановление.

**Abstract.** The article presents a comprehensive analysis of the current state and key development trends of the woodworking industry in the timber industry regions of the Russian Federation in the period 2022–2025. Special attention is paid to the analysis of the implementation of automated process control systems based on domestic software and components as a factor in ensuring technological sovereignty. The relevance of the study is due to the need to rethink the industry's development strategies in the face of unprecedented sanctions pressure, the disruption of traditional logistics chains, and the reorientation of export flows from the European to the Asian markets. Recommendations are formulated for improving sectoral policy for timber industry regions.

The work uses statistical data from Rosstat, analytical reviews of the timber industry complex, materials from scientific periodicals, and patent documentation. The methodological basis consisted of system analysis, comparative geographical method, as well as econometric modeling methods.

**Key words:** woodworking industry, timber industry complex, timber industry regions, deep wood processing, production digitalization, reforestation.

**Введение.** Деревообрабатывающая отрасль России в 2022–2025 годах переживает тектонические изменения, сопоставимые по своей значимости с периодом индустриализации. Санкционные ограничения, эмбарго на поставки российской лесопроductии, блокировка сертификационных систем (FSC, ENplus) и отказ европейских портов принимать российские грузы сформировали беспрецедентный вызов для лесопромышленных регионов. При этом, как справедливо отмечают Медведев и соавторы в своем исследовании эффективности лесной промышленности, именно кризисные явления часто становятся катализатором перехода к глубокой переработке и диверсификации производства [1, 2].

Актуальность настоящего исследования заключается в необходимости объективной оценки текущего состояния отрасли после фазы «кризисного шока» 2022 года и начала периода адаптации в 2023–2025 гг. Лесопромышленные регионы (Архангельская, Иркутская области, Красноярский край, Республики Коми, Карелия и др.) оказались в неоднородных условиях. Одни территории смогли быстро переориентировать потоки на Восток, другие – столкнулись с обвалом градообразующих производств. Особую остроту проблеме добавляет вопрос технологического суверенитета, который в современных геополитических условиях становится фундаментальным для обеспечения национальной безопасности [3].

Проблематика исследования заключается в противоречии между сохраняющимся ресурсным потенциалом лесопромышленных регионов и

необходимостью его эффективной реализации в условиях санкционных ограничений, сжатия экспортных рынков и потребности в технологической модернизации.

**Целью данной статьи** является комплексный анализ динамики, структуры и факторов развития деревообрабатывающей отрасли в лесопромышленных регионах России в период 2022–2025 годов, а также определение перспективных направлений её трансформации на основе принципов глубокой переработки, цифровизации и кластеризации.

**Материалы и методы исследования.** Теоретической и методологической основой исследования послужили труды отечественных и зарубежных ученых в области экономики лесного комплекса, лесоведения и технологий деревообработки. В работе использованы фундаментальные положения теории отраслевых рынков и концепции устойчивого развития.

**Результаты исследования.** В результате проведенного анализа установлено, что деревообрабатывающая отрасль России демонстрирует признаки восстановления после глубокого спада 2022 года. Индекс производства по виду деятельности «Обработка древесины и производство изделий из дерева» по итогам 9 месяцев 2024 года составил 104,4 % к уровню соответствующего периода 2023 года, а по итогам всего 2024 года – 104,2 %. Это указывает на преодоление негативного тренда, когда в 2022 году падение составляло 12,5 % [4].

Однако за усредненными показателями скрывается глубокая дифференциация внутри самой отрасли. На рис. 1 представлена динамика индексов

производства по ключевым сегментам деревообработки за период 2022–2024 гг.

Анализ диаграммы показывает, что основным драйвером восстановления стало плитное производство. Производство древесно-стружечных плит (ДСтП) в 2024 году выросло на 20 % относительно 2023 года, достигнув рекордных 13,88 млн усл. м<sup>3</sup> [5, 6]. Этот феномен объясняется несколькими факторами. Во-первых, это эффект низкой базы (спад 2022 года составил 10 %). Во-вторых, и это главное, ДСтП является основным материалом для мебельной промышленности, которая активно работает на внутренний рынок и

рынок стран ЕАЭС. В-третьих, сыграла роль успешная программа импортозамещения компонентов, в частности, смол и связующих.

Производство фанеры, наиболее экспортно-ориентированного продукта (до санкций до 70 % продукции уходило на экспорт), также восстанавливается, но более медленными темпами. Рост на 5 % в 2024 году после падения на 29 % в 2022 году свидетельствует о сложной, но постепенной переориентации на рынки Китая, Египта, Турции и стран Юго-Восточной Азии [5].

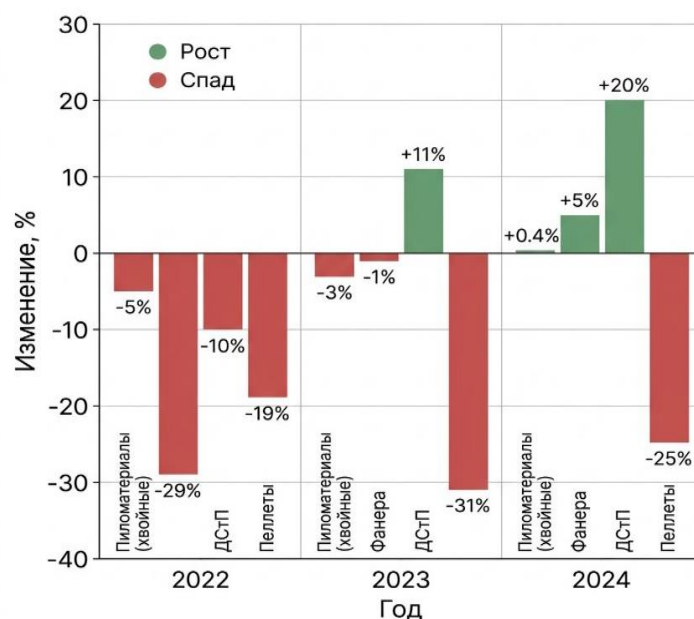


Рис. 1. Динамика индексов производства продукции деревообработки в РФ (в % к предыдущему году, 2022–2024 гг.)

Наиболее драматичная ситуация сложилась в сегменте производства топливных гранул (пеллет). Падение на 25 % в 2024 году носит обвальный характер. Природа этого кризиса связана с критической зависимостью отрасли от европейского «зеленого» курса. Европейский рынок, гарантировавший высокую маржинальность, закрылся после приостановки действия сертификатов.

Внутренний же рынок, несмотря на планы по переводу котельных на биотопливо, оказался не готов поглотить высвободившиеся объемы из-за ценовой конкуренции с сетевым газом [6].

Общероссийские показатели, как уже отмечалось, маскируют существенные региональные различия. Лесопромышленные регионы России оказались в неравных стартовых условиях

при адаптации к новым экономическим реалиям. Проведенный анализ позволяет выделить три группы регионов по характеру и динамике развития деревообрабатывающей отрасли в 2024–2025 годах.

Первая группа – регионы-лидеры с диверсифицированной структурой переработки (Вологодская область, Красноярский край, Иркутская область). Эти территории исторически обладали развитой инфраструктурой глубокой переработки и имели налаженные логистические коридоры в восточном направлении еще до санкционного кризиса. В Иркутской области, например, доля экспорта в Китай и страны АТР составляла более 60 % еще в 2021 году. В 2024 году индекс производства в обработке древесины здесь превысил среднероссийский уровень, составив 106,3 % [7].

Вторая группа – регионы с моноориентацией на европейский рынок (Республика Карелия, Ленинградская область). Последствия санкционного разрыва оказались здесь наиболее болезненными. Проблема носила не только коммерческий, но и технологический характер: оборудование на многих предприятиях было заточено под производство специфических сортментов, востребованных именно на рынке ЕС, что затруднило быструю переориентацию [8].

Третья группа – регионы, демонстрирующие парадоксальный рост в кризис (Республика Коми). По итогам 2025 года здесь зафиксирован рост производства пиломатериалов на 6,5 % (при общероссийском падении на 6,2 %), а производство пеллет выросло на 31,8% (при общероссийском падении на 25 %) [9].

Таблица 1

**Динамика производства в лесопромышленных регионах РФ в 2024–2025 гг.  
(в % к предыдущему году)**

| Регион                | Пиломатериалы | Фанера | ДСтП  | Пеллеты | Индекс обработки древесины |
|-----------------------|---------------|--------|-------|---------|----------------------------|
| Российская Федерация  | +0,4          | +5,0   | +20,0 | -25,0   | +4,2                       |
| Республика Коми       | +6,5          | -32,8  | -5,7  | +31,8   | -8,0                       |
| Иркутская область     | +4,2          | +3,1   | +15,2 | -12,4   | +6,3                       |
| Архангельская область | -2,1          | +2,4   | +8,9  | -28,7   | +1,2                       |
| Республика Карелия    | -5,8          | -12,3  | -4,1  | -35,2   | -3,5                       |

Отдельного внимания заслуживает ситуация в Алтайском крае, которая иллюстрирует проблему недоиспользования сырьевого потенциала. При значительных запасах древесины, фактическая заготовка остается низкой, а основная масса договоров купли-продажи приходится на граждан для собственных

нужд. Это классический пример несоответствия ресурсной базы и уровня ее промышленного освоения [10].

Ключевой тенденцией 2024–2025 годов стало смещение фокуса инвестиций с сырьевых проектов на проекты глубокой переработки, ориентированные преимущественно на внутренний рынок и

замещение импортной продукции. Финансовым событием, имеющим значение для всей отрасли, стало завершение крупной допэмиссии одной из ведущих лесопромышленных компаний [11].

Однако сохраняются и системные проблемы. Высокая ключевая ставка делает

заемное финансирование труднодоступным для среднего и малого бизнеса. Рост себестоимости продукции, вызванный увеличением транспортных тарифов и стоимости сырья, снижает рентабельность экспортных поставок (рис. 2).

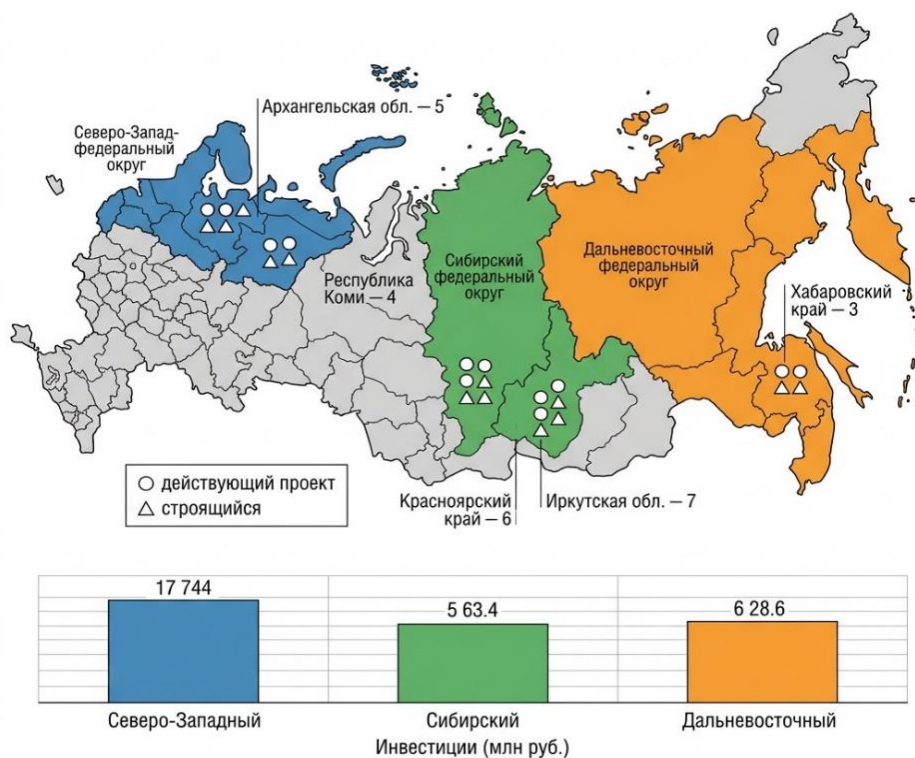


Рис. 2. География приоритетных инвестиционных проектов в лесопромышленном комплексе РФ (2025 г.)

Наиболее значимые технологические изменения в 2024–2025 годах происходят в сфере автоматизации контроля качества и управления производством. Санкции создали технологический вакуум, который начал заполняться отечественными разработками. Флагманом этого направления выступает группа «Свеза», получившая в 2025 году Евразийский патент на метод обнаружения и классификации дефектов в древесных материалах на основе нейросетей [12]. Технология позволяет в реальном времени выявлять дефекты шпона, что привело к снижению дефектности готовой продукции

на 90 % и увеличению выхода высокосортной продукции на 3 %. Природа этого технологического прорыва заключается в способности нейросетей обучаться на массивах данных и анализировать поток данных, недоступный человеку-оператору.

Не менее интересная разработка реализована студентами Удмуртского государственного университета, создавшими нейросетевую бот для расчета объема древесины по фотографии с точностью более 80 %. Такие решения способны стать основой для создания

прозрачной системы учета древесины на всем пути от деляны до склада [13].

Ключевым событием институционального характера стал запуск с 1 января 2025 года в промышленную эксплуатацию Федеральной государственной информационной системы лесного комплекса (ФГИС ЛК) [14]. Впервые в истории России все данные о лесах концентрируются в единой базе. Несмотря на сложности внедрения, сама логика цифровизации необратима: создание единого цифрового контура позволит существенно снизить долю нелегального оборота древесины и повысить прозрачность отрасли.

На корпоративном уровне цифровизация идет еще более интенсивно. Крупные холдинги внедряют системы цифровых управленческих досок и мониторинга лесопользования на базе спутниковых данных и беспилотников, что позволяет в онлайн-режиме отслеживать состояние арендованных лесных участков и производственные процессы.

Развитие деревообработки невозможно рассматривать в отрыве от вопросов воспроизводства лесных ресурсов. В 2025 году показатель отношения площади лесовосстановления к площади вырубленных и погибших насаждений впервые превысил 100% по стране. Общая площадь лесовосстановления достигла 1,3 млн га. Лидерами по объемам лесовосстановления стали Республика Саха (Якутия), Красноярский край, Иркутская и Архангельская области. В этих регионах создаются лесопитомники с улучшенным генетическим материалом, что повышает устойчивость молодых насаждений [4, 15]. Важной тенденцией становится вовлечение общественности в процессы

лесовосстановления через экологические акции.

В то же время экологические проблемы сохраняются. Значительный ущерб наносят лесные пожары, основными причинами которых остаются грозовые разряды и антропогенный фактор. Для мониторинга пожарной обстановки активно внедряются камеры видеонаблюдения и беспилотные летательные аппараты.

**Выводы.** Результаты анализа свидетельствуют о том, что деревообрабатывающая промышленность России успешно преодолела острую фазу санкционного кризиса 2022 года.

Открываются новые научные задачи, связанные с оценкой долгосрочной эффективности внедрения отечественных АСУ ТП в условиях высокой ключевой ставки и ограниченности заёмного финансирования, а также с разработкой экономико-математических моделей оптимизации логистики лесопродукции в условиях перегруженности восточного транспортного направления.

#### Список источников

1. Безрукова Т.Л., Борисов А.Н. Стратегические приоритеты развития лесопромышленного комплекса России в условиях глобальных вызовов // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 4 (52). – С. 165-182.
2. Полянин А.В., Докина О.Н. Трансформация экономики лесопромышленного комплекса России в условиях санкционных ограничений // Экономика и управление. – 2023. – Т. 29, № 5. – С. 564-575.
3. Моисеев Н.А., Кишенков Ф.В. Экономическая безопасность и технологический суверенитет лесного сектора экономики России // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2024. – Т. 28, № 2. – С. 7-18.

4. Промышленное производство в России. 2024: Статистический сборник / Росстат. – М., 2024. – 305 с.

5. Бурмистров В.Н., Кузьмина Н.Н. Анализ экспортного потенциала российской фанеры на рынках Азиатско-Тихоокеанского региона // Российский внешнеэкономический вестник. – 2025. – № 1. – С. 87-101.

6. Тамби А.А., Степанова Е.Г. Развитие рынка биотоплива в России: проблемы и перспективы // Экономика и предпринимательство. – 2024. – № 9 (170). – С. 324-331.

7. Официальная статистика / Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Иркутской области. – Иркутск, 2025.

8. Шишкин А.В., Васильев О.И. Проблемы и перспективы реиндустриализации лесопромышленного комплекса Северо-Запада России // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. – 2024. – № 3 (147). – С. 98-106.

9. В Коми выросло производство бумаги, пиломатериалов и пеллет // Торгово-промышленная палата Республики Коми. – 2026. – 24 февраля. – URL: <https://tppkomi.ru/news/v-komi-vyroslo-proizvodstvo-bumagi-pilomaterialov-i-pellet/> (дата обращения: 15.03.2026)

10. Лесной комплекс Алтайского края: состояние и перспективы развития: коллективная монография / под ред. Г.М. Гриценко. – Барнаул: Изд-во Алтайского ГАУ, 2025. – 215 с.

11. Аналитический обзор рынка ЛПК России: итоги 2024 года и перспективы 2025 / WhatWood. – М.: WhatWood, 2025. – 98 с.

12. Патент № 2025123456 Российская Федерация, МПК G06T 7/00, G01N 21/89. Способ обнаружения и классификации дефектов в листовых древесных материалах / Иванов П.С., Петров А.А.; заявитель и патентообладатель ООО «Свежа». – № 2025123456; заявл. 15.11.2024; опубл. 20.06.2025, Бюл. № 17. – 15 с.

13. Лаптев Н.В., Корепанов К.С. Применение нейросетевых технологий для автоматизации учета древесины // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2025. – № 2. – С. 45-53.

14. О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования правового регулирования лесных отношений: Федеральный закон № 456-ФЗ от 30.12.2021 (ред. от 01.01.2025) // Собрание законодательства РФ. – 2022. – № 1. – Ст. 45.

15. Лесное хозяйство России: приоритетные направления развития: сборник научных трудов / под ред. А.В. Родина. – Пушкино: ВНИИЛМ, 2025. – 320 с.

16. Медведев С.В., Иванов А.А., Петрова Н.С. Эффективность лесной промышленности в условиях санкционных ограничений // Лесной вестник. – 2023. – № 4. – С. 45-58.

## References

1. Bezrukova T.L., Borisov A.N. Strategicheskie priority razvitiya lesopromyshlennogo kompleksa Rossii v usloviyakh global'nykh vyzovov [Strategic priorities for the development of the Russian timber industry complex in the context of global challenges]. Lesotekhnicheskii zhurnal, 2023, vol. 13, no. 4 (52), pp. 165-182.

2. Polyagin A.V., Dokina O.N. Transformatsiya ekonomiki lesopromyshlennogo kompleksa Rossii v usloviyakh sanktsionnykh ogranichenii [Transformation of the economy of the Russian timber industry complex under sanctions restrictions]. Ekonomika i upravlenie, 2023, vol. 29, no. 5, pp. 564-575.

3. Moiseev N.A., Kishenkov F.V. Ekonomicheskaya bezopasnost' i tekhnologicheskii suverenitet lesnogo sektora ekonomiki Rossii [Economic security and technological sovereignty of the Russian forest sector]. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoi vestnik, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 7-18.

4. Promyshlennoe proizvodstvo v Rossii. 2024: Statisticheskii sbornik [Industrial production in Russia. 2024: Statistical collection]. Moscow, Rosstat Publ., 2024. 305 p.

5. Burmistrov V.N., Kuz'mina N.N. Analiz eksportnogo potentsiala rossiiskoi fanery na rynkakh Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona [Analysis of the export potential of Russian plywood in the markets of the Asia-Pacific region]. Rossiiskii vneshneekonomicheskii vestnik, 2025, no. 1. – pp. 87-101.

6. Tambi A.A., Stepanova E.G. Razvitie rynka biotopliva v Rossii: problemy i perspektivy [Development of the biofuel market in Russia: problems and prospects]. Ekonomika i predprinimatel'stvo, 2024, no. 9 (170), pp. 324-331.

7. Ofitsial'naya statistika [Official statistics]. Territorial'nyi organ Federal'noi sluzhby gosudarstvennoi statistiki po Irkutskoi oblasti [Territorial body of the Federal State Statistics Service for the Irkutsk region]. Irkutsk, 2025.

8. Shishkin A.V., Vasil'ev O.I. Problemy i perspektivy reindustrializatsii lesopromyshlennogo kompleksa Severo-Zapada Rossii [Problems and prospects of reindustrialization of the timber industry complex of the North-West of Russia]. Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta, 2024, no. 3 (147), pp. 98-106.

9. Production of paper, lumber and pellets increased in Komi // Chamber of Commerce and Industry of the Komi Republic. – 2026. – 24 February. – URL: <https://tppkomi.ru/news/v-komii-vyroslo-proizvodstvo-bumagi-pilomaterialov-i-pellet/> (accessed: 15.03.2026).

10. Gritsenko G.M., ed. Lesnoi kompleks Altaiskogo kraia: sostoyanie i perspektivy razvitiya: kollektivnaya monografiya [Forest complex of the Altai Territory: state and development prospects: a collective monograph].

Barnaul, Altai State Agricultural University Publ., 2025. 215 p.

11. Analiticheskii obzor rynka LPK Rossii: itogi 2024 goda i perspektivy 2025 [Analytical review of the Russian timber industry market: results of 2024 and prospects for 2025]. Moscow, WhatWood Publ., 2025. 98 p.

12. Ivanov P.S., Petrov A.A. Sposob obnaruzheniya i klassifikatsii defektov v listovykh drevesnykh materialakh [Method for detecting and classifying defects in sheet wood materials]. Patent RF, no. 2025123456, 2025.

13. Laptev N.V., Korepanov K.S. Primenenie neirosetevykh tekhnologii dlya avtomatizatsii ucheta drevesiny [Application of neural network technologies for automating timber accounting]. Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy, 2025, no. 2, pp. 45-53.

14. O vnesenii izmenenii v Lesnoi kodeks Rossiiskoi Federatsii i otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiiskoi Federatsii v chasti sovershenstvovaniya pravovogo regulirovaniya lesnykh otnoshenii [On Amendments to the Forest Code of the Russian Federation and Certain Legislative Acts of the Russian Federation Regarding the Improvement of Legal Regulation of Forest Relations]. Federal Law no. 456-FZ of 30.12.2021 (as amended on 01.01.2025). Sobranie zakonodatel'stva RF, 2022, no. 1, art. 45.

15. Rodin A.V., ed. Lesnoe khozyaistvo Rossii: prioritetye napravleniya razvitiya: sbornik nauchnykh trudov [Forestry in Russia: priority directions of development: collection of scientific papers]. Pushkino, VNIILM Publ., 2025. 320 p.

16. Medvedev S.V., Ivanov A.A., Petrova N.S. Effektivnost' lesnoi promyshlennosti v usloviyakh sanktsionnykh ogranichenii [Efficiency of the forest industry under sanctions restrictions]. Lesnoi vestnik, 2023, no. 4, pp. 45-58.

*Статья поступила в редакцию 15.12.2025*

**Информация об авторах**

**Стородубцева Тамара Никаноровна**, д-р техн. н., доцент, профессор кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4925-8542>

SPIN-код: 8634-2297, AuthorID: 443717

E-mail: tamara-tns@yandex.ru

**Гриненко Владимир Сергеевич**, студент кафедры древесиноведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова».

E-mail: blak.jake.06@gmail.com

**Бондарев Владимир Анатольевич**, аспирант кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж.

SPIN-код: 5175-7527, AuthorID: 1320754

E-mail: mr.bondarev1@bk.ru

**Information about the authors**

**Storodubtseva Tamara Nikanorovna**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov", Voronezh.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4925-8542>

SPIN-код: 8634-2297, AuthorID: 443717

E-mail: tamara-tns@yandex.ru

**Hrynenko Vladimir Serhiyovych**, student of the Department of Wood Science, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov", Voronezh.

E-mail: blak.jake.06@gmail.com

**Bondarev Vladimir Anatolyevich**, postgraduate student of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov", Voronezh.

SPIN-код: 5175-7527, AuthorID: 1320754

E-mail: mr.bondarev1@bk.ru

**Для цитирования:**

Стородубцева Т. Н., Гриненко В. С., Бондарев В. А. Современное развитие деревообрабатывающей отрасли лесопромышленных регионов России // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2026 – № 1(6). – С. 83-91.

**For citation:**

Storodubtseva T. N., Hrynenko V. S., Bondarev V. A. Modern development of the woodworking industry in the forestry regions of Russia // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering. – 2026 – № 1(6). – P. 83-91.

УДК 621.43

## ОЗОН КАК АКТИВАТОР ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА В ДВС

Сударкин В. Н.

## OZONE AS AN ACTIVATOR OF THE COMBUSTION PROCESS OF HYDROCARBON FUEL IN ICE

Sudarkin V. N.

**Аннотация.** В статье представлен комплексный анализ физико-химических свойств озона как эффективного активатора процессов горения углеводородных топлив. Рассмотрены фундаментальные механизмы воздействия  $O_3$  на кинетику окисления, включая реакции разложения с образованием атомарного кислорода и радикальных каналов инициирования цепных процессов. На основе анализа современных экспериментальных исследований было выявлено, что добавление озона приводит к увеличению ламинарной скорости пламени, расширению пределов воспламенения и снижению температуры зажигания. Особое внимание уделено концентрационным и термобарическим эффектам, а также практическим аспектам применения озоновой активации в энергетических установках. Установлено, что оптимальные концентрации озона составляют 100-1000 ppm, при которых достигается максимальный эффект при экономически приемлемых энергозатратах на генерацию.

**Ключевые слова:** озон, активация горения, кинетика окисления, ламинарная скорость пламени, период индукции, радикальные реакции, озono-воздушные смеси, энергоэффективность.

**Abstract.** This article presents a comprehensive analysis of the physicochemical properties of ozone as an effective activator of hydrocarbon fuel combustion processes. The fundamental mechanisms of  $O_3$ 's influence on oxidation kinetics are examined, including decomposition reactions with the formation of atomic oxygen and radical channels for initiating chain processes. Based on an analysis of modern experimental studies, it was found that the addition of ozone leads to an increase in laminar flame velocity, an expansion of the flammability limits, and a decrease in the ignition temperature. Particular attention is paid to concentration and thermobaric effects, as well as the practical aspects of applying ozone activation in power plants. It has been established that optimal ozone concentrations are 100-1000 ppm, at which the maximum effect is achieved with economically acceptable energy costs for generation.

**Key words:** ozone, combustion activation, oxidation kinetics, laminar flame velocity, induction period, radical reactions, ozone-air mixtures, energy efficiency.

**Введение.** Современное развитие энергетики и транспорта характеризуется противоречивыми требованиями: с одной стороны, необходимо повышение эффективности сжигания углеводородного

топлива, с другой – жесткие экологические ограничения на выбросы оксидов азота, углерода и твердых частиц [2]. Традиционные методы интенсификации горения (повышение температуры,

турбулизация потока, применение катализаторов) либо исчерпали свой потенциал, либо сопряжены с дополнительными техническими сложностями.

В этом контексте озон рассматривается как перспективный активатор процессов горения, способный существенно модифицировать кинетику окисления топлива без существенных переделок конструкций ДВС. Интерес к озону обусловлен его уникальными окислительными свойствами, возможностью эффективной генерации непосредственно на месте использования и достаточно длительным временем жизни (до 1500 минут в спокойном воздухе при комнатной температуре), позволяющим транспортировать его к реакционной зоне [2].

Целью исследования влияния озона на процесс горения топлива является систематизация и анализ современных представлений о физико-химических процессах горения углеводородного топлива в озон воздушной среде.

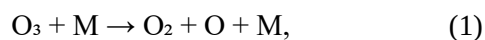
Озон является одним из сильнейших окислителей: его окислительный потенциал ( $E=+2,07$  В) значительно превосходит кислород ( $E=+1,23$  В) и даже превышает потенциал хлора ( $E=+1,36$  В). Это обуславливает способность озона вступать в реакции с широким кругом органических и неорганических соединений при относительно низких температурах.

Принципиальное отличие озона от молекулярного кислорода заключается в механизме окисления. Если для  $O_2$  характерны радикальные цепные реакции, инициируемые при высоких температурах, то озон способен непосредственно реагировать с ненасыщенными углеводородами уже при комнатной температуре по механизму озонирования с образованием первичных озондов, которые затем распадаются с генерацией радикалов [2]. Эта особенность делает озон эффективным активатором низкотемпературного окисления.

Скорость термического разложения озона существенно зависит от температуры, давления и присутствия каталитических поверхностей. Время полураспада при температуре  $24^\circ\text{C}$  (298 К) составляет около 1500 минут, однако при повышении температуры до  $226,85^\circ\text{C}$  (500 К) оно сокращается до долей секунды [1]. Эта температурная зависимость имеет двоякое значение: с одной стороны, озон может храниться и транспортироваться при комнатной температуре, с другой – в зоне горения он быстро разлагается с выделением активных частиц.

Генерация озона осуществляется посредством тихого (барьерного) или высокочастотного разряда в кислородсодержащей среде. Эффективность генерации определяется соотношением  $N_2/O_2$  в газовой смеси, удельной мощностью разряда и температурой газа [7]. Для практического применения важна возможность генерации озона непосредственно из воздуха, что исключает необходимость в дополнительных реагентах.

Основопологающим механизмом активации горения с озоном является его термическое разложение с образованием атомарного кислорода. При температурах, характерных для зоны подогрева горючей смеси (выше  $225^\circ\text{C}$ ), озон разлагается по реакции:



где  $M$  – третье тело ( $N_2$ ,  $O_2$ , топливо), необходимое для отвода избыточной энергии [2].

Образовавшийся атомарный кислород обладает высокой реакционной способностью и вступает в реакции с молекулами топлива:



Реакция (2) является ключевой, поскольку она генерирует два радикала ( $R\cdot$  и  $OH\cdot$ ) из одной активной частицы, что

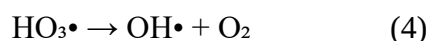
приводит к разветвлению цепи и ускорению всего процесса окисления.

Помимо прямого разложения, озон может инициировать цепные реакции через взаимодействие с углеводородами. Механизм включает следующие стадии:

1. Атака озона по двойной связи (для ненасыщенных углеводородов) или по C–H связи (для насыщенных):



2. Распад гидротриоксильного радикала:



Образующиеся гидроксильные радикалы  $\text{OH}\cdot$  являются наиболее активными частицами в процессах окисления углеводородов, их константа скорости реакции с топливом на несколько порядков превышает таковую для молекулярного кислорода.

Чувствительный анализ, выполненный в работах Кристофера Депчика с соавторами, показывает, что в присутствии озона реакционный путь окисления существенно модифицируется: реакции с участием  $\text{OH}\cdot$  – радикалов становятся доминирующими, тогда как в обычных условиях определяющую роль играют реакции с участием  $\text{HO}_2\cdot$  и  $\text{H}_2\text{O}_2$  [5].

Температура и давление существенно влияют на эффективность озоновой активации. При температурах ниже 226,85 °C (500 K), скорость разложения озона (1) невелика, однако возможно прямое озонирование топлива с образованием радикалов. В интервале 227–527 °C (500–800 K) наблюдается резкое ускорение разложения  $\text{O}_3$ , что приводит к образованию «холодного пламени» – низкотемпературной реакции окисления,

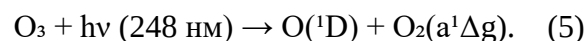
сопровождающейся свечением и выделением тепла [1].

Повышение давления оказывает двоякое влияние. С одной стороны, согласно принципу Ле-Шателье, увеличение давления смещает равновесие реакции



в сторону образования озона. С другой стороны, при высоких давлениях возрастает роль трехчастичных реакций рекомбинации радикалов, что может снижать эффективность активации. Однако для ламинарной скорости пламени наблюдается обратный эффект: при повышенном давлении вклад озона становится более значимым, поскольку диффузия водорода (ключевого переносчика цепи) теряет свою важность [1].

Отдельного внимания заслуживают фотохимические методы активации, в которых озон выступает как фотосенсибилизатор. При облучении озono-воздушной смеси ультрафиолетовым излучением с длиной волны 248,4 нм (нанометров) происходит фотодиссоциация  $\text{O}_3$  с образованием возбужденных атомов  $\text{O}(^1\text{D})$  и молекул  $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$  [4]:



Возбужденные частицы обладают избыточной энергией ( $\text{O}(^1\text{D})$  – на 1,97 эВ (электронвольт) выше основного состояния), что позволяет им вступать в реакции, недоступные для частиц в основном состоянии. Показано, что такой метод инициирования позволяет снизить температуру воспламенения смеси на

123°C – 173°C (100–150 K) при подведении энергии 0,5–1 эВ на молекулу озона [4].

Ламинарная скорость пламени является фундаментальной характеристикой горючей смеси, определяющей интенсивность тепловыделения и устойчивость горения. Многочисленные экспериментальные и численные исследования показывают, что добавление озона приводит к увеличению ламинарной скорости пламени для всех типов углеводородных топлив.

В работе Anaclerio с соавторами (2024) показано, что для бензино-воздушных смесей при температуре 327 °C (600 K) и давлении 10 бар добавление озона обеспечивает увеличение ламинарной скорости пламени на 3,4% для обедненной смеси ( $\phi = 0,6$ ) [3]. Для эталонного топлива TRF (толуол-эталонное топливо) при температуре 85 °C (358 K) и атмосферном давлении максимальное увеличение достигает 7,3% также в обедненной области [1].

Важно отметить, что эффект озона максимален в обедненных смесях. Это объясняется тем, что при недостатке топлива скорость реакции лимитируется концентрацией активных радикалов, а озон служит дополнительным источником их генерации. В стехиометрических и богатых смесях влияние озона менее выражено, поскольку концентрация радикалов достаточна для поддержания реакции [1].

Сокращение периода индукции (задержки воспламенения) является одним из наиболее значимых эффектов добавления озона. Кинетическое моделирование показывает, что даже малые добавки  $O_3$  (менее 0,5% объёмных процентов (об.)) приводят к сокращению времени индукции в 2-5 раз в зависимости от условий.

Физическая причина этого эффекта заключается в том, что озон обеспечивает альтернативный низкотемпературный путь генерации радикалов, минуя энергетически затратную стадию термического разрыва связи  $O=O$  в молекуле  $O_2$ . При температурах 227–527 °C (500-800 K), где традиционное цепное окисление протекает медленно, присутствие озона инициирует образование «холодного пламени», которое разогревает смесь до температур, достаточных для быстрого протекания основных реакций [1].

Снижение температуры воспламенения имеет важное практическое значение для двигателей с воспламенением от сжатия (HCCI, CI), где контроль момента зажигания является критической проблемой. Эксперименты на одноцилиндровом дизельном двигателе показали, что добавление 0,04 – 0,2 г/ч. (20 – 100 ppm) озона позволяет снизить температуру в камере сгорания, необходимую для воспламенения, на 30 – 50 °C [5].

Озон расширяет диапазон концентраций топлива, в котором возможно устойчивое горение. В частности, обедненный предел воспламенения (lean flammability limit) смещается в сторону меньших концентраций топлива при добавлении  $O_3$ . Это свойство особенно ценно для технологий Lean Burn (бедное сжигание), используемых для снижения  $NO_x$ .

Механизм расширения пределов связан с тем, что озон поддерживает цепные реакции даже при низкой концентрации топлива. В обычных условиях при сильном обеднении скорость генерации радикалов становится недостаточной для компенсации их гибели на стенках и в объеме, что приводит к срыву пламени. Озон,

разлагаясь с образованием активных частиц, обеспечивает минимально необходимую концентрацию радикалов для поддержания горения [2].

Влияние озона на образование загрязняющих веществ требует отдельного рассмотрения, поскольку здесь наблюдаются разнонаправленные эффекты.

В большинстве исследований отмечается умеренное увеличение концентрации оксида азота  $\text{NO}_x$  при добавлении озона. Причина - повышение температуры в зоне реакции вследствие более интенсивного тепловыделения. Однако этот эффект частично компенсируется возможностью работы на более бедных смесях, которые дают более низкие пиковые температуры [5].

Добавление озона приводит к снижению образования сажи, особенно в дизельных двигателях. Атомарный кислород, образующийся при разложении  $\text{O}_3$ , активно окисляет сажи образующие вещества (полициклические ароматические углеводороды) на ранних стадиях их формирования [5].

Данные по оксиду углерода  $\text{CO}$  противоречивы: в одних работах отмечается снижение (за счет более полного окисления), в других - увеличение. Последнее может быть связано с тем, что при низких температурах озон окисляет топливо до  $\text{CO}$ , не обеспечивая достаточной энергии для его дальнейшего превращения в  $\text{CO}_2$  [5].

Ключевой вопрос практического применения - энергетическая эффективность процесса. Генерация озона требует затрат электроэнергии (типичный удельный расход приблизительно 10-20 кВт·ч на кг  $\text{O}_3$ ), необходимо, чтобы полученный экономический эффект от активации горения превышал эти затраты.

Расчеты показывают, что для двигателей внутреннего сгорания применение озона экономически оправдано при работе на обедненных смесях, где достигается экономия топлива 5-10% за счет повышения КПД [6].

**Выводы.** 1. Озон активизирует горение преимущественно через два канала: 1) термическое разложение с образованием атомарного кислорода, инициирующего радикальные цепные реакции; 2) прямое взаимодействие с углеводородами с генерацией гидроксильных радикалов. Оба механизма обеспечивают ускорение окисления при температурах, где традиционное цепное горение протекает медленно.

2. Добавление озона приводит к увеличению ламинарной скорости пламени на 3-7% (максимум в обедненных смесях), сокращению периода индукции в 2-5 раз, снижению температуры воспламенения на 30-100 °С и расширению пределов устойчивого горения в область более бедных смесей.

3. Наиболее эффективно применение озона в двигателях, работающих на обедненных смесях (Lean Burn, HCCI), где достигается комбинация повышенного КПД и сниженных выбросов  $\text{NO}_x$ . Оптимальные концентрации составляют 0,04-1,071 г/ч. (20-500 ppm) в зависимости от типа двигателя и режима работы.

4. Перспективными областями являются: 1) разработка компактных и энергоэффективных озонаторов для бортового применения; 2) исследование совместного действия озона и других активаторов (плазма, катализаторы); 3) детальное моделирование турбулентного горения в присутствии озона; 4) изучение долговременной эксплуатационной надежности систем озоновой активации.

5. Таким образом, озон является эффективным и перспективным активатором процессов горения, способным внести существенный вклад в повышение энергоэффективности и снижение эмиссионной нагрузки энергетических установок.

#### Список литературы

1. Chemical kinetic insights and numerical analysis of gasoline combustion with ozone as an additive // *Fuel*. 2025. – Vol. 393. – P. 134950.
2. Sun W., Gao X., Wu B., Ombrello T. The effect of ozone addition on combustion: Kinetics and dynamics // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2019. – Vol. 73. – P. 1-25.
3. Anaclerio F., Camporeale S.M., Magi V., Fornarelli F. Impact of Ozone Addition to Gasoline Surrogates Combustion in Spark Ignition Engine // *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. – Vol. 1, No. 1. – P. 012101.
4. Старик А.М., Кулешов П.С., Титова Н.С. Кинетика инициирования горения водородно-воздушной смеси с примесью озона лазерным излучением ультрафиолетового диапазона // *Журнал технической физики*. – 2008. – Т. 78. – № 2. – С. 95-102.
5. Depcik C., Mangus M., Ragone C. Ozone-Assisted Combustion-Part I: Literature Review and Kinetic Study Using Detailed n-Heptane Kinetic Mechanism // *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 2014. – Vol. 136. – No. 9. – P. 091507.
6. Андреев С.А., Петрова Е.А. Экспериментальное исследование горения в озono-воздушной среде // *Международный научный журнал*. – 2014. – № 3. – С. 84-90.
7. Манкелевич Ю.А., Пороиков А.Ю., Рахимова Т.В. и др. Образование и гибель озона в озонаторах в  $N_2/O_2$ -смесьах // *Журнал*

физической химии. – 2016. – Т. 90. – № 9. – С. 1421-1427.

#### References

1. Chemical kinetic insights and numerical analysis of gasoline combustion with ozone as an additive // *Fuel*. 2025. – Vol. 393. – P. 134950.
2. Sun W., Gao X., Wu B., Ombrello T. The effect of ozone addition on combustion: Kinetics and dynamics // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2019. – Vol. 73. – P. 1-25.
3. Anaclerio F., Camporeale S.M., Magi V., Fornarelli F. Impact of Ozone Addition to Gasoline Surrogates Combustion in Spark Ignition Engine // *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. – Vol. 1, No. 1. – P. 012101.
4. Starik A.M., Kuleshov P.S., Titova N.S. Kinetics of initiation of combustion of a hydrogen-air mixture with an admixture of ozone by laser radiation in the ultraviolet range // *Journal of Technical Physics*. – 2008. – Vol. 78. – № 2. – P. 95-102.
5. Depcik C., Mangus M., Ragone C. Ozone-Assisted Combustion-Part I: Literature Review and Kinetic Study Using Detailed n-Heptane Kinetic Mechanism // *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 2014. – Vol. 136. – No. 9. – P. 091507.
6. Andreev S.A., Petrova E.A. Experimental study of combustion in an ozone-air environment // *International Scientific Journal*. – 2014. – No. 3. – P. 84-90.
7. Mankelevich Yu.A., Poroikov A.Yu., Rakhimova T.V., et al. Formation and destruction of ozone in ozonizers in  $N_2/O_2$  mixtures // *Journal of Physical Chemistry*. – 2016. – Vol. 90. – No. 9. – P. 1421-1427.

*Статья поступила в редакцию 12.12.2025*

**Информация об авторе**

**Сударкин Василий Николаевич**, к-т тех. н.,  
доцент кафедры тракторов и автомобилей  
ФГБОУ ВО «Луганский государственный  
аграрный университет имени К.Е. Ворошилова»,  
г. Луганск.

*SPIN-код: 4826-0218, AuthorID: 1176618*

**E-mail:** sudarkin.vasily@mail.ru

**Information about the author**

**Sudarkin Vasily Nikolaevich**, PhD in  
Engineering, Associate Professor, Department of  
Tractors and Automobiles, K.E. Voroshilov  
Luhansk State Agrarian University, Luhansk.

*SPIN-код: 4826-0218, AuthorID: 1176618*

**E-mail:** sudarkin.vasily@mail.ru

---

**Для цитирования:**

Сударкин В.Н. Озон как активатор процесса горения углеводородного топлива в ДВС // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. – 2026 – № 1(6). – С. 92-98.

**For citation:**

Sudarkin V. N. Ozone as an activator of the combustion process of hydrocarbon fuel in ice // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering. – 2026 – № 1 (6). – P. 92-98.

---

**ВЕСТНИК ЛУГАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ  
Машиностроение  
№ 1 (6) 2026**

|                           |                                                                    |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Главный редактор          | <i>А.Н. Киреев</i>                                                 |
| Ответственный секретарь   | <i>Д.Ю. Чижевская</i>                                              |
| Лит.редакторы, корректоры | <i>Я.В. Минина</i><br><i>Ю.В. Рудник</i><br><i>Е.А. Паталахина</i> |
| Оригинал-макет            | <i>А.Е. Гриниченко</i>                                             |
| Выпускающий редактор      | <i>Е.А. Коломиец-Кириллова</i>                                     |

---

Подписано в печать 28.05.2026.  
Формат А4. Бумага офсетная Гарнитура Times New Roman.  
Усл.-печ. л. 11,88. Тираж 22 экз. Изд. № 01595. Свободная цена.  
Дата выхода в свет 14.08.2026

---

**Издатель: ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля»**

Издательство ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля»  
**<https://izdat.daluniver.ru/>**  
**E-mail:** [izdat.lguv.dal@gmail.com](mailto:izdat.lguv.dal@gmail.com)

**Адрес издательства:** 291034, ЛНР, г.о. Луганск, г. Луганск,  
кв. Молодежный, 20,а.