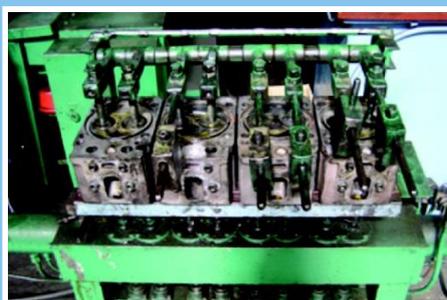


# ВНТВ

Воронежский научно-технический вестник  
3 (53) сентябрь 2025



Научно-технический  
журнал <sup>®</sup>  
Издается с 2012 года  
Выходит четыре раза в год

Учредитель - федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный лесотехнический университет  
имени Г.Ф. Морозова»

Главный редактор:  
Кадырметов А.М. д.т.н., доцент

Заместителя главного редактора:  
Дорохин С.В. д.т.н., доцент

Отв. секретарь:  
Попов Д.А. к.т.н., доцент

Редколлегия:

Смоленцев Е.В. д.т.н., профессор

(г. Воронеж, Российская Федерация)

Козлов А.М. д.т.н., профессор

(г. Липецк, Российская Федерация)

Лебедев В.А. к.т.н., профессор

(г. Ростов-на-Дону, Российская  
Федерация)

Кузовкин А.В. д.т.н., профессор

(г. Воронеж, Российская Федерация)

Болдырев А.И. д.т.н. профессор

(г. Воронеж, Российская Федерация)

Сухочев Г.А. д.т.н., профессор

(г. Воронеж, Российская Федерация)

Кириллов О.Н. д.т.н., профессор

(г. Воронеж, Российская Федерация)

Куц В.В. д.т.н., доцент

(г. Курск, Российская Федерация)

Терентьев А.В. д.т.н., доцент

(г. Санкт-Петербург, Российская  
Федерация)

Клявин В.Э. д.т.н., доцент

(г. Липецк, Российская Федерация)

Рассоха В.И. д.т.н., доцент

(г. Оренбург, Российская Федерация)

Новиков И.А. д.т.н., доцент

(г. Белгород, Российская Федерация)

Евтюков С.С. д.т.н., доцент

(г. Санкт-Петербург, Российская  
Федерация)

Агеев Е.В. д.т.н., профессор

(г. Курск, Российская Федерация)

Новиков А.Н. д.т.н., профессор

(г. Орел, Российская Федерация)

Шевцова А.Г. д.т.н., доцент.

(г. Белгород, Российская Федерация)

Никонов В.О. к.т.н., доцент

(г. Воронеж, Российская Федерация)

Лихачев Д.В. к.т.н., доцент

(г. Воронеж, Российская Федерация)

Адрес редакции:

394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева,

8, корпус, 4

Е-mail: [vestnikvglta@mail.ru](mailto:vestnikvglta@mail.ru)

Телефон: (473) 253-73-11

Сайт: <http://vestnikvglta.ru/>

Зарегистрировано в Федеральной  
службе по надзору в сфере связи,  
информационных технологий  
и массовых коммуникаций  
(Роскомнадзор).

Свидетельство:

ЭЛ № ФС 77 - 66383 от 14.07.2016

© ФГБОУ ВО ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова

## СОДЕРЖАНИЕ

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

**Вирт А. Э., Лебедева Ю. В.** Влияние геометрии инструмента и формы детали на параметры контактной зоны при пластическом деформировании поверхности роликами..... 3

**Попов А. И.** Анализ технологической возможности управления параметрами шероховатости нержавеющей стали в процессе струйной комбинированной электролитно-плазменной обработки..... 10

### ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

**Болдырев А. А., Болдырев А. И., Григораш В. В., Падурец А. А., Перова А. В.** Влияние способов электрохимического формообразования на точность копирования электрода-инструмента..... 25

**Лебедев В. А., Эль Дакдуки А. М., Бажанов В. Н.** Методы анализа и определение величины коробления колеччатых валов..... 33

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

**Волков В. С., Лебедев Е. Г.** Влияние геометрических параметров исполнительных элементов асимметричного дифференциала на распределение крутящих моментов между полуосями ведущего моста автомобиля..... 41

**Новиков И. А., Печатнова Е. В., Кирюшин И. И., Еськов А. В.** Влияние результатов дорожно-строительных работ на аварийность автомобильных дорог федерального значения..... 51

**Гудков В. В., Сокол П. А.** Сравнительный анализ процессов взаимодействия пневматических шин с барабанами испытательных стендов и горизонтальной опорной поверхностью..... 60

**Толстов С. А., Панченко С. Л., Толстова А. С.** Снижение токсичности выхлопных газов цикла ДВС при работе на газопароводяной смеси..... 82



2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ИНСТРУМЕНТА И ФОРМЫ ДЕТАЛИ НА ПАРАМЕТРЫ КОНТАКТНОЙ ЗОНЫ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ РОЛИКАМИ**

**THE EFFECT OF TOOL GEOMETRY AND PART SHAPE ON CONTACT ZONE PARAMETERS DURING PLASTIC SURFACE DEFORMATION WITH ROLLERS**

✉<sup>1</sup> **Вирт Андрей Эдуардович**, к.т.н., заведующий кафедрой «Технология машиностроения и прикладная механика», доцент, Камышинский технологический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, г. Камышин, e-mail: [virt@kti.ru](mailto:virt@kti.ru), [virt09@rambler.ru](mailto:virt09@rambler.ru)

✉<sup>1</sup> **Virt Andrey Eduardovich**, candidate of technical sciences, head of the department of «Mechanical engineering and applied mechanics», associate professor, Kamyshin technological institute (branch) of Volgograd state technical university, Kamyshin, e-mail: [virt@kti.ru](mailto:virt@kti.ru), [virt09@rambler.ru](mailto:virt09@rambler.ru)

**Лебедева Юлия Витальевна**, к.т.н., доцент, Камышинский технологический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, г. Камышин, e-mail: [LebedevaJulija1@yandex.ru](mailto:LebedevaJulija1@yandex.ru)

**Lebedeva Yulia Vitalievna**, candidate of technical sciences, associate professor, Kamyshin technological institute (branch) of the Volgograd state technical university, Kamyshin, e-mail: [LebedevaJuli-jal@yandex.ru](mailto:LebedevaJuli-jal@yandex.ru)

**Аннотация.** Рассмотрено влияние геометрических параметров деформирующих роликов и формы обрабатываемых деталей на характеристики контактной зоны в процессе поверхностного пластического деформирования (ППД). Важность данной работы заключается в оптимизации процессов ППД для повышения эффективности обработки деталей. Традиционные исследования часто не устанавливают прямую связь между усилием деформирования и геометрией инструмента и детали, что ограничивает возможности точного прогнозирования результатов обработки. В статье предлагается новаторская математическая модель, описывающая взаимосвязь между геометрией роликов и геометрией контакта для различных типов обрабатываемых поверхностей, включая валы и отверстия. Эта модель учитывает разнообразие форм и размеров роликов, а также геометрию обрабатываемой детали. Ключевая цель исследования заключается в определении количественных

**Annotation.** The influence of the geometric parameters of the deforming rollers and the shape of the workpieces on the characteristics of the contact zone during surface plastic deformation (SPD) is considered. The importance of this work lies in the optimization of SPD processes to improve the efficiency of workpiece machining. Traditional studies often do not establish a direct relationship between the deformation force and the geometry of the tool and the workpiece, which limits the ability to accurately predict the processing results. The article proposes an innovative mathematical model that describes the relationship between the geometry of the rollers and the contact geometry for various types of machined surfaces, including shafts and holes. This model takes into account a variety of shapes and sizes of rollers, as well as the geometry of the workpiece. The key objective of the study is to determine the quantitative relationships between the geometric parameters of the tool and the characteristics of the contact zone. The work analyzes the influence

взаимосвязей между геометрическими параметрами инструмента и характеристиками контактной зоны. В рамках работы анализируется влияние радиусов ролика и детали, типа обрабатываемой поверхности и глубины внедрения ролика на размеры и форму контактной зоны. С использованием разработанной математической модели выполнены численные расчеты, наглядно демонстрирующие результаты применения профильного ролика. Выявлено, что размеры контактной зоны существенно зависят от радиуса обрабатываемой детали, особенно при обработке деталей с небольшими диаметрами, что необходимо учитывать при проектировании технологических процессов. В публикации приведены графики функциональных связей, соответствующие различным формам инструмента и заготовок. Чтобы удостовериться в точности разработанной математической модели, выполнен сопоставительный анализ расчетных показателей с результатами, вычисленными согласно принципам теории упругости.

**Ключевые слова:** ПОВЕРХНОСТНОЕ ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ, ДЕФОРМИРУЮЩИЙ РОЛИК, КОНТАКТНАЯ ЗОНА, ГЕОМЕТРИЯ КОНТАКТА, ОБРАБОТКА ВАЛОВ, ОБРАБОТКА ОТВЕРСТИЙ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

of the roller and workpiece radii, the type of machined surface and the roller penetration depth on the size and shape of the contact zone. Using the developed mathematical model, numerical calculations were performed that clearly demonstrate the results of using a profile roller. It was found that the dimensions of the contact zone depend significantly on the radius of the workpiece, especially when processing parts with small diameters, which must be taken into account when designing technological processes. The publication presents graphs of functional relationships corresponding to various forms of tools and workpieces. In order to verify the accuracy of the developed mathematical model, a comparative analysis of the calculated indicators with the results calculated according to the principles of elasticity theory was performed.

**Keywords:** SURFACE PLASTIC DEFORMATION, DEFORMING ROLLER, CONTACT ZONE, CONTACT GEOMETRY, SHAFT PROCESSING, HOLE PROCESSING, MATHEMATICAL MODEL.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

## 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Многочисленные исследования поверхностного пластического деформирования (ППД) демонстрируют, что усилие деформирования является критическим фактором, определяющим качество поверхностного слоя и эффективность процесса. Хотя традиционно усилие деформирования не увязывается напрямую с габаритами и формой деформирующих роликов, более детальный анализ показывает, что при одинаковом усилии, использование роликов разной формы и размеров приводит к различным результатам обработки. Тип обрабатываемой поверхности (вал, отверстие, плоскость) и ее размеры также оказывают существенное влияние на усилие. В частности, установлено, что глубина упрочнения при заданном усилии деформирования зависит от приведенного радиуса, который является функцией радиусов ролика и детали [1].

Для анализа количественных взаимосвязей между геометрическими параметрами деформирующих роликов и характеристиками контактной зоны необходима универсальная математическая модель. Эта модель должна отражать зависимость геометрии контакта от формы и размеров роликов, принимая во внимание вид и габариты обрабатываемой поверхности.

Рис. 1 иллюстрирует процесс внедрения ролика произвольной формы в поверхность вала и отверстия при поверхностном пластическом деформировании. Экспериментальные данные и

результаты моделирования на ЭВМ подтверждают, что при обработке ППД деформирующий ролик можно рассматривать как абсолютно жесткое тело. Следовательно, в сечении АА, проходящем через область контакта ролика и детали, формируются две пересекающиеся окружности, соответствующие ролику и детали. Записав уравнения этих окружностей в плоской декартовой системе координат и решив их совместно, получаем уравнение контурной линии контактной зоны при обработке валов и отверстий роликами произвольной конфигурации и размеров [2]. Запишем изменение текущей полуширины контакта  $z_k$  по его длине  $L_k$  в виде формулы (1):

$$z_k = \sqrt{R_d^2 - \left[ \frac{(R_d \pm r_p) \cdot (R_d \mp h_p)}{R_d \pm (r_p \mp h_p)} \right]^2}, \quad (1)$$

где нижние знаки используют для обработки отверстий, а верхние – при расчете параметров для обработки валов;  $R_d$  – радиус отверстия либо вала детали, мм;  $r_p$  и  $h_p$  – известные или заданные функции изменения радиусов ролика и глубин их внедрения в разных его сечениях по длине контактной зоны  $l_k$ .

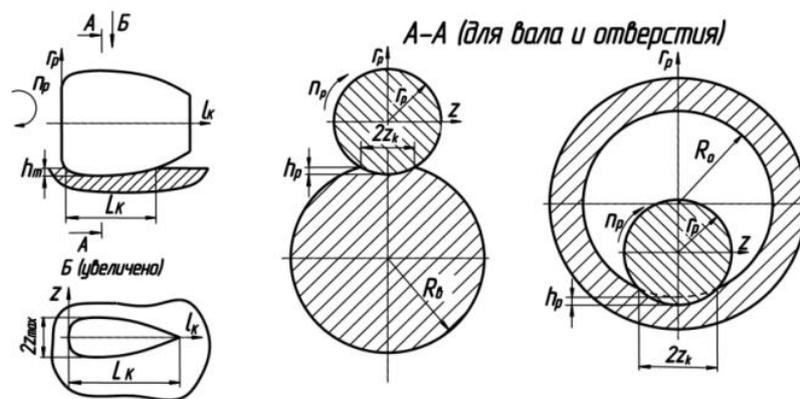


Рисунок 1 – Схема поверхностного пластического деформирования при внедрении ролика в поверхность вала и отверстия

Из формулы изменения полуширины контактной зоны можно получить выражения для вычисления объема зон контакта  $V_k$  и площади  $S_k$ :

$$S_k = \int_{-z_k}^{z_k} \sqrt{R_d^2 - \left[ \frac{(R_d \pm r_p) \cdot (R_d \mp h_p)}{R_d \pm (r_p \mp h_p)} \right]^2} \cdot dz_k, \quad (2)$$

$$V_k = \int_0^{L_k} 0,5 \cdot r_p^2 \cdot \left( 2 \cdot \arcsin \left( \frac{z_k}{r_p} \right) \right) - \sin \left( 2 \cdot \arcsin \left( \frac{z_k}{r_p} \right) \right) \cdot dl_k, \quad (3)$$

где  $L_k$  – длина контактной зоны, мм.

Объем зоны контакта является частью объема деформирующего ролика, внедрившегося в тело детали.

## 2 Материалы и методы

Для исследования влияния геометрии инструмента и формы детали на параметры контактной зоны при пластическом деформировании поверхности роликами проводились численные расчеты с использованием ЭВМ по формулам (1), (2) и (3).

Исходные данные для расчетов:  $E = 200...210$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,28...0,31$  (принимался 0,3 для ролика и детали одинаковым).

### 3 Результаты исследований

На рис. 2 изображены графики изменения полуширин контактных зон при обработке валов и отверстий тороидальным профилем ролика, где приведенный радиус ролика  $r_{пр}$  - это радиусное закругление на входном торце ролика, в данном случае тороидального.

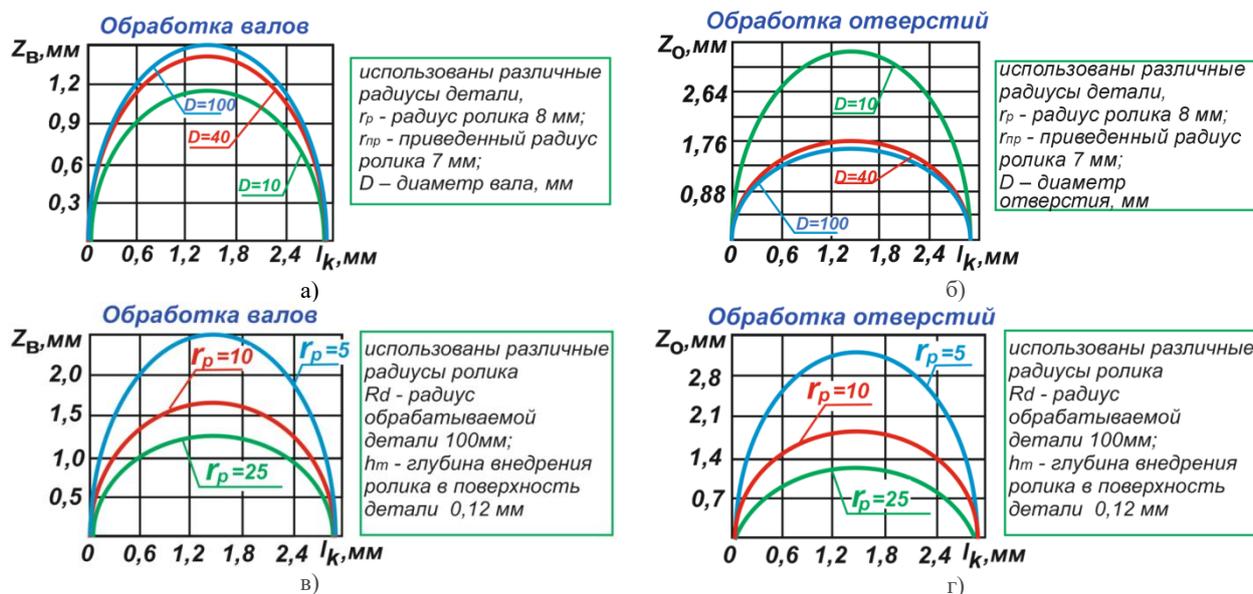


Рисунок 2 – Графики изменения текущей полуширины контакта  $z_k$  тороидального профиля ролика по длине контактной зоны  $l_k$

В частности рис. 2, а и 2, в иллюстрируют обработку валов, 2, б и 2, г – обработку отверстий. На рис. 2 форма контактных зон близка к эллиптической. Размеры контактной зоны по ширине зависят от того, обрабатывается вал или отверстие и размеров обрабатываемой поверхности.

Графики, представленные на рис. 3, демонстрируют значительную зависимость площади контактных зон  $S_k$  и объема контактных зон  $V_k$  от радиуса обрабатываемой детали при значении диаметров не более 120 мм. При обработке валов происходит увеличение ширины контакта с ростом диаметра, а при обработке отверстий ситуация обратная.

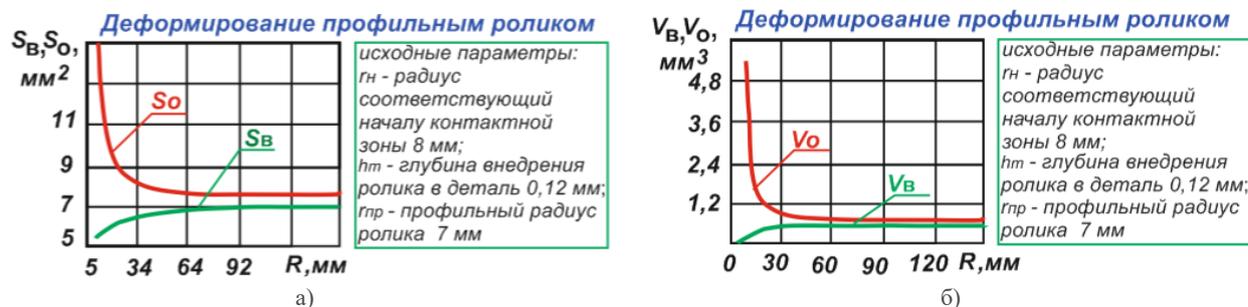


Рисунок 3 – Зависимость площади контактных зон вала  $S_B$ , отверстия  $S_O$  и объема контактных зон вала  $V_B$ , отверстия  $V_O$  от радиуса обрабатываемой детали  $R$  при деформировании профильным роликом

Из рис. 3 видно, что при деформировании профильным роликом влияние радиусов обрабатываемой поверхности проявляется изменением площади контакта (рис. 3, а) и изменением объемов контакта (рис. 3, б). Представленные графики были построены с учетом исходных параметров процесса и свойств обрабатываемого материала.

При увеличении радиусов вала и отверстия наблюдается тенденция сближения характеристик контактных зон к единым граничным величинам, аналогичным параметрам, достигаемым при обработке плоских участков. Таким образом, формулы (1), (2) и (3), предназначенные для определения геометрии контактных зон при обработке плоскостей, остаются справедливыми, если принять значительный радиус обрабатываемого изделия – порядка 500 миллиметров. Допустимое отклонение при таком предположении не превышает 0,01%.

Подобная зависимость характерна также для иных типов рабочих инструментов, включая ролики конусовидной формы.

Рис. 4 иллюстрирует расхождение между параметрами контактных зон в процессе обработки отверстия и вала одинакового размера при равной глубине внедрения ролика, что объясняется различиями в кинематике взаимодействия ролика с поверхностью.

На рис. 4 показаны радиусы роликов, внедренных в поверхность вала  $r_{pv}$  и отверстия  $r_{po}$ , а также полуширины контакта при обработке вала  $z_{bv}$  и отверстия  $z_{bo}$ .

Рассмотрим сравнение ширин контакта (по аналогии с площадями и объемами, см. формулы (2) и (3)) при решении аналогичной задачи для двух упругих цилиндрических тел. При параллельном размещении осей цилиндров соответствующие формулы иллюстрируют деформирование и примут следующий вид [3]:

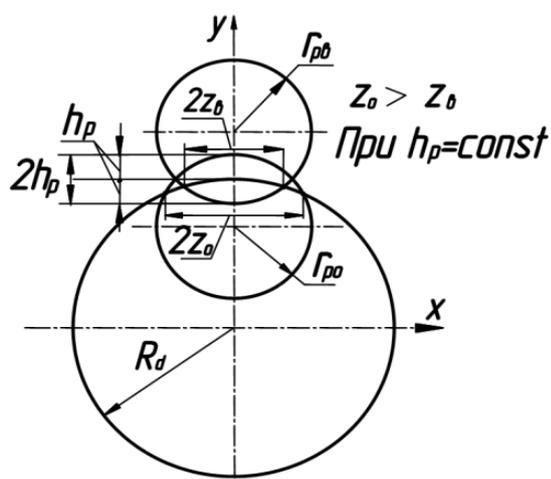


Рисунок 4 – Схема обработки отверстия и вала на равной глубине роликом

– при обработке отверстия

$$z_{oz} = 0,8 \cdot \sqrt{2 \cdot p \cdot \frac{D \cdot d_p}{D + d_p} \cdot \left( \frac{1 - \mu^2}{E} \right)}, \quad (4)$$

– при обработке вала

$$z_{ez} = 0,8 \cdot \sqrt{2 \cdot p \cdot \frac{D \cdot d_p}{D - d_p} \cdot \left( \frac{1 - \mu^2}{E} \right)}, \quad (5)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $D$  – диаметр отверстия (вала);  $d_p$  – диаметр ролика;  $E$  – модуль упругости тел, подвергающихся деформации;  $p$  – давление в максимально нагруженной точке прямоугольного контакта.

Зависимости, полученные по формулам (4) и (5), изображены на рис. 5 и 6.

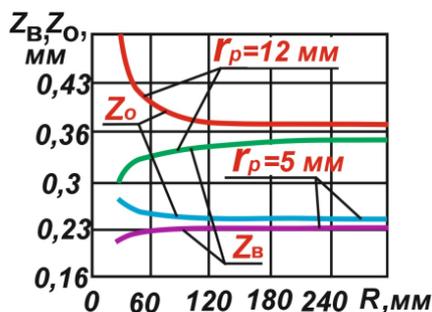


Рисунок 5 – Влияние радиусов отверстия и ролика и валов при разных значениях радиусов роликов на полуширину контакта согласно теории упругости

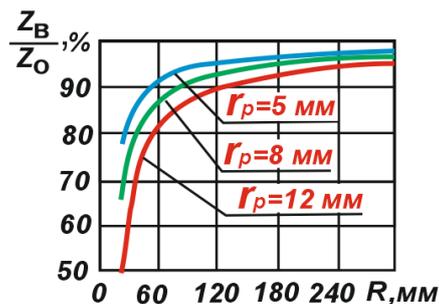


Рисунок 6 – Влияние радиусов отверстий и валов при разных значениях радиусов роликов на отношение полуширин контактов вала и отверстия согласно теории упругости

#### 4 Обсуждение и заключение

Большим количеством исследований доказано, что упругие деформации и пластические при обработке ППД не отделимы, но при этом большинство авторов при расчете остаточных напряжений не учитывают пластическую деформацию. Также не учитывались во многих технологических расчетах и размеры обрабатываемой детали и деформирующего инструмента. Только в работе [1] был введен коэффициент, учитывающий размеры ролика и детали. В дальнейшем появились и другие расчетные зависимости, и экспериментальные исследования для определения таких параметров, как глубина упрочнения и остаточные напряжения [4], [5], [6] и [7]. В работе [8] произведена попытка экспериментально проверить достоверность расчетных зависимостей для определения глубины упрочнения поверхностного слоя. Одно из решений определения остаточных напряжений приведено в работе [3], где также важным критерием является геометрия инструмента. Анализ всех расчетных зависимостей показал, что величина контактной зоны (ширина и длина контактной зоны), ее геометрия, форма, глубина оказывают влияние на итоговый результат качественных и количественных параметров, получаемый при обработке. К этим параметрам помимо оговоренных остаточных напряжений и глубины упрочнения относится и шероховатость обработанной поверхности, и возможный наклеп, и другие показатели.

Полученные в данной статье расчетные зависимости необходимо использовать для определения требуемых технологических факторов, обеспечивающих заданное качество при высокой производительности.

На этапе определения режимов обработки при обкатывании роликами на ряду с подачей, скоростью обработки, усилием деформирования обязательно необходимо учитывать и геометрию инструмента, а также особенность размеров и формы контактной зоны.

#### Список литературы

- 1 Кудрявцев, И. В. Влияние кривизны поверхностей на глубину пластической деформации при упрочнении деталей поверхностным наклепом / И. В. Кудрявцев, Г. Е. Петушков // Вестник машиностроения. – 1966. – № 7. – С. 41–43.
- 2 Отений, Я. Н. Технологическое обеспечение качества поверхности и производительности обработки ППД роликами: автореф. дисс. канд. техн. наук / Отений Я. Н. – Курган, 1988. – 24 с.
- 3 Отений Я.Н. Технологическое обеспечение качества поверхности и производительности обработки ППД роликами: автореф. дисс. докт. техн. наук Ростов на Дону, 2007, 1988. – 24 с.
- 4 Справочник машиностроителя: в 6 т. / под ред. С. В. Серенсена. – 3-е изд. – Москва: Машгиз, 1962. – Т. 3. – 651 с.
- 5 Блюменштейн В.Ю Митрофанова К.С Уточненная конечно-элементная модель процесса отделочно-упрочняющей обработки сложнопрофильным инструментом. // Сборник: Инновации в технологиях и образовании. Сборник статей участников XIII Международной научно-практической конференции. Белово, 2020. – С. 214-219.

6 Зайдес С.А., Колесник А.В. Оценка напряженно-деформированного состояния при упрочнении цилиндрических деталей роликом с асимметричным профилем. // Научные технологии в машиностроении. 2019. – № 9 (99). – С. 18-25.

7 Зайдес С.А., Хо Минь Куан, Май Дык Нгиа. Влияние радиуса сектора деформирующего инструмента на напряженно-деформированное состояние в зоне контакта с цилиндрической поверхностью // Политехнический журнал. 2021. – Т. 25. – № 6 (161). – С. 697-707.

8 Вирт А.Э. Влияние силы деформирования при поверхностном пластическом деформировании на глубину упрочнения поверхностного слоя детали // Научные технологии в машиностроении. – 2021. – №1 (115). – С 44-48.

#### References

1 Kudryavtsev, I. V. Effect of surface curvature on the depth of plastic deformation during hardening of parts by surface hardening / I. V. Kudryavtsev, G. E. Petushkov // Bulletin of mechanical engineering. - 1966. - No. 7. - P. 41-43.

2 Oteny, Ya. N. Technological support of surface quality and productivity of PPD processing with rollers: author's abstract. diss. candidate of technical sciences / Oteny Ya. N. - Kurgan, 1988. - 24 p.

3 Oteny Ya. N. Technological support of surface quality and productivity of PPD processing with rollers: author's abstract. diss. doctor of technical sciences Rostov-on-Don, 2007, 1988. - 24 p.

4 Handbook of mechanical engineer: in 6 volumes / ed. S. V. Serensen. - 3rd ed. - Moscow: Mashgiz, 1962. - Vol. 3. - 651 p.

5 Blumenstein V. Yu. Mitrofanova K. S. Refined finite element model of the process of finishing and hardening treatment with a complex profile tool. // Collection: Innovations in technology and education. Collection of articles by participants of the XIII International scientific and practical conference. Belovo, 2020. - Pp. 214-219.

6 Zaides S. A., Kolesnik A. V. Assessment of the stress-strain state during hardening of cylindrical parts with a roller with an asymmetric profile. // High-tech in mechanical engineering. 2019. - No. 9 (99). - Pp. 18-25.

7 Zaides S. A., Ho Minh Quan, Mai Duc Nghia. Influence of the radius of the sector of the deforming tool on the stress-strain state in the contact zone with a cylindrical surface // Polytechnic Journal. 2021. - Vol. 25. - No. 6 (161). - P. 697-707.

8 Virt A.E. Influence of the deformation force during surface plastic deformation on the hardening depth of the surface layer of a part // Science-intensive technologies in mechanical engineering. - 2021. - No. 1 (115). - P. 44-48.

© Вирт А. Э., Лебедева Ю. В., 2025



2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки;

2.5.6 – технология машиностроения

**АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ШЕРОХОВАТОСТИ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ СТРУЙНОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ**

**ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL POSSIBILITY OF MANAGING THE ROUGHNESS PARAMETERS OF STAINLESS STEELS IN THE PROCESS OF JET COMBINED ELECTROLYTIC-PLASMA TREATMENT**

**Попов Александр Иннокентьевич**, к.т.н., доцент Высшей школы машиностроения, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, e-mail: [popov\\_ai@spbstu.ru](mailto:popov_ai@spbstu.ru)

**Popov Alexander Innokentievich**, candidate of technical sciences, associate professor of the Higher school of mechanical engineering, Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, e-mail: [popov\\_ai@spbstu.ru](mailto:popov_ai@spbstu.ru)

**Аннотация.** В данной статье рассмотрена технологическая возможность управления параметрами шероховатости поверхности в широком диапазоне значений, от обработки поверхностей, выполненных на заготовительных операциях до финишной обработки на наноуровне. В исследованиях использовались образцы из сталей 20X13, 08X18N9T, AISI 304, AISI 310, материалы полученные SLM технологией, сталь AISI 316L, никелевые жаропрочные сплавы ЭП648, Инконель 718. Показано, что технологически обработка предполагает последовательное выполнение комбинированной обработки фокусированной струей электролитной плазмы с последующей финишной обработкой фокусированной плазмой разряда подобного тлеющему. Показано, что предварительная обработка позволяет снизить параметр шероховатости с Ra 80 мкм до Ra 0,2 мкм для разных нержавеющей сталей и сплавов, полученных технологией SLM, а финишная обработка позволяет снизить параметр шероховатости с Ra 0,2 до Ra 0,004 мкм, как например для нержавеющей стали 08X18N9T. Атомно-силовая микроскопия показывает, что поверхность образцов из нержавеющей стали после струйной электролитно-

**Annotation.** This article discusses the technological possibility of controlling surface roughness parameters in a wide range of values, from processing surfaces made in the preparation operations to finishing at the nanoscale. The studies used samples made of 20Kh13, 08Kh18N9T, AISI 304, AISI 310, materials obtained by SLM technology, AISI 316L steel, and nickel-based heat-resistant alloys such as EP648 and Inconel 718. It was shown that the processing involves a sequential combination of focused electrolyte plasma jet processing followed by focused glow discharge plasma finishing. It has been shown that pre-treatment can reduce the roughness parameter from Ra 80  $\mu\text{m}$  to Ra 0.2  $\mu\text{m}$  for various stainless steels and alloys produced by SLM technology, while finishing can reduce the roughness parameter from Ra 0.2 to Ra 0.004  $\mu\text{m}$ , as is the case for 08X18N9T stainless steel. Atomic force microscopy shows that the surface of stainless-steel samples after jet electrolyte-plasma treatment has an average surface height of Sa 11.713 nm at 2499.515  $\mu\text{m}^2$ . The results of these studies can be used for surface treatment of stainless steels and alloys in medicine and other fields.

плазменной обработки имеет среднеарифметическую высоту поверхности Sa 11,713 нм на 2499,515 мкм<sup>2</sup>. Результаты данных исследований могут быть использованы для обработки поверхности нержавеющей сталей и сплавов в медицине и других областях.

**Ключевые слова:** АНОД, ЭЛЕКТРОЛИТ, СТРУЯ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД, ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ, МЕДИЦИНСКАЯ ТЕХНИКА. **Keywords:** ANOD, ELECTROLYTE, JET, ELECTRIC DISCHARGE, PARAMETERS OF ROUGHNESS, MEDICAL TECHNOLOGY.

### 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Обеспечение технологической безопасности России во многом зависит от внедрения новых решений, их апробации и, что важно, от разработки технических идей. Университеты играют значительную роль в генерации таких идей [1-4]. Одной из них актуальной на сегодня является идея, связанная с задачей управления параметрами шероховатости поверхности. Она особенно важна при производстве медицинской техники. Прежде всего, это связано с возможностью получения антибактериальных поверхностей, внедрением новых материалов [5-8]. Между тем, получение поверхности с низким параметром шероховатости Ra представляет собой определенную трудность. Это связано с применяемыми технологическими методами для снижения шероховатости. Среди них можно выделить механические, химические, электрохимические, электроэрозионные, электролитно-плазменные методы обработки поверхности. Механическое полирование позволяет получить параметр шероховатости Ra 0,05-0,4 мкм. Однако высокая трудоемкость ограничивает применение данного метода [9]. Химическим полированием с использованием сильных кислот можно получить минимальный параметр шероховатости Ra 0,8-0,2 мкм, при этом необходимо отметить отрицательное влияние процесса на здоровье обслуживающего персонала [10]. Электрохимический метод обработки в значительной мере снижает отрицательные факторы и позволяет снизить минимальный параметр шероховатости до  $Ra \leq 0,01$  мкм [10, 11]. Метод электроэрозионной обработки позволяет получить чрезвычайно низкий параметр шероховатости Ra 0,002-0,32 мкм [12]. Однако данная технология имеет ограничения по конфигурации и размеру обрабатываемых изделий. Авторы работ [13-17] показывают возможность достижения минимального параметра шероховатости для нержавеющей сталей и титановых сплавов при электролитно-плазменной обработке в электролитической ванне в диапазоне Ra 0,060-0,004 мкм. Конкурирующим способом обработки в электролитической ванне является струйная электролитно-плазменная обработка. В наших работах показана возможность достижения электролитно-плазменной обработкой минимального параметра шероховатости поверхности в диапазоне Ra 0,034-0,020 мкм [18, 19]. Зарубежные авторы показывают достижение среднеарифметической высотной величины шероховатости поверхности Sa 29 нм для обработки в электролитической ванне и Sa 80 нм для струйной обработки [20, 21]. Обработка струей электролита имеет преимущества перед обработкой в электролитической ванне за счет более высокой скорости достижения заданного параметра шероховатости при достижении более высокой точности обработки и более низкой шероховатости поверхности [18, 19]. Однако до сих пор остается неясным вопрос о том, в каком диапазоне можно управлять параметрами шероховатости поверхности струйной обработкой и получать результаты, сопоставимые с обработкой в электролитической ванне.

Целью работы является анализ технологической возможности управления параметрами шероховатости нержавеющей сталей в процессе струйной комбинированной электролитно-плазменной обработки.

Задачами работы являются проведение оптической, электронной, атомно-силовой микроскопии, анализ морфологии поверхности и параметров шероховатости, динамика изменения параметра шероховатости Ra после струйной электролитно-плазменной обработки.

## 2 Материалы и методы

При проведении научных исследований была использована экспериментальная установка для струйной комбинированной электролитно-плазменной обработки. Установка имеет патент № 2623555 (правообладатель СПбПУ) [22]. Сущность комбинированной обработки заключается в последовательном технологическом подходе, заключающемся в предварительной обработке поверхности образцов электролитической струей, а затем финишном снятии микрообъемов материала для получения поверхности с низким параметром шероховатости поверхности Ra.

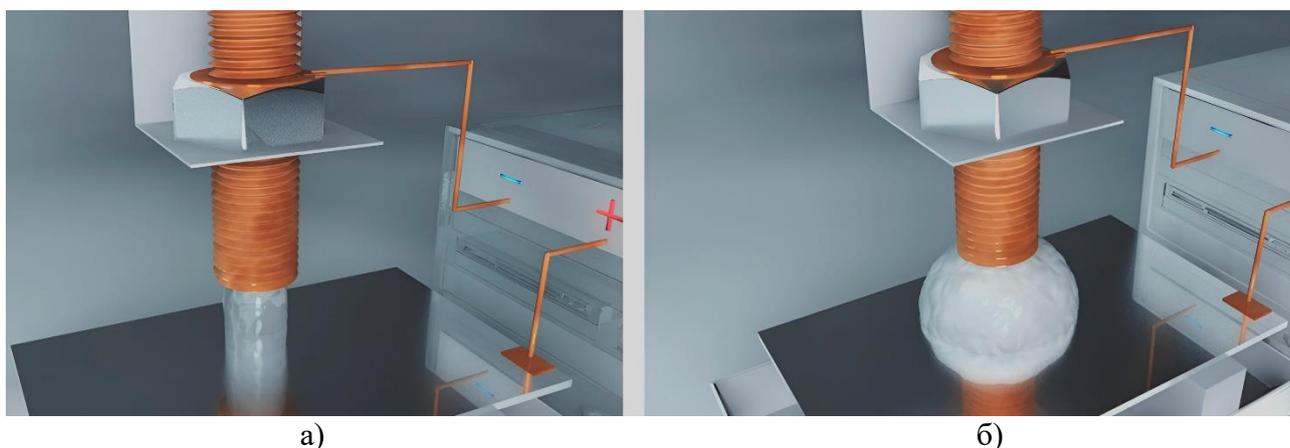


Рисунок 1 – Принципиальные схемы струйной комбинированной электролитно-плазменной обработки струей электролита (а) и струйным объемным разрядом (б)

В исследованиях комбинированной обработке подвергались образцы из нержавеющей сталей 20X13, 08X18H9T, AISI 304, AISI 310, а также материалов из AISI 316L, ЭП648, Инконель 718, полученных технологией лазерного сплавления SLM. Образцы сталей были нарезаны лазером и механическими ножницами с размерами 30x30x1,5 мм, 50x50x1 мм. Образцы сплавов были напечатаны на 3D-принтере с размерами 30x20x2 мм. В качестве электролитов использовались растворы солей  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ .

В исследованиях использовался диапазон режимов для струйной комбинированной электролитно-плазменной обработки (табл. 1).

Таблица 1 – Исходные данные эксперимента

Параметр	Электрохимический режим	Электролитно-плазменный режим
Концентрация, г/л	20-40	20-40
Время обработки, с	660	2200
Напряжение, В	20-130	200-380
Ток разряда, А	1-5	0.01-0.5
Минутная подача, мм/мин	180-500	20-100
Объемный расход электролита, л/ч	10-90	2-10

Измерение параметров шероховатости поверхности проводили с использованием прибора измерения шероховатости профилометра MarSurf M 400 (Германия), профилометра MarSurf PS10 (Германия) со стандартным щупом РНТ6-350, координатно-измерительной машины (КИМ) Mitutoyo модели Crysta-Apex S574 серии 191 (Япония) с измерительным датчиком SurfTest SJ-310.

Оценку морфологии поверхности проводили с использованием металлографического микроскопа METAM LB 31 (ЛОМО, Россия), съемкой с окуляра мобильным устройством Redmi, растровых электронных микроскопов SUPRA 55VP-25-78 (Германия), и Fei Inspect F50 (США), а также атомно-силового микроскопа модели Ntegra Aura (Россия) с виброизоляцией. Измерения на атомно-силовом микроскопе проводились полуконтактным методом по двум осям. Паспортный уровень шумов атомно-силового микроскопа по осям  $< 0,1$  нм [23, 24].

### 3 Результаты исследований

#### 3.1 Исследование поверхности сталей и сплавов методами оптической и растровой электронной микроскопии

##### 3.1.1 Исследование поверхности сплавов, полученных технологией SLM методами оптической микроскопии

Воздействие струи электролитной плазмы на поверхность образцов сталей и сплавов, полученных технологией SLM и исследование процесса изменения морфологии поверхности методами оптической микроскопии нами подробно изложено в предыдущих работах [18, 19, 25]. Важным критерием, определяющим достижение конечного минимального параметра шероховатости поверхности, является подготовка поверхности и переход граничных условий нанометрового диапазона параметра шероховатости  $R_a$ , соответствующих величинам  $0,1-0,2$  мкм. Этому же диапазону соответствует и предельное достижение на сегодня параметра шероховатости  $R_a$  при выравнивании поверхности никелевых жаропрочных сплавов ЭП648, Инконель 718 и стали AISI 316L (рис. 2.). Это связано, прежде всего, с наличием многочисленных дефектов поверхности и объема, сформированных в процессе сплавления частиц металла и последующего гидростатического прессования образцов после технологии SLM.

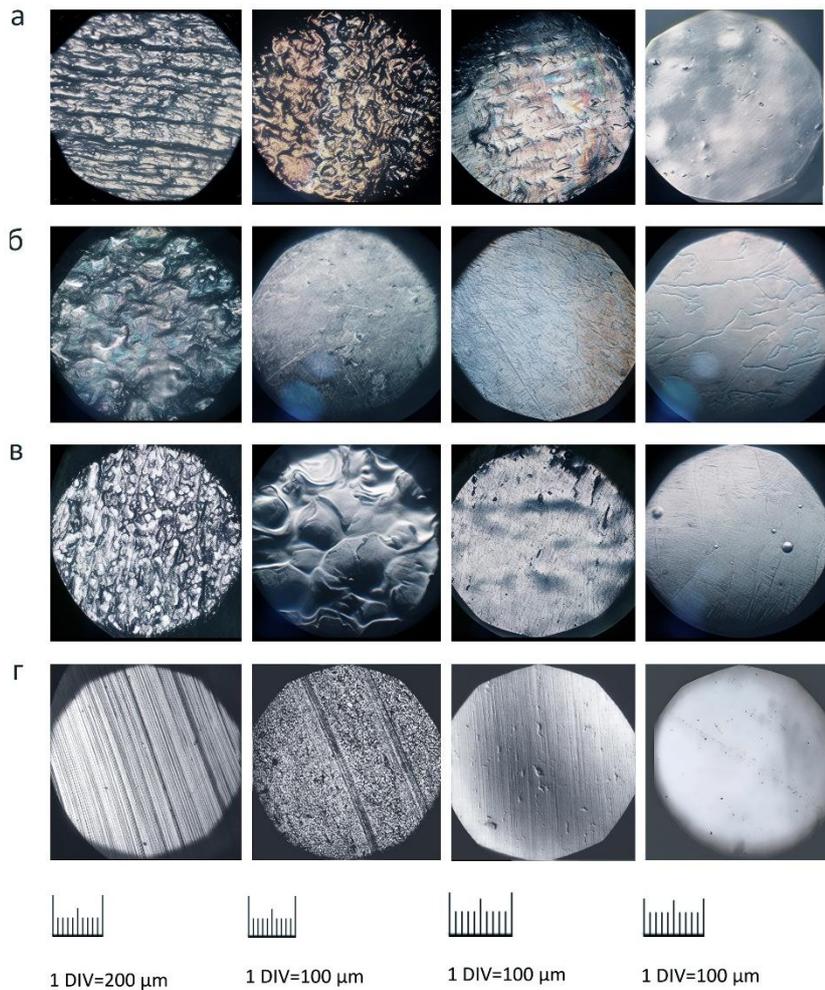
##### 3.1.2 Исследование исходной поверхности из стали 08X18H9T при малом начальном параметре $R_a$ 0,4 мкм

Анализ морфологии поверхности без струйной фокусированной обработки показывает, что на поверхности имеются риски, не совпадающие с направлением неровностей шероховатости толщиной от  $0,5-10$  мкм (рис 3, а, б). Исходная поверхность имеет следы дефектов металлургического характера: поры, лунки с острыми краями по границам зерен (рис 3, а, б). При увеличении разрешения на снимке выявляются зерна металла разных размеров от  $1$  до  $10$  мкм (рис 3, б, в). Наблюдается четкое формирование границ зерен, как более легко удаляемой фазы металла (рис 3, б, в). Ширина границ зерен составляет величину от  $0,1$  до  $0,4$  мкм (рис 3, б, в).

##### 3.1.3 Исследование поверхности стали 08X18H9T при малом начальном параметре $R_a$ 0,4 мкм после струйной электролитно-плазменной обработки

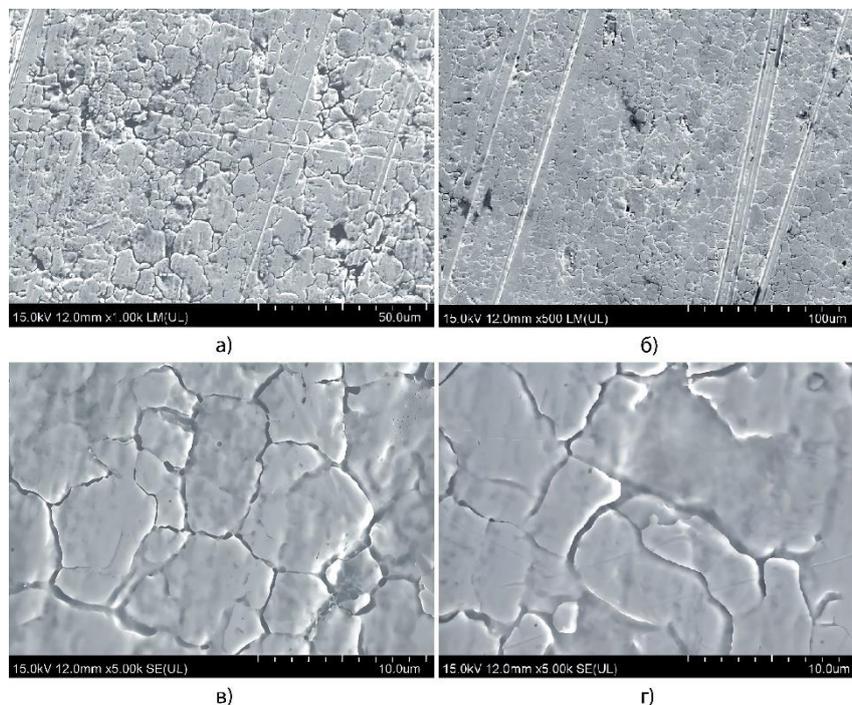
Анализ морфологии поверхности, полученной после струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки, показывает, что поверхность имеет ровный гладкий вид с отдельными дефектами в виде несплошностей (углублений) неправильной формы металлургического происхождения, полученных при прокатке листового материала (рис. 4, а).

Размеры дефектов составляют  $\varnothing 0,1-0,3$  мм (рис. 4, а). Увеличение разрешения поверхности показывает, что поверхность в нескольких местах пересекается рисками случайного происхождения (рис. 4, б). На поверхности наблюдаются многочисленные места выхода дислокаций и границы кристаллитов (рис. 4, б).

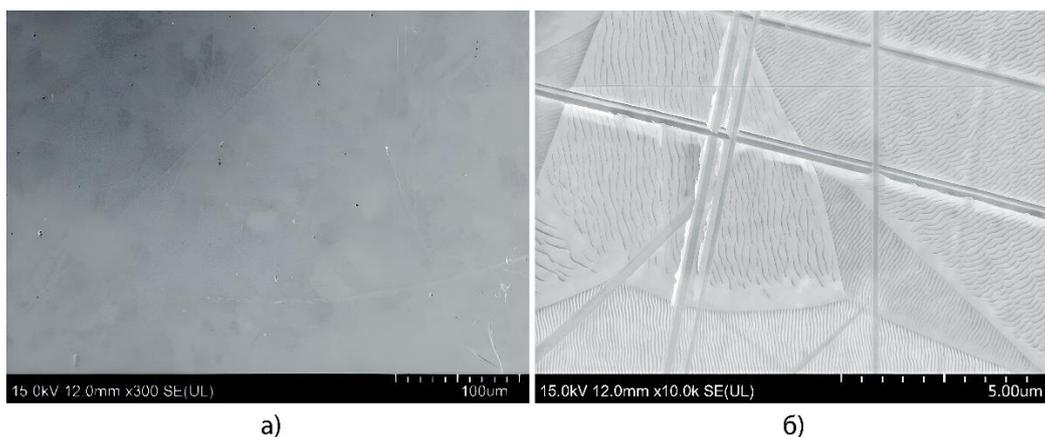


а) Инконель718 (SLM);  
 б) ЭП 648 (SLM);  
 в) AISI 316L (SLM);  
 г) 08X18H9Т (прокатка)

Рисунок 2 – Динамика изменения морфологии поверхности материалов (металлографический микроскоп МЕТАМ ЛВ 31)



а) поле 150×250 мкм; б) поле 75×125 мкм; в) поле 25×15 мкм; г) поле 25×15 мкм  
 Рисунок 3 – Исходная морфология поверхности образца из стали 08X18H9Т, полученного прокаткой (РЭМ Fei Inspect F50)



а) поле 350x250 мкм; б) поле 12,5x7,5 мкм

Рисунок 4 – Морфология поверхности образца из стали 08X18H9T, полученного прокаткой после струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки поверхности (РЭМ Fei Inspect F50)

### 3.2 Результаты измерений параметров шероховатости

#### 3.2.1 Исследование поверхности после струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки при исходном параметре шероховатости $R_a$ 0,4 мкм

Измерение высоты микронеровностей поверхности профилометром SurfTest SJ-310 показывает высоту средней линии, равную 0,005 мкм на базовой длине 0,8 мм при наибольшей высоте неровностей профиля  $R_{max}$ , находящейся в диапазоне значений от -0,062 до 0,072 мкм (рис. 5).

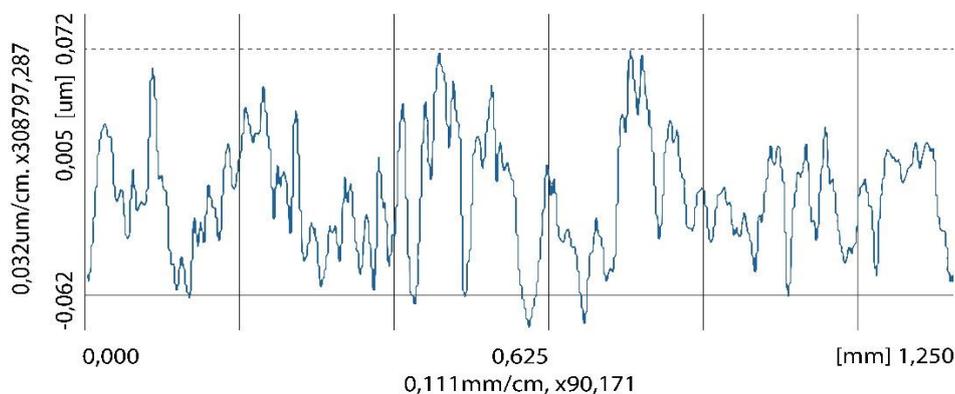
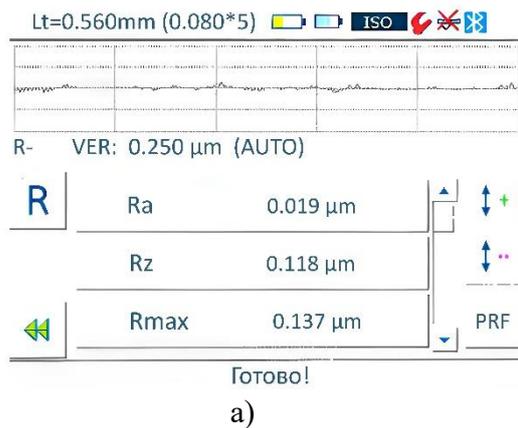


Рисунок 5 – Профилограмма поверхности образца, полученная на координатно-измерительной машине (КИМ) Mitutoyo модели Crysta-Apex S574 серии 191 с измерительным датчиком SurfTest SJ-310

Анализ воздействия струйной фокусированной электролитной плазмы на поверхность образца из стали 08X18H9T, полученного методом прокатки, показывает, что при исходной шероховатости  $R_a$  0,4 мкм после струйной электролитно-плазменной обработки достигается параметр шероховатости  $R_a$  0,019 мкм при длине трассы ошупывания  $L_t = 0,560$  мм [26]. Результаты измерения представлены на рис. 6.

В результате исследований, выполненных на атомно-силовом микроскопе модели Ntegra Aura по оценке 3D-параметров поверхности при объеме выборки 65536 As и площади выборки 2499,515 мкм<sup>2</sup> нами получены следующие данные, приведенные в табл. 2.

Важным параметром при этом является то, что средняя арифметическая высота поверхности, полученная на площади выборки 2499,515 мкм<sup>2</sup> составила величину 11,713 нм. Измеренные параметры шероховатости для числа выборки 255,1 и длине выборки 49,799 мкм приведены в табл. 3.



а)

б)

Рисунок 6 – Результат измерения образца нержавеющей стали 08X18H9Т прибором измерения шероховатости профилометре MarSurf M 400

Таблица 2 – Результаты оценки 3D параметров поверхности [27]

Обозначение параметра	Наименование параметра	Среднее значение ординаты	Размерность
<i>Параметры высоты</i>			
$S_q$	Среднеквадратичная высота поверхности	14,471	нм
$S_a$	Средняя арифметическая высота поверхности	11,713	нм
$S_{sk}$	Экссесс распределения высоты	2,839	
$S_{sk}$	Неравномерность распределения по высоте	-0,181	
$S_z$	Максимальная высота поверхности	156,959	нм
$S_{10z}$	Высота десяти точек	118,353	нм
$S_p$	Максимальная высота пика	134,639	нм
$S_v$	Максимальная глубина впадины	22,319	нм
<i>Пространственные параметры</i>			
$S_{ds}$	Плотность вершин поверхности	2,112	1/мкм <sup>2</sup>
$S_{sc}$	Средняя кривизна вершин	0,309	1/мкм
$S_{sd}$	Направление текстуры поверхности	-59,062	град
$S_{sdi}$	Индекс направления текстуры поверхности	0,664	
$S_{rv}$	Радиальная длина волны	50,191	мкм
$S_{rwi}$	Радиальная длина волны	0,0286	
<i>Гибридные параметры</i>			
$S_{dq}$	Среднеквадратичный уклон поверхности	0,0422	
$S_{daqb}$	Среднеквадратичный уклон площади	0,0287	
$S_{zA}$	Проектируемая площадь	2499,515	
$S_{zA}$	Площадь поверхности	2501,739	
$S_{dr}$	Коэффициент площади поверхности	0,0889	%
<i>Стандартная статистика. Параметры стандартной статистики</i>			
	Объем выборки	65536	
	Площадь выборки	2499,515	мкм <sup>2</sup>
	Среднее значение	38,298	нм
	Минимальное	-22,319	нм
	Максимальное	134,639	нм
	Расстояние от вершины до пика	156,959	нм
	Среднеквадратичное значение, RMS	14,471	нм
	Средняя шероховатость	11,713	нм
$S_{sk}$	Асимметрия	-0,181	
$S_{ka}$	Экссесс	2,839	

Таблица 3 – Измеренные параметры шероховатости [28, 29]

Обозначение параметра	Наименование параметра	Среднее значение ординаты	Размерность
<i>Параметры амплитуды</i>			
$R_a$	Среднее арифметическое отклонение профиля	14,092	нм
$R_q$	Среднеквадратичное отклонение профиля	16,870	нм
$R_{sk}$	Асимметрия профиля	0,0722	-
$R_{ku}$	Эксцесс профиля	2,570	-
<i>Параметры амплитуды (пик и впадина)</i>			
$R_{max}$	Максимальная высота профиля	81,909	нм
$R_p$	Максимальная высота пика профиля	48,033	нм
$R_v$	Максимальная глубина впадины профиля	33,876	нм
$R_z$	Высота неровностей по десяти точкам	40,830	нм
<i>Параметры интервала</i>			
$S_m$	Средняя ширина элементов профиля	3,671	мкм
$S$	Среднее расстояние между локальными пиками (ГОСТ 25142)	0,673	мкм
$L_q$	Среднеквадратичная длина волны профиля	3,302	мкм
$L_a$	Средняя длина волны профиля	4,519	мкм
$L_0$	Длина развернутого профиля	3,330	мкм
$l_0$	Коэффициент развернутого профиля	1,000	-
$D$	Плотность пиков профиля	13,563	-
$D_q$	Среднеквадратичный наклон профиля	0,0320	-
$D_a$	Средний арифметический наклон профиля	0,0234	-

При этом величина среднеарифметического отклонения профиля  $R_a$  составила 14,092 нм.

Профиль шероховатости поверхности с диапазоном микронеровностей после струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки показан на рис. 7.

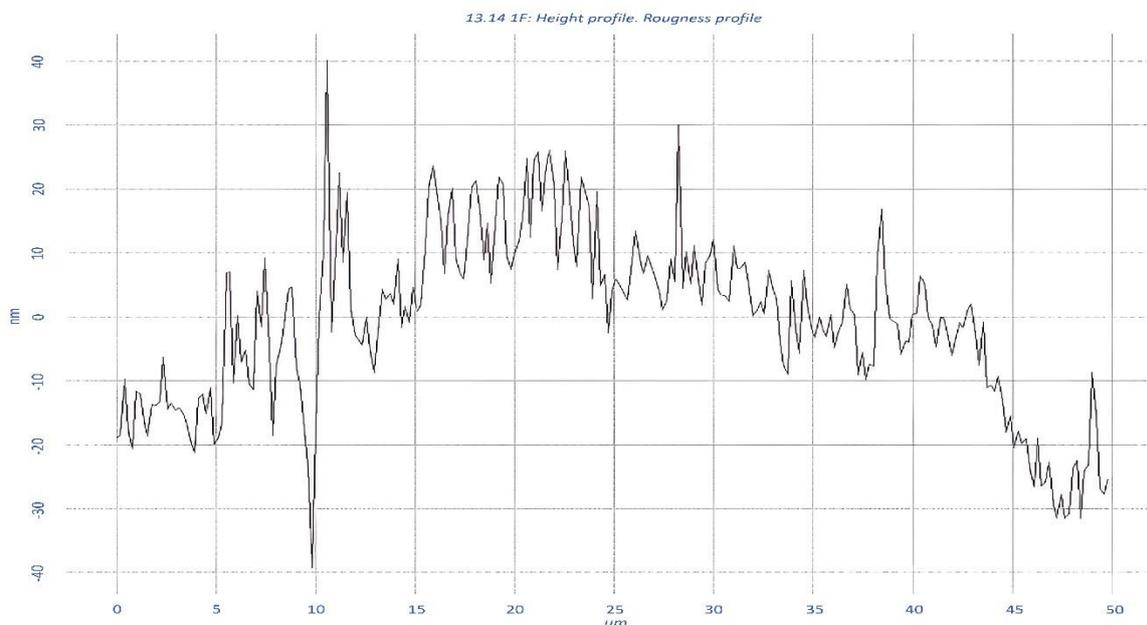


Рисунок 7 – Измерение профиля шероховатости поверхности

В результате проведенных исследований получены сканы поверхности образца из нержавеющей стали 08X18H9T после струйной фокусированной электролитной плазменной обработки. Морфология поверхности сканов показывает, что поверхность имеет развитый микрорельеф. На

поверхности фиксируются следы остатков пиков вершин шероховатости, совпадающих с направлением шероховатости в виде гребней и впадин микронеровностей (рис. 8, а, б).

На сканах наблюдается единичный дефект каплевидной формы с размером около 1 мкм (рис. 8, а, б, левый верхний угол). Первичное предположение о наличии в этом месте электрического разряда не подтверждается самой формой дефекта, который мог быть получен вследствие прокатки металла листа стали 08X18H9T. Кроме этого дефекты разного диаметра и также угловатой формы наблюдаются на исходных образцах до обработки и на образцах после струйной электролитно-плазменной обработки. Характерно, что внешний вид дефектов не имеет округлой формы в виде сфер, присущих искровому разряду, а имеет неправильные заостренные формы. Это ставит под сомнение их происхождение, как электроискровых разрядов.

Анализ результатов измерений (рис. 8, в, г) показывает, что при изменении диапазона измерений минимальная величина параметра шероховатости поверхности  $R_a$  лежит в зоне измерений 4,20-4,40 нм. При этом базовая длина измерения шероховатости составляет величину 10 мкм.

*3.2.2 Динамика изменения параметра шероховатости поверхности  $R_a$  в процессе струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки*

Анализ динамики изменения шероховатости после струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки показывает, что возможность получения низких параметров шероховатости имеется при снижении исходного параметра шероховатости поверхности  $R_a$  до диапазона 0,4-0,1 мкм. Превышение этого диапазона ведет к увеличению волнистости поверхности, росту финишного параметра шероховатости поверхности  $R_a$  или технологически неоправданному увеличению времени обработки, а в отдельных случаях, к невозможности получить заданный параметр шероховатости  $R_a$ .

Динамика изменения параметра шероховатости поверхности  $R_a$  от времени обработки представлена на рис. 9. Время достижения заданного параметра во многом зависит от исходного состояния поверхности, выбора электролита, условий формирования плазмы.

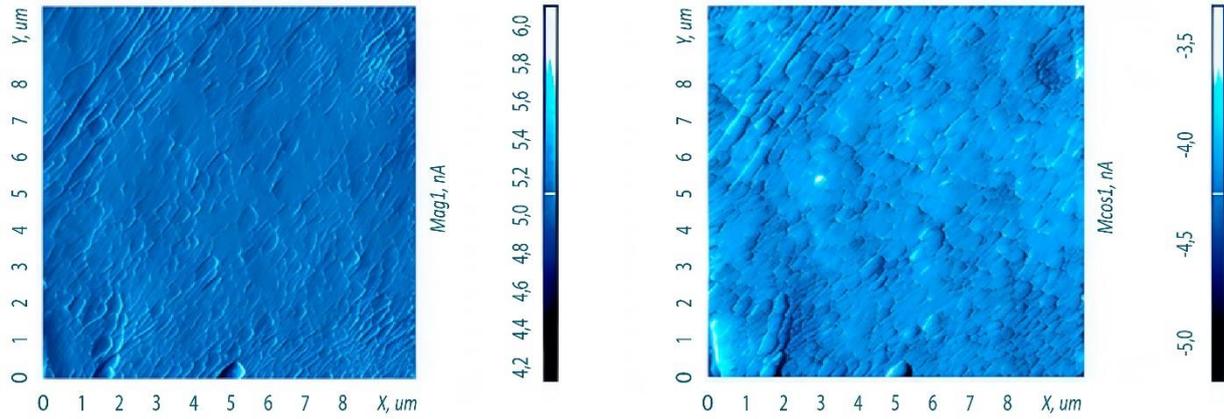
#### 4 Обсуждение и заключение

Анализ результатов проведенных исследований показывает, что комбинированная обработка позволяет в широких пределах изменять параметр шероховатости поверхности  $R_a$  от начальных значений  $R_a$  80 мкм до чрезвычайно малых величин  $R_a$  0,004 мкм, полученных нами на базовой длине 10 мкм. Это означает, что технологически возможно изменение параметра шероховатости поверхности  $R_a$  до заданной величины после механической обработки во всем диапазоне значений за счет струйной комбинированной обработки.

Результаты, полученные в исследованиях, значительно превосходят значения параметров шероховатости после электролитно-плазменной обработки в ванне ( $R_a$  0,06–0,01 мкм) для нержавеющей сталей [13-15].

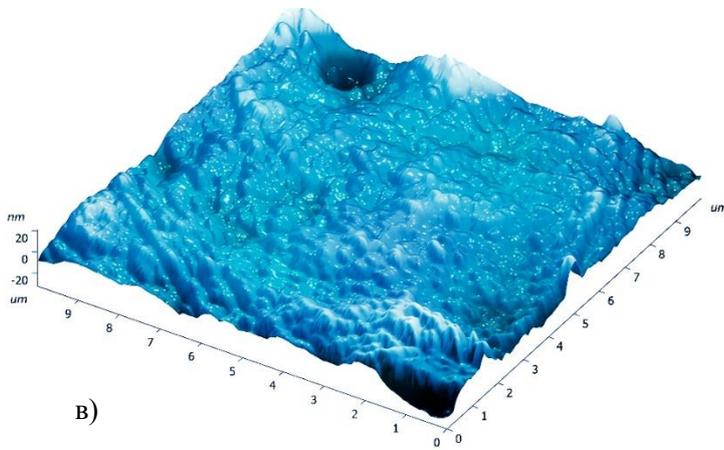
Полученные зарубежными авторами [20,21] величины среднеарифметической высоты поверхности  $S_a$  80 нм и  $S_a$  29 нм при обработке струей электролита значительно больше в сравнении с достигнутыми нами результатами среднеарифметической высоты поверхности  $S_a$  11,713 нм, зафиксированными на атомно-силовом микроскопе модели Ntegra Aura.

Исследования морфологии поверхности после финишной струйной электролитно-плазменной обработки показывают, что поверхность не имеет видимых следов от единичных разрядов. Это может говорить о том, что величина энергии единичных разрядов при обработке нанопервоверхностей значительно меньше, чем указанные нами в работе [30]. Предполагается, что энергия единичного разряда необходимого для финишной обработки поверхности с наноразмерной шероховатостью составляет  $E = 1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-7}$  Дж.

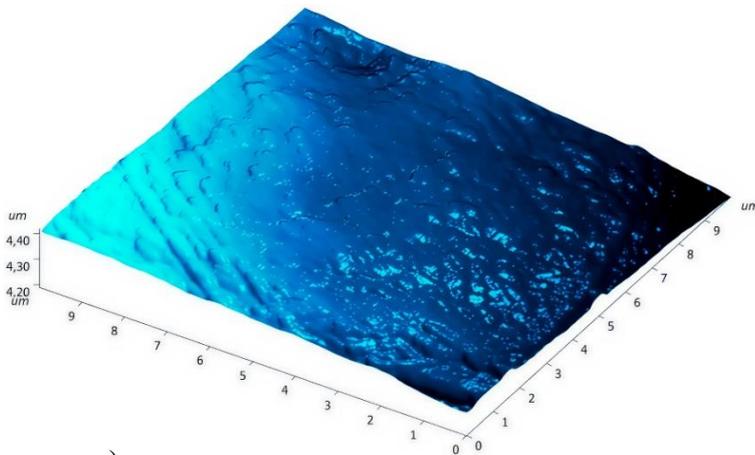


а)

б)



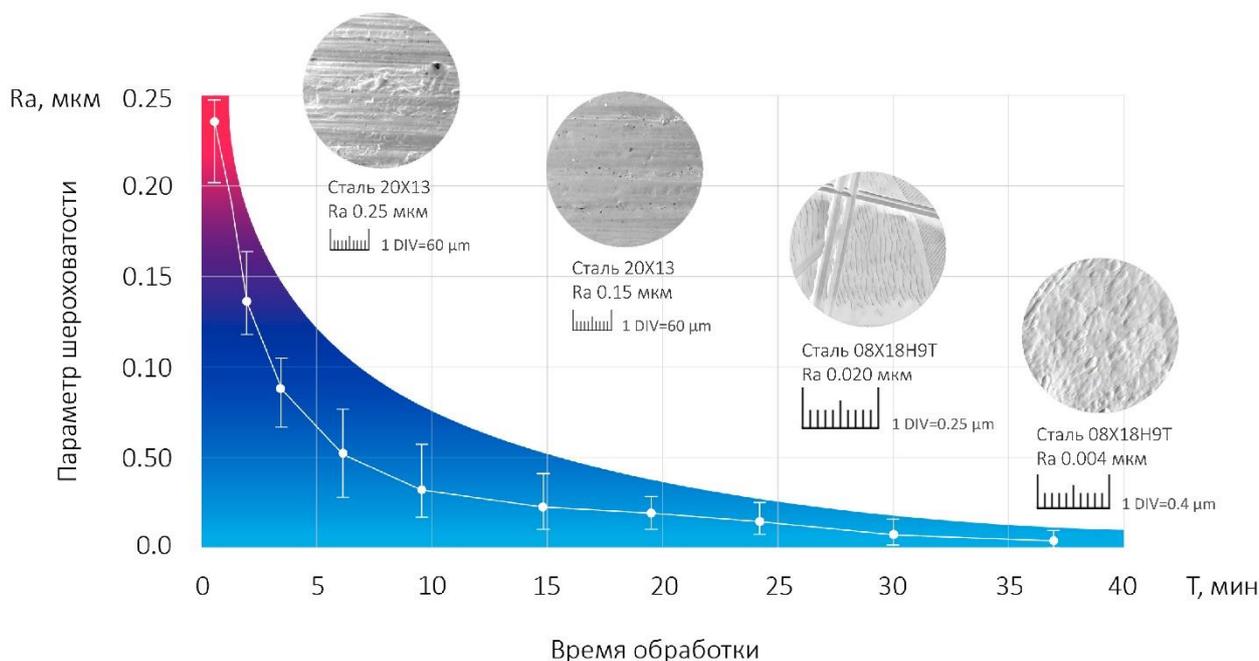
в)



г)

- а) расстояние от поверхности до кантелевера 5,1 нА;
- б) расстояние от поверхности до кантелевера - 4,5 нА;
- в) диапазон высоты измерения наносероховатости -20,00 – 20,00 нм;
- г) диапазон высоты измерения нано шероховатости 4,20 – 4,40 нм;

Рисунок 8 – Морфология поверхности образца из стали 08Х18Н9Т, обработанная струйной электролитно-плазменной обработкой с параметром шероховатости Ra 0,004 мкм (АСМ Ntegra Aura)



1, 2 образцы – сталь 20X13(РЭМ); 3-й образец – поверхность стали 08X18H9Т (РЭМ);  
4 образец – поверхность стали 08X18H9Т(АСМ)

Рисунок 9 – Изменение параметра шероховатости поверхности Ra и морфологии поверхности в зависимости от времени обработки

#### Выводы:

1 В процессе струйной комбинированной фокусированной обработки возможно снижение параметра шероховатости Ra с  $\sim 80$  мкм до  $\sim 0,004$  мкм, что охватывает практически весь диапазон шероховатости после механической и SLM обработки.

2 Струей электролита при объемных расходах  $Q = 10-90$  л/ч возможно получение параметра шероховатости Ra 0,2 мкм как для нержавеющей сталей, полученных технологией SLM (AISI 316L), так и для никелевых жаропрочных сплавов типа ЭП648, Инконель 718.

3 Струйным фокусированным электролитно-плазменным разрядом возможно получение предельно малой величины шероховатости поверхности, подтвержденное измерениями на атомно-силовом микроскопе для среднеарифметической высоты поверхности Sa 11,713 нм на площади измерения 2499,515 мкм<sup>2</sup>.

4 Технологически возможно получение чрезвычайно малой величины шероховатости до Ra 0,004 мкм, что подтверждается измерениями на атомно-силовом микроскопе на базовой длине 10 мкм.

5 На поверхности с параметром шероховатости Ra 0,004 мкм после струйной фокусированной обработки не фиксируется следов от электрических разрядов. При этом поверхность выглядит сглаженной. Это может говорить о том, что для разряда подобно тлеющему энергия единичных разрядов, воздействующих на поверхность, может составлять  $E = 1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-8}$  Дж.

**Благодарность** Автор выражает благодарность графическому дизайнеру Диане Александровне Поповой за подготовку иллюстраций.

#### Список литературы

1 Степанова, Т. Д. Технологический суверенитет России как элемент экономической безопасности / Т. Д. Степанова // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2022. – Т. 12, № 9-1. – С. 567-577. – DOI 10.34670/AR.2022.19.76.044. – EDN JNNZEN.

2 Петров, В.В. Технологический суверенитет России: концептуальные подходы и практическая реализация // Проблемы развития экономики. - 2020. - Т. 26, № 2. - С. 47-56.

3 Роль университета в интеграции образования, науки и бизнеса / С. И. Головкина, А. И. Попова, С. А. Черногорский, Н. В. Валебникова // Университет как фактор модернизации России: история и перспективы (к 55-летию ЧГУ им. И.Н. Ульянова) : Материалы Международной научно-практической конференции, Чебоксары, 18 октября 2022 года. – Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Среда», 2022. – С. 138-140. – EDN NERYTD.

4 Принципы построения автоматизированных систем поддержки жизненного цикла инновационных продуктов / А. И. Надеев, А. И. Попова, А. В. Сурина, Ю. К. Свечников // Датчики и системы. – 2006. – № 11. – С. 59-63. – EDN KWMQTP.

5 Нано/микротекстурирование поверхностей для антибактериальной защиты / А. А. Настулявичус, С. И. Кудряшев, Н. А. Смирнов [и др.] // Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛаПлаз-2018: Сборник научных трудов IV Международной конференции, Москва, 30 января – 01 2018 года. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2018. – С. 537-538. – EDN YUMHTV.

6 Sub-picosecond laser surface modification of Ti–Ni alloy and its antibacterial activity / I. N. Saraeva, A. A. Nastulyavichus, I. V. Sozaev [et al.] // Laser Physics Letters. – 2023. – Vol. 20, No. 11. – P. 115602. – DOI 10.1088/1612-202x/acfd93. – EDN XFNXXP.

7 A bacterial misericorde: Laser-generated silicon nanorazors with embedded biotoxic nanoparticles combat the formation of durable biofilms / I. N. Saraeva, E. R. Tolordava, A. A. Nastulyavichus [et al.] // Laser Physics Letters. – 2020. – Vol. 17, No. 2. – P. 025601. – DOI 10.1088/1612-202X/ab5fca. – EDN SUYAUN.

8 Патент № 2799364 С1 Российская Федерация, МПК С23С 18/44, А61L 27/28, А61L 27/54. Способ получения антибактериального покрытия на поверхности сплавов на основе титана медицинского назначения: № 2022131663: заявл. 05.12.2022: опубл. 05.07.2023 / Т. О. Теплякова, А. С. Конопацкий, С. Д. Прокошкин; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС". – EDN PLOISS.

9 Шальнов, В.А. Шлифование и полирование высокопрочных материалов / В. А. Шальнов. – Москва: Машиностроение, 1972. – 271 с.: ил.: 9000.00.

10 Назарова, Д. Ю. Анализ методов химического и электрохимического полирования сплава алюминия АМг6 / Д. Ю. Назарова, А. М. Гайдукова // Успехи в химии и химической технологии. – 2023. – Т. 37, № 14(276). – С. 72-74. – EDN XСJQTM.

11 Строилов, А. М. Сравнительный анализ отражательной способности сплава алюминия Д16 после химического и электрохимического полирования / А. М. Строилов, А. М. Гайдукова // Успехи в химии и химической технологии. – 2022. – Т. 36, № 4(253). – С. 113-115. – EDN LEGDSN.

12 Электроэрозионная обработка металлов / К. Е. Анохин, И. В. Гузь, Д. С. Солдатов, Д. А. Носков // Результаты современных научных исследований и разработок: сборник статей XIX Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 23 января 2023 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2023. – С. 30-32. – EDN QUZENJ.

13 Parfenov, E.; Mukaeva, V.; Farrakhov, R. Plasma electrolytic treatments for advanced surface finishing technologies. Mater. Technol. Des. 2014, 1, 34–41.

14 Захаров, С. В. Ионизационная модель электролитно-плазменного полирования / С. В. Захаров, М. Т. Коротких, Е. В. Гонибесова // Неделя науки СПбПУ : Материалы научной конференции с международным участием. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 18–23 ноября 2019 года. Том Часть 2. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2020. – С. 255-258. – EDN PNORZK.

15 А. Ю. Королёв, В. А. Томило, В. С. Нисс Энергетические характеристики стадии формирования парогазовой оболочки при электролитно-плазменной обработке. Доклады Национальной академии наук Беларуси, V. 68, N 4, с. 344-352, 2024 <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-4-344-352>

16 Wang J, Zong XM, Liu JF, Feng S (2017) Influence of voltage onelectrolysis and plasma polishing. ICMEIM 2017. Atlantis Press:2352-5401. <https://doi.org/10.2991/icmeim-17.2017.333>.

17 Smyslova MK, Tamindarov DR, Plotnikov NV, Modina IM, Semenova IP (2018) Surface electrolytic-plasma polishing of Ti-6Al-4V alloy with ultrafine-grained structure produced by severe plastic deformation. IOP Conf Ser: Mater Sci Eng IOP Publishing 461(1):012079. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/461/1/012079>

18 Анализ морфологии поверхности после струйной электролитно-плазменной обработки SLM-материалов / К. Л. М. Диату, Д. Н. Иванов, С. Ю. Симонов [и др.] // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2024. – № 13. – С. 683-696. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id24-130. – EDN IMSCVE.

19 Оценка возможности полирования нержавеющей сталей струйной электролитно-плазменной обработкой / М. В. Новоселов, Н. Г. Шиллинг, А. А. Рудавин [и др.] // Вестник Пермского национального

исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 94-102. – DOI 10.15593/2224-9877/2018.1.10. – EDN YVASNY.

20 Huang, Y., Wang, C., Ding, F. et al. Principle, process, and application of metal plasma electrolytic polishing: a review. *Int J Adv Manuf Technol* 114, 1893–1912 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07012-7>

21 Ghezri, A.; Pratama, K.; Scholl, Y.; Küenzi, A.; Nelis, T.; Burger, J.; Bessire, C. Energy Efficient Jet Polishing via Electrolytic Plasma Enhances Corrosion Resistance in Stainless Steel. *J. Manuf. Mater. Process.* 2024, 8, 289. <https://doi.org/10.3390/jmmp8060289>

22 Патент № 2623555 С1 Российская Федерация, МПК С25F 7/00. Установка для электролитно-плазменной обработки турбинных лопаток: № 2016120180: заявл. 24.05.2016: опубл. 27.06.2017 / А. И. Попов, М. М. Радкевич, В. Н. Кудрявцев [и др.]; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" (ФГАОУ ВО "СПбПУ"). – EDN USJMHW.

23 Технические условия ТУ 4254-001-58699387-2010: Нормативные и технические документы, устанавливающие требования к микроскопам, сканирующим зондовым Ntegra SPECTRA, Ntegra PRIMA, Ntegra VITA, Ntegra THERMA, Ntegra AURA, Ntegra MAXIMUS, Ntegra SOLARIS, Ntegra SOLARIS Duo, Ntegra ТОМО, Ntegra LIFE

24 ГОСТ Р 8.700-2010 НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ Государственная система обеспечения единства измерений МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ВЫСОТЫ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА State system for ensuring the uniformity of measurements. Methods of surface roughness effective height measurements by means of scanning probe atomic force microscope.

25 Попов, А. И. Анализ условий формирования плазмы в струе электролита при обработке поверхности анода в диапазоне 20-500 в / А. И. Попов // Воронежский научно-технический Вестник. – 2024. – Т. 3, № 3(49). – С. 3-16. – DOI 10.34220/2311-8873-2024-1-1. – EDN FLXDZE.

26 ГОСТ 27964-88. Измерение параметров шероховатости. Термины и определения.

27 ISO 21920-2:2021 Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.

28 ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Национальный стандарт Российской Федерации. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности

29 ГОСТ 25142— 82 (СТ СЭВ 1156—78). Шероховатость поверхности. Термины и определения.

30 Попов, А. И. Атомно-дислокационная модель удаления поверхностных слоев струйным электролитно-плазменным полированием / А. И. Попов // Воронежский научно-технический Вестник. – 2024. – Т. 1, № 1(47). – С. 31-51. – DOI 10.34220/2311-8873-2024-31-51. – EDN DWAPMM.

## References

1 Stepanova, T. D. Russia's Technological Sovereignty as an Element of Economic Security / T. D. Stepanova // *Economy: Yesterday, Today, Tomorrow*. - 2022. - Vol. 12, No. 9-1. - Pp. 567-577. - DOI 10.34670/AR.2022.19.76.044. - EDN JNNZEN.

2 Petrov, V.V. Russia's Technological Sovereignty: Conceptual Approaches and Practical Implementation // *Problems of Economic Development*. - 2020. - Vol. 26, No. 2. - Pp. 47-56.

3 The Role of the University in the Integration of Education, Science, and Business / S. I. Golovkina, A. I. Popova, S. A. Chernogorsky, N. V. Valebnikova // *University as a Factor in Russia's Modernization: History and Prospects (on the 55th Anniversary of I. N. Ulyanov Cheboksary State University): Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Cheboksary, October 18, 2022*. - Cheboksary: Limited Liability Company "Publishing House" Sreda ", 2022. - Pp. 138-140. - EDN NERYTD.

4 Principles of Building Automated Systems to Support the Life Cycle of Innovative Products / A. I. Nadeev, A. I. Popova, A. V. Surina, Yu. K. Svechnikov // *Sensors and Systems*. - 2006. - No. 11. - Pp. 59-63. - EDN KWMQTP.

5 Nano/microtexturing of surfaces for antibacterial protection / A. A. Nastulyavichus, S. I. Kudryashev, N. A. Smirnov [et al.] // *Laser, plasma research and technologies - LaPlas-2018: Collection of scientific papers of the IV International conference, Moscow, January 30 – January 01, 2018*. - Moscow: National Research Nuclear University MEPhI, 2018. - P. 537-538. - EDN YUMHTV.

6 Sub-picosecond laser surface modification of Ti–Ni alloy and its antibacterial activity / I. N. Saraeva, A. A. Nastulyavichus, I. V. Sozaev [et al.] // *Laser Physics Letters*. - 2023. - Vol. 20, No. 11. – P. 115602. – DOI 10.1088/1612-202x/acfd93. – EDN XFNXXX.

7 A bacterial misericorde: Laser-generated silicon nanorazors with embedded biotoxic nanoparticles combat the formation of durable biofilms / I. N. Saraeva, E. R. Tolordava, A. A. Nastulyavichus [et al.] // *Laser Physics Letters*. – 2020. – Vol. 17, No. 2. – P. 025601. – DOI 10.1088/1612-202X/ab5fca. – EDN SUYAUN.

8 Patent No. 2799364 C1 Russian Federation, IPC C23C 18/44, A61L 27/28, A61L 27/54. Method for producing an antibacterial coating on the surface of titanium-based alloys for medical purposes: No. 2022131663: declared 05.12.2022: published 05.07.2023 / T. O. Teplyakova, A. S. Konopatsky, S. D. Prokoshkin; applicant Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National University of Science and Technology "MISiS". – EDN PLOISS.

9 Shalnov, V.A. Grinding and polishing of high-strength materials / V.A. Shalnov. – Moscow: Mashinostroenie, 1972. – 271 p.: ill.: 9000.00.

10 Nazarova, D. Yu. Analysis of methods of chemical and electrochemical polishing of aluminum alloy AMg6 / D. Yu. Nazarova, A.M. Gaidukova // *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. – 2023. – Vol. 37, No. 14(276). – Pp. 72-74. – EDN XCJQTM.

11 Stroilov, A.M. Comparative analysis of the reflectivity of aluminum alloy D16 after chemical and electrochemical polishing / A.M. Stroilov, A.M. Gaidukova // *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. – 2022. – Vol. 36, No. 4(253). – Pp. 113-115. – EDN LEGDSN.

12 Electrical Discharge Machining of Metals / K. E. Anokhin, I. V. Guz, D. S. Soldatov, D. A. Noskov // *Results of Modern Scientific Research and Development: Collection of Articles from the XIX All-Russian Scientific and Practical Conference, Penza, January 23, 2023*. – Penza: Science and Education (IP Gulyaev G. Yu.), 2023. – Pp. 30-32. – EDN QUZEJH.

13 Parfenov, E.; Mukaeva, V.; Farrakhov, R. Plasma electrolytic treatments for advanced surface finishing technologies. *Mater. Technol. Des.* 2014, 1, 34–41.

14 Zakharov, S. V. Ionization Model of Electrolytic-Plasma Polishing / S. V. Zakharov, M. T. Korotkikh, E. V. Gonibesova // *SPbPU Science Week: Proceedings of the Scientific Conference with International Participation*. In 2 parts, St. Petersburg, November 18–23, 2019. Volume 2. – St. Petersburg: Polytech-Press, 2020. – Pp. 255–258. – EDN PNORZK.

15 A. Yu. Korolev, V. A. Tomilo, V. S. Niss. Energy Characteristics of the Vapor-Gas Shell Formation Stage during Electrolytic-Plasma Processing. *Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, Vol. 68, No. 4, pp. 344–352, 2024 <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-4-344-352>

16 Wang J, Zong XM, Liu JF, Feng S (2017) Influence of voltage onelectrolysis and plasma polishing. *ICMEIM 2017*. Atlantis Press:2352-5401. <https://doi.org/10.2991/icmeim-17.2017.333>.

17 Smyslova MK, Tamindarov DR, Plotnikov NV, Modina IM, Semenova IP (2018) Surface electrolytic-plasma polishing of Ti-6Al-4V alloy with ultrafine-grained structure produced by severe plastic deformation. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng IOP Publishing* 461(1):012079. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/461/1/012079>

18 Analysis of surface morphology after jet electrolytic-plasma processing of SLM materials / K. L. M. Diatu, D. N. Ivanov, S. Yu. Simonov [et al.] // *Modern mechanical engineering. Science and education*.

19 Evaluation of the Feasibility of Polishing Stainless Steels by Jet Electrolytic-Plasma Treatment / M. V. Novoselov, N. G. Shilling, A. A. Rudavin [et al.] // *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science*. - 2018. - Vol. 20, No. 1. - Pp. 94-102. - DOI 10.15593/2224-9877/2018.1.10. - EDN YVASNY.

20 Huang, Y., Wang, C., Ding, F. et al. Principle, process, and application of metal plasma electrolytic polishing: a review. *Int J Adv Manuf Technol* 114, 1893–1912 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07012-7>

21 Ghezri, A.; Pratama, K.; Scholl, Y.; Küenzi, A.; Nelis, T.; Burger, J.; Bessire, C. Energy Efficient Jet Polishing via Electrolytic Plasma Enhances Corrosion Resistance in Stainless Steel. *J. Manuf. Mater. Process.* 2024, 8, 289. <https://doi.org/10.3390/jmmp8060289>

22 Patent No. 2623555 C1 Russian Federation, IPC C25F 7/00. Installation for electrolytic-plasma treatment of turbine blades: No. 2016120180: appl. 24.05.2016: published 27.06.2017 / A. I. Popov, M. M. Radkevich, V. N. Kudryavtsev [et al.]; applicant Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University" (FGAOU VO "SPbPU"). – EDN USJMHW.

23 Technical conditions TU 4254-001-58699387-2010: Normative and technical documents establishing requirements for scanning probe microscopes Ntegra SPECTRA, Ntegra PRIMA, Ntegra VITA, Ntegra THERMA, Ntegra AURA, Ntegra MAXIMUS, Ntegra SOLARIS, Ntegra SOLARIS Duo, Ntegra TOMO, Ntegra LIFE

24 GOST R 8.700-2010 NATIONAL STANDARD OF THE RUSSIAN FEDERATION State system for ensuring the uniformity of measurements METHOD OF MEASURING THE EFFECTIVE HEIGHT OF SURFACE ROUGHNESS USING A SCANNING PROBE ATOMIC FORCE MICROSCOPE. State system for ensuring the uniformity of measurements. Methods of surface roughness: effective height measurements using a scanning probe atomic force microscope.

25 Popov, A. I. Analysis of plasma formation conditions in an electrolyte jet during anode surface machining in the 20-500 V range / A. I. Popov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. - 2024. - Vol. 3, No. 3(49). - Pp. 3-16. - DOI 10.34220/2311-8873-2024-1-1. - EDN FLXDZE.

26 GOST 27964-88. Measurement of roughness parameters. Terms and definitions.

27 ISO 21920-2:2021 Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Profile Part 2: Terms, definitions, and surface texture parameters.

28 GOST R ISO 4287-2014. National standard of the Russian Federation. Geometrical product characteristics (GPS). Surface structure. Profile method. Terms, definitions, and surface structure parameters

29 GOST 25142—82 (ST SEV 1156—78). Surface roughness. Terms and definitions.

30 Popov, A. I. Atomic-dislocation model of surface layer removal by jet electrolytic-plasma polishing / A. I. Popov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. - 2024. - Vol. 1, No. 1 (47). - Pp. 31-51. - DOI 10.34220/2311-8873-2024-31-51. - EDN DWAPMM.

© Попов А. И., 2025



2.5.6 – технология машиностроения

**ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ  
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО  
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ  
НА ТОЧНОСТЬ КОПИРОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА**

**INFLUENCE OF ELECTROCHEMICAL  
SHAPING METHODS FOR THE  
ACCURACY OF COPYING THE  
ELECTRODE-TOOL**

**Болдырев Александр Александрович,**  
к.т.н., доцент кафедры технологии машино-  
строения, Воронежский государственный  
технический университет, г. Воронеж.

**Boldyrev Alexander Aleksandrovich,**  
candidate of technical sciences, associate professor of  
the department of mechanical engineering technol-  
ogy, Voronezh state technical university, Voronezh.

**Болдырев Александр Иванович,**  
д.т.н., профессор кафедры технологии маши-  
ностроения, Воронежский государственный  
технический университет, г. Воронеж.

**Boldyrev Alexander Ivanovich,**  
doctor of technical sciences, professor of the de-  
partment of mechanical engineering technology,  
Voronezh state technical university, Voronezh.

**Григораш Владимир Васильевич,**  
к.т.н., доцент кафедры металлических и  
деревянных конструкций, Воронежский  
государственный технический университет,  
г. Воронеж

**Grigorash Vladimir Vasilyevich,**  
candidate of technical sciences, associate professor of  
the department of metal and wooden structures,  
Voronezh state technical university, Voronezh.

**Падурец Анна Александровна,**  
магистрант кафедры технологии машиностро-  
ения, Воронежский государственный техниче-  
ский университет, г. Воронеж.

**Padurets Anna Alexandrovna,**  
master's student of the department of mechanical  
engineering technology, Voronezh state technical  
university, Voronezh.

✉<sup>1</sup> **Перова Алла Владимировна,**  
к.т.н., доцент кафедры технологии машино-  
строения, Воронежский государственный  
технический университет, г. Воронеж,  
e-mail: [pva7@mail.ru](mailto:pva7@mail.ru)

✉<sup>1</sup> **Perova Alla Vladimirovna,**  
candidate of technical sciences, associate professor of  
the department of mechanical engineering technol-  
ogy, Voronezh state technical university, Voronezh,  
e-mail [pva7@mail.ru](mailto:pva7@mail.ru)

**Аннотация.** В статье рассмотрены возмож-  
ные схемы электрохимического формообра-  
зования инструмента гравюр штампов, пресс-  
форм, литниковых форм и подобных деталей  
методом копирования электрода-инструмента  
на копировально-прошивочном оборудова-  
нии. Экспериментальные исследования пока-  
зали, что для изготовления деталей с точно-  
стью 0,04-0,06 мм предпочтительной является  
импульсно-циклическая схема электрохими-  
ческой обработки с вибрирующим электро-  
дом-инструментом.

**Annotation.** This article presents discusses possi-  
ble schemes for electrochemical shaping of tool  
engravings of stamps, molds, spigot molds and  
similar parts by copying an electrode-tool on cop-  
ying and stitching equipment. Experimental stud-  
ies have shown that for the manufacture of parts  
with an accuracy of 0.04-0.06 mm, a pulse-cyclic  
electrochemical processing circuit with a vibrat-  
ing tool electrode is preferable.

**Ключевые слова:** ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ, КОПИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА, ТОЧНОСТЬ КОПИРОВАНИЯ. **Keywords:** ELECTROCHEMICAL SHAPING, COPYING OF THE ELECTRODE-TOOL, ACCURACY OF COPYING.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

## 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Теоретические и экспериментальные исследования по повышению точности электрохимического формообразования поверхностей токопроводящих деталей машин путем анодного растворения начались еще в СССР в 60-70-е годы прошлого века и ведутся еще до настоящего времени [1-7]. Результаты работ, выполненных в последние годы как в России, так и за рубежом, позволяют разделить все факторы, влияющие на точность электрохимического формообразования (ЭХФ) на две основные группы:

- не зависящие от процесса анодного растворения и режимных параметров обработки. Это систематические погрешности, обусловленные геометрическими неточностями оборудования, приспособлений и электродов-инструментов (ЭИ);
- зависящие от процесса анодного растворения и принятой для обработки схемы формообразования.

Наименьшую долю в суммарную погрешность обработки, как показали исследования [8], вносят собственно электрохимический станок и приспособление.

В данной работе предпринята попытка определения влияния схемы ЭХФ на точность, под которой будет пониматься точность копирования ЭИ. Анализ предварительных исследований показал, что точность копирования существенным образом зависит от особенностей локализации съема металла, которые имеют отличия в зависимости от применяемой схемы формообразования. Кроме того, погрешность копирования зависит от геометрической формы детали, величины и неравномерности припуска на обработку.

## 2 Материалы и методы

Известно [9, 10], что степень локализации при постоянном выходе металла по току определяется величинами межэлектродных зазоров (МЭЗ) в точках, находящихся на различных расстояниях от ЭИ. Откуда следует, что при обработке на малых МЭЗ возможно достижение более высокой точности формообразования, т.к. это приводит к увеличению степени локализации. Однако при уменьшении МЭЗ ухудшаются условия эвакуации продуктов электрохимических реакций и, прежде всего, газообразных продуктов. Наиболее важным фактором при этом является расстояние между входом и выходом электролита из МЭЗ. В тех случаях, когда это расстояние невелико, то газонаполнение МЭЗ не успевает достигнуть больших величин и электрохимическая обработка (ЭХО) на малых зазорах реализуется достаточно легко. Но ЭХО на постоянном токе на малых МЭЗ при увеличении обрабатываемой площади детали не представляется возможной вследствие сильного газонаполнения. Для устранения этого эффекта рекомендуется применять импульсный ток [11], а для восстановления свойств электролита в МЭЗ – уменьшать длительность импульса и увеличивать длительность паузы.

Устойчивая работа на малых МЭЗ возможна при использовании импульсно-циклических схем ЭХО. Достижение высокой точности копирования на малых МЭЗ возможно при применении прецизионного электрохимического копировально-прошивочного оборудования, работающего в непрерывном режиме. Хорошие стабильные результаты достигнуты при эксплуатации зарубежного оборудования: на станках фирмы «Charmilles» (Швейцария) изготавливались гравюры штампов под лопатку с длиной пера 300 мм с точностью по профилю 0,04-0,06 мм и 0,1 мм в замковой части; на станках фирмы «Hitachi» (Япония), использовавшихся в автомобилестроении, достигнута точность изготовления штампов в пределах 0,1 мм. При

использовании отечественного оборудования высокая точность ЭХФ копированием зачастую не достигалась.

Оборудованию для ЭХФ, работающему на импульсно-циклических схемах, необходимы такие же жесткие, повышенной точности конструкции и прецизионные привода подачи ЭИ с системами управления, автоматической стабилизации температуры, водородного показателя и гидродинамического режима течения электролита. Кроме того, для реализации вышеуказанного процесса ЭХФ потребуется довольно сложный источник импульсного технологического напряжения с регулируемыми параметрами импульсов. Отечественное оборудование не нашло широкого применения вследствие того, что конструкции станков были недостаточно точны и надежны в работе.

Поэтому были начаты работы по изысканию новых схем ЭХФ. Анализ импульсно-циклических схем формообразования показал, что среди этих схем есть такие, которые при высокой точности копирования не требуют вложения больших средств на реализацию и даже при наличии станков средней точности с непрерывной подачей ЭИ позволяют их модернизировать в станки повышенной точности.

Одной из первых разработок циклических схем явился способ формообразования с «ощупыванием» [12], по которому ЭИ посредством механизма подачи движется до касания с обрабатываемой деталью и отходит на рабочий зазор, после чего включается ток. В процессе анодного растворения припуска ЭИ перемещается по направлению к детали с постоянной скоростью. Период между «ощупыванием» ранее составлял 15-20 с. Снижение этого периода способствует повышению точности ЭХФ; в настоящее время период между «ощупыванием» составляет 1,5-2 с.

Создание таких способов ЭХФ и их дальнейшее совершенствование явилось существенным шагом вперед по сравнению с непрерывной схемой, особенно в связи с отсутствием систем защиты электродов от коротких замыканий. С их помощью решались задачи повышения надежности и стабильности работы оборудования, самого процесса и точности ЭХФ. Импульсно-циклическая схема формообразования получила дальнейшее развитие, когда началось ее осуществление с импульсным током.

Исследования ученых электрохимической школы Тульского политехнического института внесли существенный вклад в развитие импульсно-циклической схемы ЭХО. Повышение точности ЭХФ в способе [13] достигалась за счет того, что процесс анодного растворения осуществлялся при рабочем движении ЭИ от обрабатываемой детали при совмещении моментов подачи импульсов технологического напряжения с минимальным МЭЗ. Процесс ЭХО состоял из ряда последовательных циклов и велся в практически неподвижном электролите вследствие малости МЭЗ. Такие условия способствовали существенному повышению точности копирования при ЭХФ.

Ими же предложена импульсно-циклическая схема ЭХФ с регулированием режима течения электролита в МЭЗ: ламинарном в рабочем интервале при малых МЭЗ и турбулентном в интервале промывки. Ими также была предложена самоподстраивающаяся схема ЭХО, в которой система программно-адаптивного управления обеспечивала возможность работы как в непрерывном, так и в импульсно-циклическом режимах. В обоих режимах движение ЭИ осуществлялось посредством безынерционного привода подачи.

Очередным этапом повышения точности ЭХФ явилось появление обработки по схеме с вибрирующим ЭИ [14]. Высокая точность копирования ЭИ достигалась путем придания инструменту в процессе обработки колебательных движений в направлении подачи, синхронизированных с импульсами технологического напряжения, при этом осуществлялось чередование постоянной подачи и колебаний ЭИ. Процесс ЭХО протекал с периодическими чередованиями уменьшающегося и увеличивающегося МЭЗ в заданных пределах: наименьший гарантировался устройством, сообщаящим ЭИ вибрацию, наибольший – продолжительностью цикла обработки с подачей ЭИ.

Известны схемы ЭХФ, основанные на переменной гидродинамике потока электролита. В работе [14] описана ЭХО, в которой цикл обработки был разделен на два этапа: анодное растворение в неподвижном электролите и удаление продуктов растворения движущимся

электролитом при отключенном токе. Обработка в условиях квазинеподвижного электролита всегда имеет место в системах с вибрацией ЭИ и импульсами напряжения малой длительности. При подаче импульса, когда МЭЗ менее 0,1 мм, выделяющийся в результате электрохимических реакций газ практически запирает его. При этом достигаются условия копирования ЭИ с достаточно высокой точностью.

В ряде случаев вибрация ЭИ осуществлялась посредством гидравлических ударов электролита, поступавшего в МЭЗ. Источник питания включался при достижении заранее установленного МЭЗ и оставался включенным до следующего касания ЭИ с обрабатываемой деталью. Процесс обработки реализовывался на разных МЭЗ, его варьирование осуществлялось за счет изменения силы гидравлического удара.

Анализ схем импульсно-циклической обработки показал, что для их реализации необходимы стабилизированные приводы подачи ЭИ, оснащенные регуляторами, системами адаптивно-программного управления и т.п., что естественно усложняет управление процессом, снижает надежность и существенно повышает стоимость оборудования.

### 3 Результаты исследований

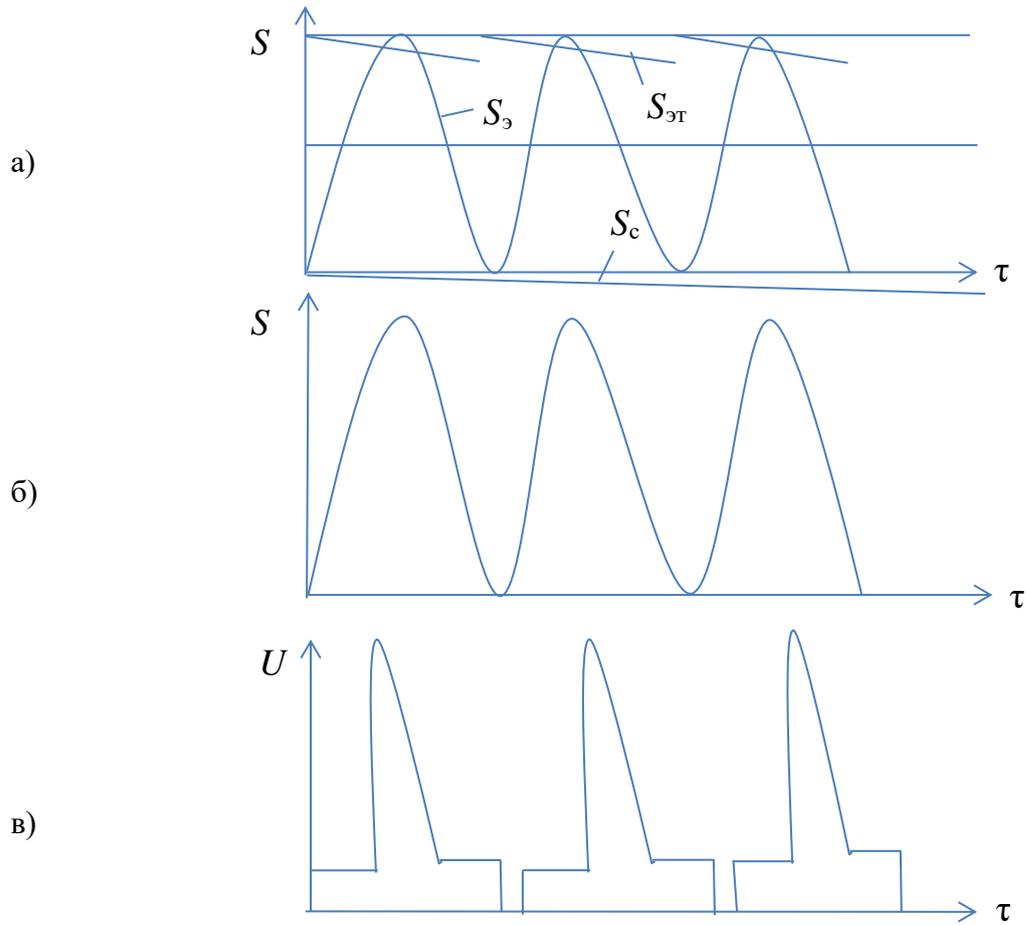
Учеными Ивановского государственного химико-технологического университета разработана схема ЭХФ [15], сочетающая преимущества импульсно-циклической схемы со сложной кинематикой движения ЭИ и схемы импульсной обработки с вибрацией ЭИ, которая была реализована совместными работами ученых Ивановского государственного химико-технологического университета, сотрудников Воронежского государственного университета с помощью специалистов Воронежского механического завода в опытной промышленной установке.

Такой принцип действия системы регулирования МЭЗ представлен на рис. 1. Под воздействием вибратора ЭИ совершает периодические колебания, касаясь каждые полпериода поверхности детали. После касания ЭИ его перемещение складывается из перемещения вверх под действием вибратора и вниз под действием силы тяжести. Формирование МЭЗ осуществляется за счет результирующего перемещения ЭИ относительно обрабатываемой поверхности.

При формообразовании сложнопрофильных деталей с изменением площади обрабатываемой поверхности возможна дестабилизация процесса обработки, которая может привести либо к значительному увеличению МЭЗ, либо к короткому замыканию. Устойчивость процесса ЭХФ в данном случае достигается автоматическим регулированием равновесия в МЭЗ путем компенсации противодействия. Система регулирования, включающая в себя датчик касания 3 усилитель 4 и исполнительный механизм 5, соединенный гибкой связью 6 с подвижной электродной системой, приведена на рис. 2.

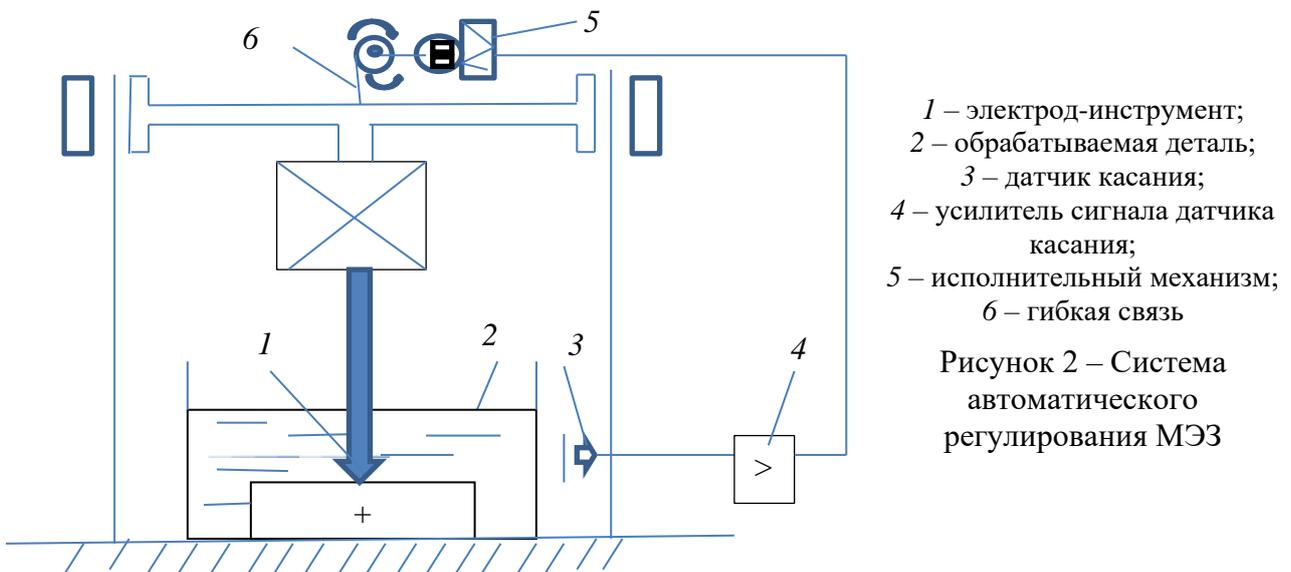
Электродная система работает следующим образом. При прекращении касаний ЭИ 1 и детали 2 по мере растворения припуска в продолжение нескольких циклов (количество циклов определяется по нечувствительности датчика касаний 3) механизм 5 ослабляет гибкую связь 6 до тех пор, пока ЭИ, перемещающийся под действием силы тяжести, не коснется поверхности детали 2. После чего исполнительный механизм 5 останавливается. Обработка осуществляется на МЭЗ, равном удвоенной амплитуде вибрации ЭИ 1. Такая система регулирования позволяет вывести ЭИ на заданный МЭЗ и компенсировать противодействие в МЭЗ путем нагружения ЭИ. При этом анодное растворение продолжается до прекращения касаний ЭИ с поверхностью детали.

Результаты экспериментальных исследований показали, что производительность процесса зависела от амплитуды вибрации и изменялась по закону, близкому к гиперболическому. Погрешность формы линейно возрастала с ростом амплитуды вибрации. При этом зависимость погрешности размера от амплитуды вибрации  $A$  была нелинейна. Экстраполяция кривой на нулевое значение погрешности размера  $\Delta$  дала величину амплитуды вибрации 0,07 мм (рис. 3).

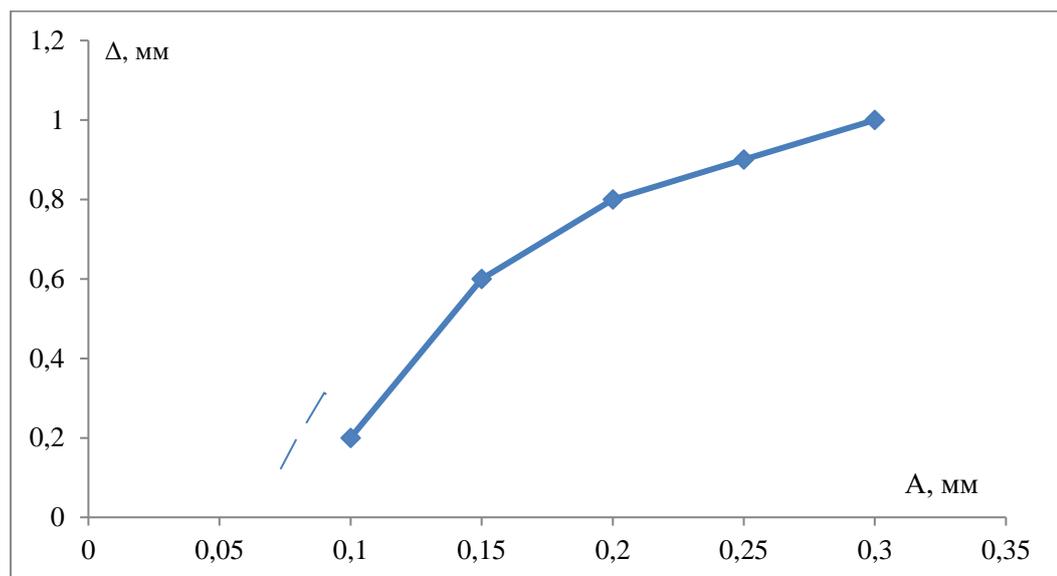


- а) за счет электрохимического съема ( $S_c$ );  
 б) суммарная величина изменения МЭЗ ( $S$ ) от воздействия всех факторов;  
 в) от импульсного технологического напряжения ( $U$ );  
 $S_{ЭВ}$  – перемещение ЭИ под действием вибратора;  
 $S_{ЭТ}$  – перемещение электродной системы под действием силы тяжести

Рисунок 1 – Зависимость перемещения ЭИ



- 1 – электрод-инструмент;  
 2 – обрабатываемая деталь;  
 3 – датчик касания;  
 4 – усилитель сигнала датчика касания;  
 5 – исполнительный механизм;  
 6 – гибкая связь
- Рисунок 2 – Система автоматического регулирования МЭЗ



рабочее напряжение – 5 В; скважность – 1,5

Рисунок 3 – Зависимость погрешности размера  $\Delta$  от амплитуды вибрации  $A$

ЭХФ наиболее эффективно при напряжении 2-4 В как на стальных, так и на титановых образцах [16]. Энергоемкость растворения титановых сплавов в электролитах различного состава составляла 30-100 кВт/кг. Вибрация электродов ее существенно снижала: в растворе электролита 15 %  $\text{NaNO}_3$  + 3 %  $\text{NaCl}$  энергоемкость составляла 21 кВт/кг, в растворе электролита 15 %  $\text{NaNO}_3$  + 3 %  $\text{LiCl}$  – 19 кВт/кг. Скорее всего вибрация электродов приводила к изменению условий формирования и свойств поверхностных титановых пленок.

Эксперименты по сравнению точности копирования ЭИ при ЭХО в непрерывном режиме при постоянном токе и постоянной подаче ЭИ проводились на образцах, изготовленных из инструментальной штамповой стали 3Х2В8 (ГОСТ 1050-2013). Обработка осуществлялась неизолрованными ЭИ цилиндрической (диаметрами 10 и 15 мм) и конической (с углами наклона образующей 15° и 30°) формы без противодавления. Электролитом являлся 15 % раствор  $\text{NaNO}_3$  при температуре 20° С [17]. Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 1, откуда видно, что во всех случаях использования схемы с вибрацией точность ЭХФ была выше.

Таблица – Размеры цилиндрических и конических отверстий в зависимости от схемы обработки

Глубина обработки, мм	Цилиндрические ЭИ				Конические ЭИ			
	диаметр 10 мм		диаметр 15 мм		угол наклона 15°		угол наклона 30°	
	1	2	1	2	1	2	1	2
5	10,17	10,55	15,25	15,65	11,80	12,55	18,20	18,45
10	10,05	10,35	15,10	15,40	9,05	9,40	13,00	13,15

Примечание: 1 – формообразование с вибрацией ЭИ; 2 – непрерывное формообразование.

#### 4 Обсуждение и заключение

Реализация рассмотренного процесса ЭХФ в производстве возможна при разработке и промышленном изготовлении специальных виброприставок, закрепляющихся на пиноли любого копировально-прошивочного электрохимического станка. Приставки отличаются простотой конструкции и удобством обслуживания.

Таким образом, без значительных затрат на замену приводов подач, изготовление сложных систем адаптивного и программного управления, импульсных источников питания любой

электрохимический станок может быть переоборудован в станок повышенной точности. Наличие приставки, установленной на шпинделе станка, обеспечит копирование ЭИ при формообразовании гравюр штампов, пресс-форм, литниковых форм и подобных деталей с точностью 0,04-0,06 мм. Высокая точность копирования ЭИ не предполагает дополнительных мероприятий по расчету его геометрии и корректировке для получения нужных размеров. В комплекте с электрохимическими копировально-прошивочными станками приставка может найти применение на машиностроительных предприятиях для формообразования деталей сложной формы из высокопрочных и конструкционных материалов основного и инструментального производства.

### Список литературы

- 1 Журавский, А. К. О структуре точности ЭХО деталей // Новое в электрохимической размерной обработке металлов: материалы научно - технической конференции. Кишинев: Штиинца, 1972. – С. 74-78.
- 2 Кашеев, В.Д. Влияние различных видов электрохимической обработки на точность и шероховатость поверхности металла // Электродные процессы и технология электрохимической размерной обработки: сборник статей / под общей редакцией Ю.Н. Петрова. Кишинев: Штиинца, 1980. – С. 14-20.
- 3 Santos E., Schmickler W. Catalysis in Electrochemistry. From Fundamentals to Strategies for Fuel Cell Development. New Jersey: John Wiley & Sons. Inc. Hoboken, 2011. 516 p.
- 4 Wendt H., Kreysa G. The Scope and History of Electrochemical Engineering // Electrochemical Engineering. 1999. № 4. P. 1-7.
- 5 Stankovic V. Electrochemical Engineering – its appearance, evolution and present status. Approaching an anniversary // Journal of Electrochemical Science and Engineering. 2012. № 2. P. 1-14.
- 6 Bebelis S., Bouzek K., Cornell A., Ferreira M. G. S., Kelsall G. H., Lopicque F., Ponce de León C., Rodrigo M. A., Walsh F. C. Highlights during the development of electrochemical engineering // Chemical Engineering Research and Design. 2013. № 91(10). P. 1998-2020.
- 7 Hawkins W. A. Electrochemical turning adds a new dimension // Metalworking Production. 2018. V. 114. № 12. P. 49-51.
- 8 Болдырев, А. И. Погрешности и их влияние на формирование точности электрохимического формообразования / А.И. Болдырев, А.А. Болдырев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2017. – Т. 13. – № 3. – С. 116-122.
- 9 Саушкин, Б. П., Проблемы и перспективы развития импульсной электрохимической размерной обработки / Б.П. Саушкин, А.Г. Атанасянц, Г. А. Сычков // Электронная обработка материалов. – 2003. – № 2. – С. 10-22.
- 10 Болдырев, А.И. Влияние электрохимической обработки на состояние поверхностного слоя штамповой оснастки / А. И. Болдырев, А. А. Болдырев, А. В. Перова, А. А. Падурец // Воронежский научно-технический вестник. – 2022. – № 3 (41). – С. 18-23.
- 11 Источник питания для исследования импульсных электрохимических процессов / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2018. – Т. 61. – № 3. – С. 246-257.
- 12 Саушкин Б. П. Проектирование технологий электрохимической обработки деталей авиационной техники. М.: Машиностроение, 2008. – 400 с.
- 13 Житников В. П., Зайцев А.Н. Импульсная электрохимическая размерная обработка. М.: Машиностроение, 2008. – 413 с.
- 14 Зайцев, А.Н. Электрохимическая обработка. Теория, технология, оборудование: учебное пособие. М.-Вологда: Инфро-Инженерия, 2024. – 636 с.
- 15 Бурков, В. М. Электрохимическое формообразование с вибрацией электрода-инструмента. Иваново: Ивановский государственный. химико-технологический университет, 2008. – 159 с.
- 16 Болдырев А. И., Болдырев А. А., Григораш В. В. Влияние режимных параметров процесса анодного растворения на обеспечение качества электрохимического формообразования / А.И. Болдырев, А.А. Болдырев, В.В. Григораш // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. – Т. 13. – № 4. – С. 98-104.
- 17 Болдырев, А. А. Оптимизация технологических процессов электрохимической обработки деталей машин / А. А. Болдырев, А. И. Болдырев, А. В. Мандрыкин, А. В. Перова // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. – Т. 13. – № 2. – С. 107-113.

18 Болдырев, А. И. Формализация напряженно-деформированного состояния детали с подвижной границей в условиях электрического и комбинированного формообразования / А. И. Болдырев, С. В. Усов, А. А. Болдырев, В. А. Нилов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т. 10. – № 1. – С. 16-19.

### References

1 Zhuravskii, A.K. On the structure of the accuracy of ECHO parts // New in electrochemical dimensional processing of metals: materials of the scientific and technical conference. Chisinau: Shtiintsa, 1972. – P. 74-78.

2 Kashcheev, V.D. Influence of various types of electrochemical processing on the accuracy and roughness of the metal surface // Electrode processes and technology of electrochemical dimensional processing: collection of articles / edited by Yu.N. Petrov. Chisinau: Shtiintsa, 1980. – P. 14-20.

3 Santos E., Schmickler W. Catalysis in Electrochemistry. From Fundamentals to Strategies for Fuel Cell Development. New Jersey: John Wiley & Sons. Inc. Hoboken, 2011. 516 p.

4 Wendt H., Kreysa G. The Scope and History of Electrochemical Engineering // Electrochemical Engineering. 1999. No. 4. P. 1-7.

5 Stankovic V. Electrochemical Engineering – its appearance, evolution and present status. Approaching an anniversary // Journal of Electrochemical Science and Engineering. 2012. No. 2. P. 1-14.

6 Bebelis S., Bouzek K., Cornell A., Ferreira M. G. S., Kelsall G. H., Lapique F., Ponce de León C., Rodrigo M. A., Walsh F. C. Highlights during the development of electrochemical engineering // Chemical Engineering Research and Design. 2013. No. 91(10). P. 1998-2020.

7 Hawkins W. A. Electrochemical turning adds a new dimension // Metalworking Production. 2018. V. 114. No. 12. P. 49-51.

8 Boldyrev, A. I. Errors and their influence on the formation of the accuracy of electrochemical shaping / A. I. Boldyrev, A. A. Boldyrev // Bulletin of the Voronezh State Technical University. - 2017. - Vol. 13. - No. 3. - P. 116-122.

9 Saushkin, B. P., Problems and prospects for the development of pulsed electrochemical dimensional processing / B. P. Saushkin, A. G. Atanasyants, G. A. Sychkov // Electronic processing of materials. - 2003. - No. 2. - P. 10-22.

10 Boldyrev, A. I. The influence of electrochemical machining on the state of the surface layer of stamping tooling / A. I. Boldyrev, A. A. Boldyrev, A. V. Perova, A. A. Padurets // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. - 2022. - No. 3 (41). - P. 18-23.

11 Power source for studying pulsed electrochemical processes / Yu. G. Alekseev [et al.] // Power engineering. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS. - 2018. - V. 61. - No. 3. - P. 246-257.

12 Saushkin B. P. Design of technologies for electrochemical machining of aircraft parts. Moscow: Mechanical Engineering, 2008. - 400 p.

13 Zhitnikov V. P., Zaitsev A. N. Pulse electrochemical dimensional machining. M.: Mashinostroenie, 2008. – 413 p.

14 Zaitsev, A. N. Electrochemical processing. Theory, technology, equipment: study guide. M.-Vologda: Info-Engineering, 2024. – 636 p.

15 Burkov, V. M. Electrochemical shaping with vibration of the electrode-tool. Ivanovo: Ivanovo State. Chemical-Technological University, 2008. – 159 p.

16 Boldyrev A. I., Boldyrev A. A., Grigorash V. V. Influence of the process parameters of anodic dissolution on ensuring the quality of electrochemical shaping / A. I. Boldyrev, A. A. Boldyrev, V. V. Grigorash // Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2017. - Vol. 13. - No. 4. - P. 98-104.

17 Boldyrev, A. A. Optimization of technological processes of electrochemical processing of machine parts / A. A. Boldyrev, A. I. Boldyrev, A. V. Mandrykin, A. V. Perova // Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2017. - Vol. 13. - No. 2. - P. 107-113.

18 Boldyrev, A. I. Formalization of the stress-strain state of a part with a moving boundary under conditions of electrical and combined forming / A. I. Boldyrev, S. V. Usov, A. A. Boldyrev, V. A. Nilov // Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2014. – Т. 10. – No. 1. – P. 16-19.

© Болдырев А. А., Болдырев А. И., Григораш В. В., Падурец А. А., Перова А. В., 2025



**МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
ВЕЛИЧИНЫ КОРОБЛЕНИЯ  
КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ**

**METHODS OF ANALYSIS AND  
DETERMINATION AND WARPING  
VALUES OF CRANKSHAFTS**

✉<sup>1</sup> **Лебедев Валерий Александрович**,  
профессор, к.т.н., профессор, Донской государствен-  
ственный технический университет,  
г. Ростов-на-Дону, e-mail: [va.lebidev@yandex.ru](mailto:va.lebidev@yandex.ru)

✉<sup>1</sup> **Lebedev Valery Aleksandrovich**,  
professor, candidate of technical sciences, professor  
Don state technical university, Rostov-on-Don,  
e-mail: [va.lebidev@yandex.ru](mailto:va.lebidev@yandex.ru)

**Эль Дакдуки Ахмад Мохамад**,  
аспирант, Донской государственной техни-  
ческий университет, г. Ростов-на-Дону,  
e-mail: [el\\_dakdoukia81@mail.ru](mailto:el_dakdoukia81@mail.ru)

**El Dakduki Ahmad Mohamad**,  
postgraduate student, Don State Technical University,  
Rostov-on-Don, e-mail: [el\\_dakdoukia81@mail.ru](mailto:el_dakdoukia81@mail.ru)

**Бажанов Валерий Николаевич**,  
заместитель директора по производству  
КРЭТ- ВНИИ Градиент, г. Ростов-на-Дону,  
e-mail: [lil-ovs@yandex.ru](mailto:lil-ovs@yandex.ru)

**Bazhanov Valery Nikolaevich**,  
deputy director for production KRET- VNIИ Gradient,  
Rostov-on-Don, e-mail: [lil-ovs@yandex.ru](mailto:lil-ovs@yandex.ru)

**Аннотация.** Предложена методика расчёта величины суммарного коробления коленчатых валов после виброударной обработки, основанная на учёте остаточных напряжений сжатия, возникающих в поверхностных слоях. Представлена аналитическая модель и результаты численного моделирования коробления. Проведен сравнительный анализ результатов численного моделирования с результатами расчетных данных, который показал их совпадение с относительной погрешностью менее 5 %.

**Annotation.** A method for calculating the total warping of crankshafts after vibro-impact treatment is proposed, based on the consideration of residual compression stresses that occur in the surface layers. An analytical model and the results of numerical modeling of warping are presented. A comparative analysis of the results of numerical modeling with the results of calculated data is conducted, which showed their agreement with a relative error of less than 5 %.

**Ключевые слова:** КОЛЕНЧАТЫЙ ВАЛ, КОРОБЛЕНИЕ, ВИБРОУДАРНАЯ ОБРАБОТКА, УПРОЧНЕНИЕ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

**Keywords:** CRANKSHAFT, WARPING, VIBRATION IMPACT TREATMENT, HARDENING, NUMERICAL SIMULATION.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

**1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы**

В современном машиностроении требования к точности геометрической формы коленчатых валов (КВ) непрерывно повышаются. В частности, биение коренных шеек КВ автомобильных и тракторных двигателей не должно превышать 0,01-0,06 мм [1]. Основной причиной погрешностей геометрической формы КВ являются коробления, вызванные остаточными

напряжениями, возникающими при упрочнении галтелей методом поверхностного пластического деформирования (ППД). Экспериментально установлено [2], что применение виброударной обработки (ВиУО) позволяет достичь равномерного упрочнения поверхностного слоя всех элементов детали, отделки и скругления острых кромок, плавности переходов, исключения поводки нежестких валов, имеющей место при избирательной обработке обкатыванием галтелей крупногабаритных деталей. Несмотря на то, что изучению процесса ВиУО посвящены известные исследования ученых [3-9], важным остается вопрос разработки расчетных зависимостей для проектирования технологического процесса ВиУО,

Целью данных исследований являлась разработка аналитической модели определения коробления КВ при ВиУО и проверка ее адекватности с применением методов численного моделирования.

## 2 Материалы и методы

Методика исследования основана на учёте остаточных напряжений сжатия, возникающих в поверхностных слоях после упрочнения. Приведён вывод расчетной формулы, рассматриваются параметры, влияющие на величину коробления, а также проведено численное моделирование и сравнительный анализ результатов с экспериментальными данными.

## 3 Результаты исследований

### 3.1 Вывод и анализ расчётной зависимости коробления КВ

Комплекс теоретических исследований, представленный в работе [1], позволил раскрыть механизм процесса коробления КВ при упрочнении галтелей методами ППД [3–6], проиллюстрированный на рис. 1.

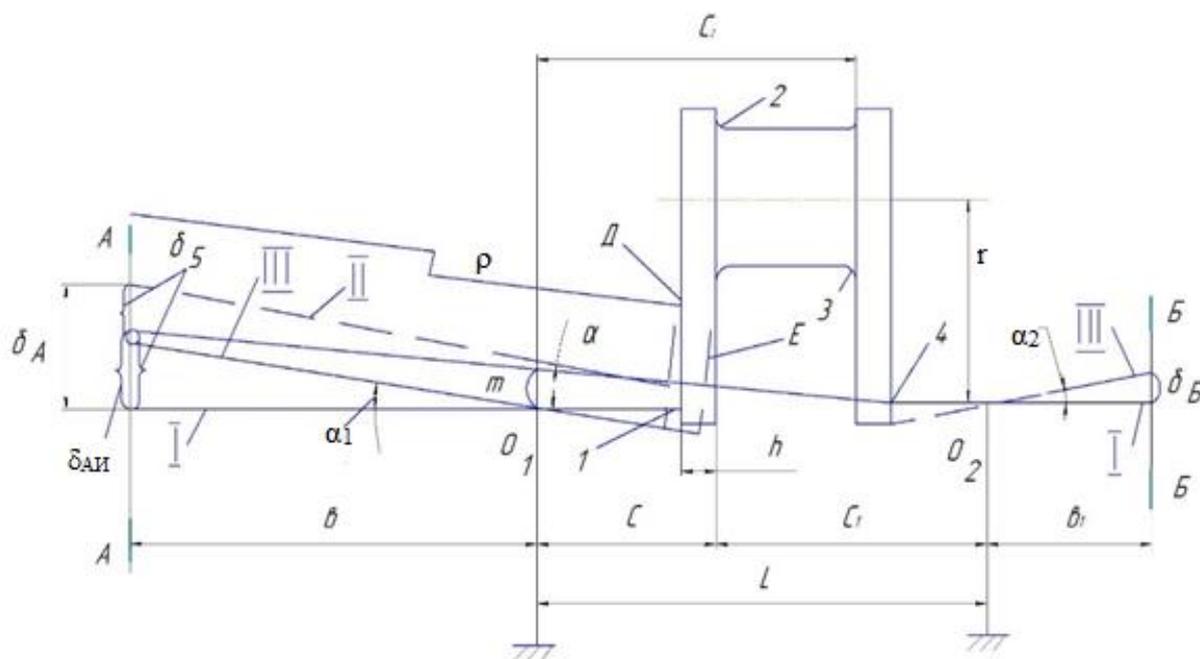


Рисунок 1 – Расчетная схема коробления КВ при упрочнении галтелей ППД

До упрочнения коренные шейки КВ (рис.1) занимают горизонтальное положение I. После ППД галтели 2 шатунной шейки изогнётся выпуклостью в сторону упрочнённой галтели по радиусу  $\rho$  и должна переместить связанную с ней левую коренную шейку в новое положение II ( $\rho$  – радиус сферы, по которой изгибается щека с упрочненной галтелью). Однако, так как коленчатый вал свободно лежит на опорах  $0_1$  и  $0_2$ , то под действием силы тяжести

он повернется вокруг точки  $O_2$  против часовой стрелки на угол  $\alpha_2$  до соприкосновения левой коренной шейки с опорой  $O_1$ . При этом в сечении опоры  $O_1$  левая коренная шейка опустится на величину  $m$  (в сечении А-А на величину  $\delta_5$ ) и займёт новое положение III. При вращении КВ на опорах индикатор в сечении А-А покажет не полную (фактическую) величину коробления  $\delta_A$ , а некоторую (измеряемую) её часть  $\delta_{Aи}$  [7].

Для определения величины коробления КВ в сечении А-А от одновременного упрочнения галтелей 1 и 2 в работе [4] предложена следующая зависимость, вытекающая из рис. 1, мм:

$$\delta_{Aи1,2} = 6 \cdot \frac{(1 - \nu)}{E} \cdot \frac{r}{h^2} \cdot \frac{b}{L} \cdot [-\sigma_{ост1} \delta_{\sigma1}(L + h - C) + \sigma_{ост2} \delta_{\sigma2}(L - C)] \cdot \Psi, \quad (1)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости первого рода (МПа);  $r$  – расстояние от оси коренной шейки (КШ) до оси шатунной шейки (ШШ), мм;  $h$  – общая толщина щеки кривошипа КВ, мм;  $b$  – расстояние от КШ до конца КВ, мм;  $L$  – расстояние между КШ одного кривошипа, мм;  $C$  – расстояние от щеки (со стороны ШШ) до КШ, мм;  $\sigma_o$  – средняя величина остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое после ППД, МПа;  $\delta_\sigma$  – глубина залегания остаточных напряжений сжатия, МПа;  $\Psi$  – коэффициент, учитывающий неполную обработку щеки ППД.

Из формулы (1) следует, что величина коробления зависит от материала КВ (первый множитель), жесткости щеки (второй множитель), передаточного соотношения (третий множитель), величины и глубины залегания остаточных сжимающих напряжений, формируемых в поверхностном слое КШ и ШШ в процессе упрочнения ППД (четвёртый множитель), и наконец, пятый множитель характеризует площадь поверхности щеки, обработанной ППД. Первые три множителя обусловлены конструктивными параметрами КВ и являются основополагающими при оценке величины коробления валов. Два других позволяют оценить степень влияния на коробление технологических методов ППД, выбранных для повышения эксплуатационных свойств КВ.

Рассмотрим зависимость величины коробления КВ от упрочнения их в условиях ВиУО, которая предполагает полное погружение КВ в рабочую среду, находящуюся под воздействием низкочастотных колебаний, в результате чего обработке подвергаются все поверхности, доступные для энергосилового воздействия частиц рабочей среды. Следовательно, предусмотренный в формуле (1) коэффициент  $\Psi$ , учитывающий неполную обработку щеки, можно приравнять единице.

Для определения величины остаточных напряжений в галтелях КШ и ШШ используем выражение [4], Па:

$$\sigma_o = \sigma_{оmax} = \frac{\sigma_{дт}}{h_y} K_{ко}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{дт}$  – динамический предел текучести, Па;  $h_y$  – глубина упрочненного слоя, м;  $K_{ко}$  – глубина залегания максимальных остаточных сжимающих напряжений в зависимости от диаметральных размеров шеек КВ и деформационных параметров энергосилового воздействия части рабочей среды, определяемая по формуле:

$$K_{ко} = \left[ \frac{4}{3}R - 2(R - R_a) - \frac{1}{2}(R - h_y) \left( 2 \ln \frac{\rho}{(R - R_a)} - \frac{(R - h_y)^2}{3R^2} - 1 \right) \right], \quad (3)$$

где  $R$  – радиус цилиндрической поверхности шеек, м;  $R_a$  – среднеарифметическое отклонение профиля поверхности шеек, м.

Глубина распространения остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое, как правило, превышает глубину упрочнённого слоя и составляет:

$$\delta_{\sigma_2} \approx K_y \cdot h_y. \quad (4)$$

где  $\delta_{\sigma_2}$  – глубина распространения остаточных напряжений сжатия, м;  $K_y$  – коэффициент превышения глубины залегания остаточных напряжений, по различным источникам это превышение колеблется от  $K_y=1,1-1,5$  до  $K_y=1,3-2$  [8].

С учётом (3, 4) выражение (1) преобразуется к виду:

$$\delta_{\text{Аи1,2}} = 6 \cdot \frac{(1-\nu)}{E} \cdot \frac{r}{h^2} \cdot \frac{b}{L} \cdot K_y \cdot \sigma_{\text{дт}} [-K_{\text{ко1}}(L+h-C) + K_{\text{ко2}}(L-C)], \quad (5)$$

где  $K_{\text{ко1}}$  – коэффициент корректировки величины максимальных остаточных сжимающих напряжений КШ;  $K_{\text{ко2}}$  – коэффициент корректировки величины максимальных остаточных сжимающих напряжений ШШ.

При равенстве напряжённого состояния галтелей КШ и ШШ, то есть, когда  $K_{\text{ко1}} = K_{\text{ко2}}$ , величина коробления будет зависеть только от конструктивных параметров КВ и определяться по формуле:

$$\delta_{\text{Аи1,2}} = 6 \cdot \frac{(1-\nu)}{E} \cdot \frac{r}{h} \cdot \frac{b}{L} \cdot K_y \cdot \sigma_{\text{дт}} \cdot K_{\text{ко}}. \quad (6)$$

Формула (6) справедлива для случая, когда диаметры всех КШ и ШШ равны между собой и степень их деформационного упрочнения одинакова, при этом отсутствуют остаточные напряжения от предшествующей обработки. В реальных КВ диаметры КШ и ШШ, как правило, отличаются. Кроме того, при ВиУО их упрочнение происходит в разных по интенсивности обработки зонах рабочей камеры. Это приводит к формированию поверхностных слоёв шеек с различным напряжённым состоянием. Изменение напряжённого состояния поверхностного слоя зависит от их расстояния до стенок рабочей камеры [9]. Этот экспериментально установленный факт можно оценить соотношением:

$$K_{\text{д}} = \frac{K_{\text{ко1}}}{K_{\text{ко2}}}, \quad (7)$$

где  $K_{\text{д}} < 1$  – коэффициент диссипации.

С учётом (7) выражение для расчёта величины суммарного коробления КВ, упрочнённого в процессе ВиУО, будет иметь вид, мм:

$$\delta_{\text{Аи1,2}} = 6 \cdot \frac{(1-\nu)}{E} \cdot \frac{r}{h^2} \cdot \frac{b}{L} \cdot K_y \cdot \sigma_{\text{дт}} \cdot K_{\text{ко2}} [-K_{\text{д}}(L+h-C) + (L-C)], \quad (8)$$

Для снижения влияния ППД на величину коробления необходимо, чтобы обеспечивалось равенство условий:

$$R_{\text{к}} - R_{\text{ш}} \cong 3(h_{\text{уш}} - h_{\text{ук}}). \quad (9)$$

В процессе ВиУО обеспечить это условие практически невозможно.

### 3.2 Анализ коробления КВ с применением численного моделирования

Численное моделирование проведено с использованием метода конечных элементов в программе Solid Works. Задача решена в модуле Transient Structural. В качестве материала вала принята сталь 40Х, характеристики которой представлены на рис. 2.

Properties of Outline Row 3: Structural Steel				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
12	Strain-Life Parameters			
20	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa	
21	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa	
22	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa	
23	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	

Рисунок 2 – Характеристики материала 40Х

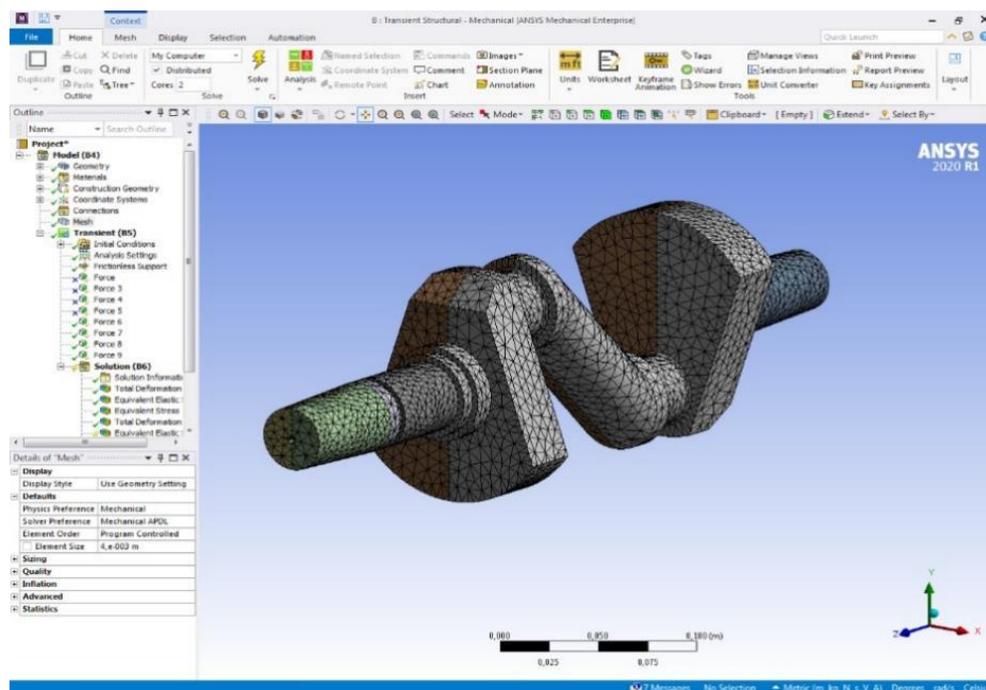


Рисунок 3 – Конечно-элементная сетка

На рис. 3 представлена конечно-элементной сетки. Вал моделировался в условиях импульсной нагрузки, имитирующей виброударное воздействие, с заданием граничных условий и распределение нагрузок симметрично на каждую из половин вала (рис. 4).

В качестве выходных данных приняты следующие параметры: общая деформация, эквивалентные упругие деформации, эквивалентные напряжения (по Мизесу). Основной характеристикой, позволяющей установить адекватность моделирования, является общая деформация (Total Deformation) в точках на поверхностях вала. Исследуются деформации в плоскостях, соответствующих рис. 3, 4. На рис. 5 представлены результаты моделирования деформации вала в процессе после ВиУО.

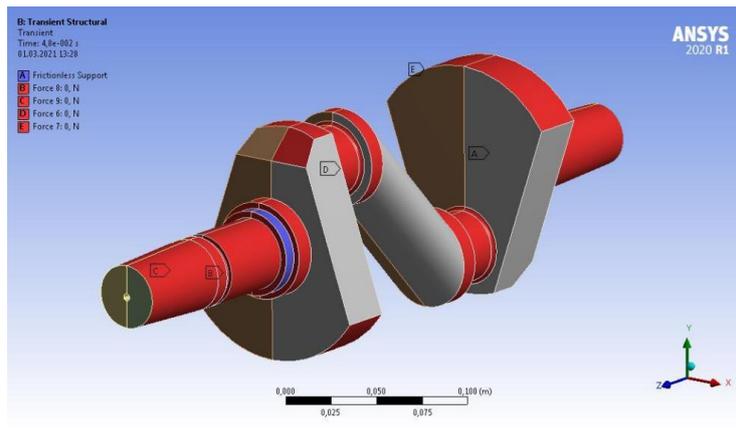


Рисунок 4 – Задание нагрузок

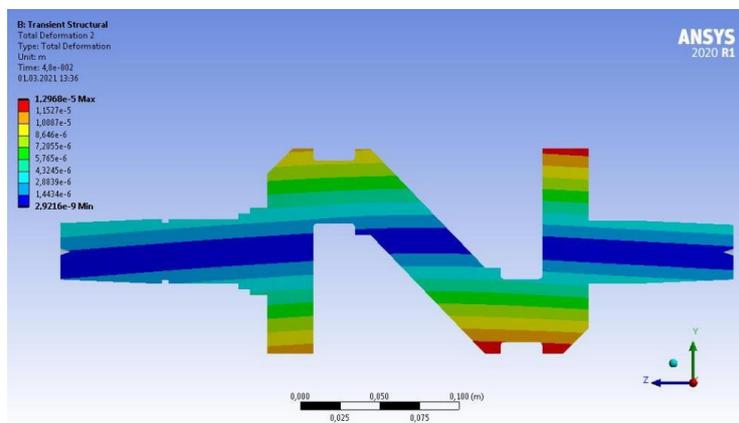


Рисунок 5 – Общие деформации вала после ВиУО, м (сечение по центральной плоскости)

### 3.3 Результаты сравнительного анализа

Сравнительная оценка расчётных и экспериментальных данных коробления проводилась методом численного моделирования на примере КВ, эскиз которого представлен на рис. 6. Размеры КВ:  $r = 37,5$  мм,  $h = 27$  мм,  $L = 254$  мм,  $c = 60$  мм,  $b$  в сечении А-А = 123 мм, в сечении Б-Б = 77 мм, в сечении В-В = 17 мм. В табл. 1 приведены результаты сравнительного анализа коробления КВ после ВиУО. Также построен график зависимости изменения деформаций в сечениях КВ от времени виброударной обработки (рис. 7).

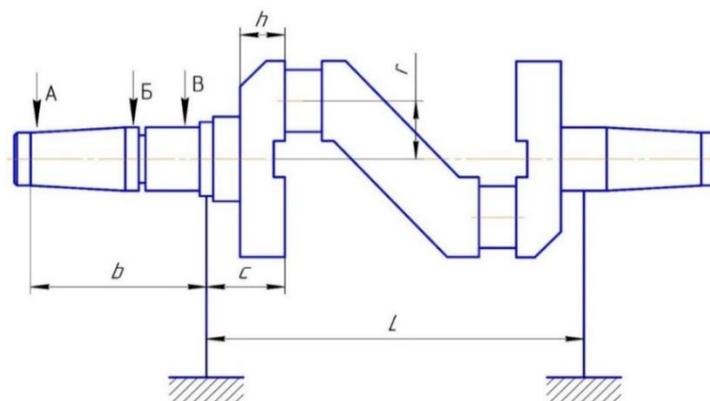


Рисунок 6 – Эскиз КВ

Таблица 1 – Сравнение экспериментальных и теоретических исследований коробления КВ

Метод определения	Величина коробления в сечении, мм		
	А	Б	В
Расчетный по аналитической модели	0,02	0,01	0,005
Численное моделирование	0,016	0,009	0,0005

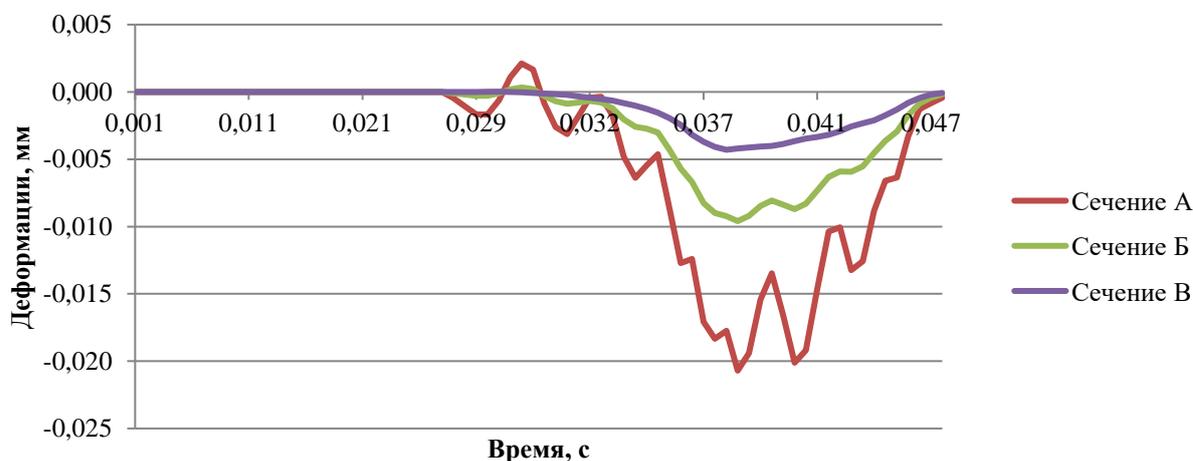


Рисунок 7 – График зависимости изменения деформаций в сечениях КВ от времени

#### 4 Обсуждение и заключение

Проведённый сравнительный анализ результатов численного моделирования и результатов расчетных данных показал их совпадение с относительной погрешностью менее 5 %. Это подтверждает достоверность предложенной аналитической модели для определения величины коробления с высокой точностью, и тем самым обеспечивает правомерность ее использования при оптимизации режимов ВиУО.

#### Список литературы

- 1 Зайдес С.А., Емельянов В.Н. Влияние поверхностного пластического деформирования на качество валов: монография. // Иркутск: Изд-во ИРНИИТУ, 2017. – 380 с.
- 2 Бабичев, А.П. Основы вибрационной обработки // Издательский центр ДГТУ, Ростов н/Д, 1999. – 620 с.
- 3 Емельянов, В.Н. Коробление коленчатых валов при упрочнении галтелей ППД // Известия вузов. Машиностроение, 1972. – №11. – С. 34–37.
- 4 Лебедев, В.А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования // Научное издание – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006/ – 183 с.
- 5 Худобин, Л. В. Направленное изменение макрогеометрии коленчатых валов / Л.В. Худобин, В.Н. Емельянов // Тр. Ульян. Политех ин-та-Т.4, вып. 2. – Ульяновск. приволж. кн.изд-во. Ульян. Отделение, 1968. – С. 40–43.
- 6 Худобин, Л.В. Обкатка галтелей коленчатых валов с учетом их коробления /Л.В. Худобин, В.Н. Емельянов // Вестник Машиностроение, 1970. – №1. – С. 47–49.
- 7 Эль Дакдуки, А. Обеспечение эффективности операций виброударного упрочнения на основе моделирования энергосиловых факторов процесса ППД / В.А. Лебедев, А. Эль Дакдуки, М.А. Белозёров // Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» выпуск № 3 (66), Дон НТУ’ 2019. – С. 22-30.

8 Мищенко, Р.А. Прогнозирование влияния динамических методов поверхностного пластического деформирования на повышение эксплуатационных свойств деталей // Упрочняющие технологии и покрытия. – М: Машиностроение, 2006. – С.53-55.

9 Копылов Ю.Р. Виброударное упрочнение // ВИВД, Воронеж: 1999. – 386 с.

#### References

1 Zaides S.A., Emelianov V.N. Influence of surface plastic deformation on the quality of shafts: monograph, - Irkutsk: Publishing house of IRNITUS, 2017. – P.380.

2 Babichev A. P. Basics of vibration processing – Rostov on Don, Publishing Center of DSTU, 1999. – P. 620.

3 Emelyanov V.N. Warping of crankshafts in strengthening of PPD fillets. Mechanical Engineering, 1972. – No11. – P. 34–37.

4 Lebedev V.A. Technology of dynamic methods of surface plastic deformation. Scientific publication – Rostov n / D: Publishing center of DSTU, 2006. – P.183.

5 Khudobin L.V. Directional change of crankshaft geometries/L.V. Khudobin, V.N. Emelyanov // Proceedings of Ulyanovsk Polytechnic Institute, Vol. 4, issue 2. - Ulyanovsk Volga Region Book Publishing House. Ulyanovsk Branch, 1968. – P. 40-43.

6 Khudobin L.V. Running-in of crankshaft fillets taking into account their warping /L.V. Khudobin, V.N. Emelyanov // Bulletin of Mechanical Engineering, 1970.- No. 1. – P. 47-49.

7 El Dakduki, A. Ensuring the efficiency of vibration impact hardening operations based on modeling the energy and force factors of the SPD process / V.A. Lebedev, A. El Dakduki, M.A. Belozerov // International collection of scientific papers "Progressive technologies and mechanical engineering systems", issue No. 3 (66), DonNTU '2019. – P. 22-30.

8 Mishchenko R.A. Forecasting the influence of dynamic methods of surface plastic deformation on improving the performance properties of parts - Hardening technologies and coatings. - M: Mechanical Engineering, 2006. – P.53-55.

9 Kopylov Yu.R. Vibro-impact hardening. Voronezh: VIVD, 1999. – P. 386.

© Лебедев В. А., Эль Дакдуки А. М., Бажанов В. Н., 2025



2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АСИММЕТРИЧНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КРУТЯЩИХ МОМЕНТОВ МЕЖДУ ПОЛУОСЯМИ ВЕДУЩЕГО МОСТА АВТОМОБИЛЯ**

**THE INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS OF THE ACTUATING ELEMENTS OF AN ASYMMETRIC DIFFERENTIAL ON THE DISTRIBUTION OF TORQUES BETWEEN THE AXLES OF THE DRIVING AXLE OF THE CAR**

✉<sup>1</sup> Волков Владимир Сергеевич, д.т.н., профессор, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: [wl.volkov@yandex.ru](mailto:wl.volkov@yandex.ru)

✉<sup>1</sup> Volkov Vladimir Sergeevich, doctor of technical sciences, professor of Voronezh state forestry university named after G.F. Morozova, Voronezh, e-mail: [wl.volkov@yandex.ru](mailto:wl.volkov@yandex.ru)

Лебедев Евгений Григорьевич, ассистент, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: [lebedev-rti@mail.ru](mailto:lebedev-rti@mail.ru)

Lebedev Evgeniy Grigoryevich, assistant of Voronezh state forestry university named after G.F. Morozova, Voronezh, e-mail: [lebedev-rti@mail.ru](mailto:lebedev-rti@mail.ru)

**Аннотация.** Рассмотрена схема влияния углов скоса плунжеров асимметричного дифференциала повышенного трения на характеристики распределения крутящих моментов между обоями, связанными с полуосями привода ведущих колёс автомобиля. При этом учтено влияние факторов, определяющих нагрузочные режимы контактирующих поверхностей исполнительных элементов дифференциала при допусаемом неравенстве крутящих моментов на полуосях.

**Annotation.** The scheme of the influence of the bevel angles of the plungers of an asymmetric differential with increased friction on the characteristics of the distribution of torques between the clips connected to the drive axles of the driving wheels of the car is considered. At the same time, the influence of factors determining the load conditions of the contacting surfaces of the actuating elements of the differential is taken into account with an acceptable disparity of torques on the axles.

**Ключевые слова:** ДИФФЕРЕНЦИАЛ, ПРИВОД ПОЛУОСИ, КРУТЯЩИЙ МОМЕНТ, ПЛУНЖЕР, ОБОЙМА.

**Keywords:** DIFFERENTIAL, SEMI-AXLE DRIVE, TORQUE, PLUNGER, CAGE.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

**1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы**

Повышение проходимости транспортных машин колёсного исполнения представляет собой важную техническую задачу, определяющую взаимодействие эксплуатационных характеристик используемых в конструкции узлов и агрегатов с их массогабаритными параметрами и показателями экономической эффективности. Применение в ведущих мостах автомобилей

повышенной проходимости симметричных дифференциалов в ряде случаев оказывается малоэффективным вследствие перенаправления всего крутящего момента на забегающую полуось, а использование в таких случаях систем принудительной блокировки межколёсного дифференциала по данным [1, 7] не даёт должного эффекта вследствие конструктивной сложности применяемого устройства, а также, как отмечается в работе [2], вызывающего динамические ударные нагрузки на исполнительные элементы при включении. Как отмечено в работах [3, 8, 11], в значительной мере проходимость автомобиля определяется показателем асимметричности дифференциала, а именно, коэффициентом его блокировки [10]. Областью применения асимметричных, прежде всего, межколёсных асимметричных дифференциалов представляются многочисленные конструкции ведущих мостов транспортных машин повышенной проходимости, используемых в условиях бездорожья. В работах [4, 5, 10] подробно рассмотрен анализ влияния коэффициента блокировки дифференциала на циркуляцию крутящего момента как между ведущими мостами, так и между ведущими колёсами при преодолении труднопроходимых дорожных участков. Авторы работ [6, 15] приводят результаты исследований, касающихся целесообразности использования асимметричных дифференциалов в ведущих мостах полноприводных автомобилей в сравнении с трансмиссиями, оборудованными устройствами, предусматривающими распределение крутящего момента между ведущими колёсами в равных долях по заданным условиям проходимости. В работах [14, 17] авторы затрагивают вопросы влияния нагрузочного режима на оценочные показатели работоспособности и надёжности дифференциалов повышенного трения, однако, во многих перечисленных случаях геометрические параметры нагружаемых элементов принимаются в виде постоянных заранее заданных величин.

#### *Формулировка проблемы исследования*

Как указано в работах [6, 9, 16], на внешние характеристики дифференциалов повышенного трения существенное влияние оказывают геометрические соотношения грузонесущих элементов, определяющие распределение сил и моментов между ведущими и ведомыми полуосями при срабатывании дифференциала во время криволинейного движения автомобиля или при начале пробуксовки одного из колёс. В этом случае может наблюдаться как снижение коэффициента блокировки дифференциала, приближающее его характеристики к аналогичным показателям симметричного дифференциала, так и нежелательное повышение данного коэффициента, вызывающего дополнительные потери мощности, затрачиваемые на преодоление внутреннего трения между сопрягаемыми рабочими поверхностями несущих нагрузку элементов [21]. При этом также большой момент внутреннего трения в межколёсном дифференциале существенно осложняет процесс перехода автомобиля от криволинейной траектории к прямолинейной, на что обращено внимание в работах [10, 19, 22].

Целью настоящей работы является попытка установления влияния углов скоса плунжеров межколёсного дифференциала повышенного трения на его выходные характеристики по работоспособности нагружаемых поверхностей трения и уровню коэффициента блокировки.

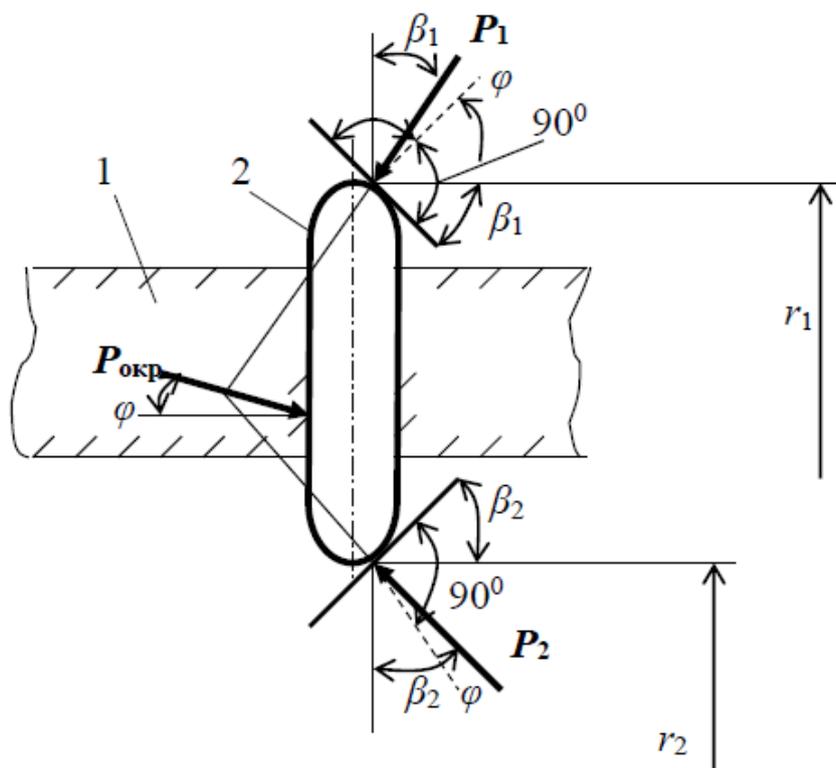
## **2 Материалы и методы**

В общем виде в качестве основной характеристики распределения крутящих моментов между ведущими колёсами транспортного средства используется коэффициент блокировки дифференциала ( $k_b$ ), определяемый по отношению [10]:

$$k_b = \frac{M_{отс} - M_{заб}}{M_{отс} + M_{заб}} = \frac{M_{тр}}{M_{кд}},$$

где  $M_{отс}$  и  $M_{заб}$  – соответственно моменты на отстающем и забегающем карданных валах привода ведущих мостов, Н·м;  $M_{тр}$  – момент внутреннего трения в дифференциале, Н·м;  $M_{кд}$  – момент, подводимый к коробке дифференциала, Н·м.

Применительно к конструкции асимметричного дифференциала, предусматривающего распределение крутящего момента между полуосями на основе повышенного трения [13] между исполнительными элементами, согласно расчётной схеме, показанной на рис. 1, процесс срабатывания дифференциала базируется на взаимодействии плунжера 2, связанного с ведущей обоймой коробки дифференциала 1 и кулачками наружной и внутренней ведомых обойм, связанных с полуосями ведущего моста. Согласно представленной на рис. 1 схеме, на плунжер действуют силы: со стороны наружной кулачковой обоймы  $P_1$ , со стороны внутренней кулачковой обоймы  $P_2$ , со стороны ведущей обоймы (води́ла)  $P_{окр}$ . При срабатывании дифференциала указанные силы действуют под углом трения  $\varphi$ . Действие таких сил образует треугольник, определяющий величину коэффициента блокировки дифференциала.



1 – коробка дифференциала; 2 – плунжер;  $P_1$  и  $P_2$  – соответственно силы, действующие на плунжер от наружной и внутренней обойм полуосей;  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – соответственно углы скоса плунжеров по контактам с кулачками наружной и внутренней обойм;  $P_{окр}$  – окружная сила, прикладываемая к плунжеру со стороны коробки дифференциала;  $\varphi$  – угол отклонения векторов сил  $P_1$  и  $P_2$  от оси, перпендикулярной к плоскости взаимодействия кулачков обойм и плунжера

Рисунок 1 – Схема к расчёту сил взаимодействия обойм полуосей и плунжера

Из треугольника сил  $P_{окр}$ ,  $P_1$  и  $P_2$ , действующих на плунжер, согласно теореме синусов [18]:

$$\frac{P_1}{\sin[90^\circ - (\beta_2 + 2\varphi)]} = \frac{P_2}{\sin[90^\circ - (\beta_1 - 2\varphi)]}$$

откуда сила, действующая на плунжер со стороны внутренней обоймы

$$P_2 = P_1 \frac{\sin[90^\circ - (\beta_1 - 2\varphi)]}{\sin[90^\circ - (\beta_2 + 2\varphi)]} = P_1 \frac{\cos(\beta_1 - 2\varphi)}{\cos(\beta_2 + 2\varphi)}$$

Если предположить, что отстающее колесо автомобиля связано с внутренней кулачковой обоймой, то действующий на нее момент:

$$M_{отс} = P_2 \sin(\beta_2 + \varphi) r_2,$$

где  $r_2$  – радиус точки приложения силы  $P_2$ .

Таким же образом можно определить момент, действующий на наружную кулачковую обойму, связанную с забегающим колесом:

$$M_{заб} = P_1 \sin(\beta_1 + \varphi) r_1,$$

где  $r_1$  – радиус точки приложения силы  $P_1$ .

Тогда коэффициент блокировки дифференциала определится из выражения:

$$k_6 = \frac{M_{отс} - M_{заб}}{M_{отс} + M_{заб}} = \frac{P_2 \sin(\beta_2 + \varphi) r_2 - P_1 \sin(\beta_1 - \varphi) r_1}{P_2 \sin(\beta_2 + \varphi) r_2 + P_1 \sin(\beta_1 - \varphi) r_1},$$

Также в развёрнутом виде можно выразить зависимость коэффициента блокировки дифференциала от его геометрических параметров:

$$k_6 = \frac{\cos(\beta_1 - 2\varphi) \cdot \sin(\beta_2 + \varphi) r_2 - \cos(\beta_2 + 2\varphi) \cdot \sin(\beta_1 - \varphi) r_1}{\cos(\beta_1 - 2\varphi) \cdot \sin(\beta_2 + \varphi) r_2 + \cos(\beta_2 + 2\varphi) \cdot \sin(\beta_1 - \varphi) r_1}.$$

Из приведённого уравнения видно, что при  $\beta_1 = \varphi$  коэффициент блокировки  $k_6 = 1$ , то есть дифференциал будет заблокирован.

При этом момент внутреннего трения в дифференциале определяется выражением:

$$M_{тр} = P_2 \sin(\beta_2 + \varphi) r_2 - P_1 \sin(\beta_1 - \varphi) r_1,$$

из которого следует, что при постоянном значении угла  $\varphi$  и кратном соотношении радиусов  $r_1$  и  $r_2$ , момент  $M_{тр}$  зависит как от сил, образующихся от взаимодействия обойм дифференциала и плунжера, так и от соотношения углов  $\beta_1$  и  $\beta_2$  наклона векторов этих сил к оси, проходящей через точки их приложения к плунжеру.

Для сохранения одинаковых значений крутящих моментов на отстающей полуоси при поворотах автомобиля в разные стороны должно соблюдаться условие:

$$\frac{r_1}{\beta_1} = \frac{r_2}{\beta_2} \text{ или } \frac{r_1}{r_2} = \frac{\beta_1}{\beta_2},$$

иначе при поворотах автомобиля в разные стороны при отсутствии пробуксовки ведущих колёс крутящие моменты на внутренних по отношению к центру поворота автомобиля ведущих колёсах могут различаться, что может существенно осложнить управление автомобилем.

В конструкции кулачково-плунжерного дифференциала автомобиля ГАЗ-4901  $r_1 = 2r_2$ , угол трения  $\varphi = 6^\circ$ ,  $\beta_1 = 15^\circ$ ,  $\beta_2 = 30^\circ$ , коэффициент блокировки дифференциала  $k_6 = 0,3$ , то есть при срабатывании дифференциала в момент начала пробуксовки одного из колёс на забегающую полуось будет приходиться 30 % от момента, подводимого к коробке дифференциала.

В связи с тем, что срабатывание асимметричного дифференциала осуществляется на основе внутреннего трения, между правым и левым ведущими колёсами возникает циркуляция мощности, определяемая по формуле:

$$N_{ц} = \frac{(M_{отс} - M_{заб})(V_{отс} + V_{заб})}{2000},$$

где  $V_{отс}$  и  $V_{заб}$  – линейные скорости соответственно отстающего и забегающего колёс,  $c^{-1}$ ;  $r_k$  – радиус колеса, м.

С учётом того, что  $M_{отс} - M_{заб} = M_{тр}$ , а линейная скорость колеса  $V_k = 2\pi r_k n_k$ , где  $n_k$  – частота вращения колеса,  $мин^{-1}$ , связь мощности, циркулирующей между ведущими колёсами, и скорости автомобиля можно выразить уравнением:

$$N_{ц} = \frac{M_{тр} V_a}{1000},$$

где  $V_a$  – скорость автомобиля, м/с, определяемая как  $0,5(V_{отс} + V_{заб})$ .

По соотношению моментов, подводимым к наружной и внутренней обоймам, соответственно связанным с забегающим и отстающим колёсами ведущего моста, получается:

$$\frac{M_{отс}}{M_{заб}} = \frac{P_{z\ отс} k_x - (r_{k\ отс} - r_{k\ заб}) - \left( P_{окр} f_k + \frac{J_k j_a}{r_k r_d} \right) k_x}{P_{z\ заб} k_x + (r_{k\ отс} - r_{k\ заб}) + \left( P_{окр} f_k + \frac{J_k j_a}{r_k r_d} \right) k_x},$$

где  $j_a$  – ускорение автомобиля,  $м/с^2$ ;  $J_k$  – момент инерции колеса относительно оси его вращения,  $кг \cdot м^2$ ;  $r_d$  – радиус посадочного обода диска колеса, м;  $f_k$  – коэффициент сопротивления качению колеса;  $P_{z\ отс}$  и  $P_{z\ заб}$  – соответственно вертикальные нагрузки на отстающее и забегающее колесо, Н;  $k_x$  – коэффициент тангенциальной эластичности шины.

### 3 Результаты исследований

Из приведенных аналитических зависимостей можно заключить, что величина циркулирующей между ведущими колёсами мощности  $N_{ц}$ , определяется моментом внутреннего трения в дифференциале  $M_{тр} = M_{отс} - M_{заб}$ , радиусом колеса  $r_k$ , а также разностью угловых скоростей отстающего и забегающего колёс. Применительно к конструкции автомобиля ГАЗ-4901 зависимость циркулирующей между колёсами мощности от скорости автомобиля при его движении по криволинейной траектории показана на рис. 2.

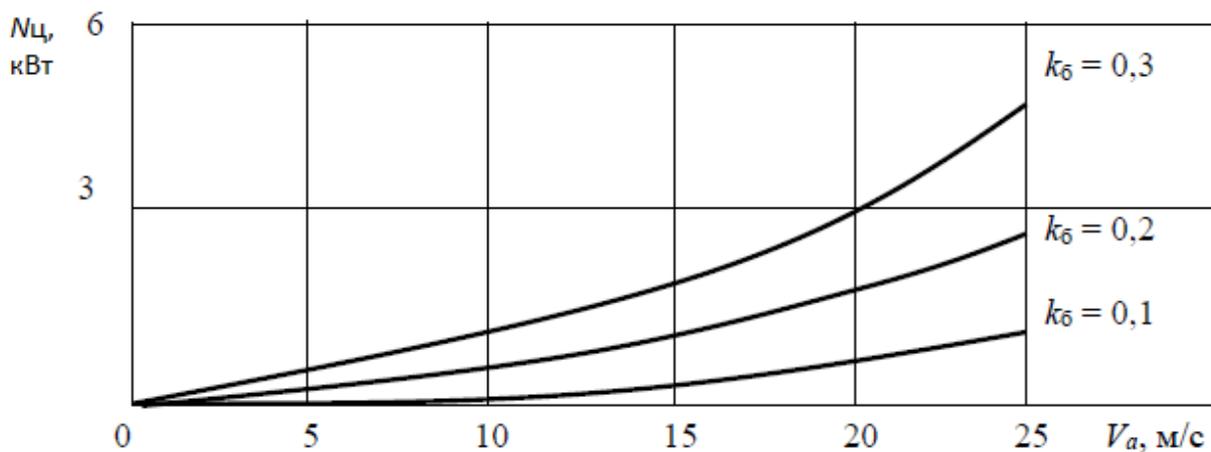


Рисунок 2 – Зависимость мощности, циркулирующей между ведущими колёсами от скорости автомобиля при разных значениях коэффициента блокировки дифференциала  $k_\delta$

Как видно из рис. 2, циркуляция мощности между ведущими колёсами автомобиля нелинейно возрастает при увеличении скорости автомобиля. При этом такая зависимость происходит тем значительнее, чем больше коэффициент блокировки дифференциала. Следовательно, чем с большей скоростью движется автомобиль, тем сильнее нагружаются шины, полуоси и грузонесущие элементы дифференциала – плунжеры и обоймы полуосей.

С учётом того, что момент трения в асимметричном дифференциале можно рассматривать как функцию его геометрических параметров, из которых углы скоса плунжера и обойм связаны соотношением  $\beta_1 = 0,5\beta_2$ , вариативную роль может выполнять угол трения  $\varphi$ . При этом расчётная величина коэффициента блокировки кулачково-плунжерного дифференциала от угла трения  $\varphi$  может иметь вид, представленный на рис. 3.

Как видно из данного рисунка, увеличение угла трения  $\varphi$  способствует значительному росту момента внутреннего трения в дифференциале, при этом такое увеличение момента идёт тем значительнее, чем больше происходит возрастание угла трения между рабочими поверхностями плунжера и кулачков наружной и внутренней обойм. При этом возрастание уровня коэффициента  $k_6$  также способствует возрастанию момента внутреннего трения в дифференциале, а, следовательно, и силовых нагрузок его рабочих поверхностей.

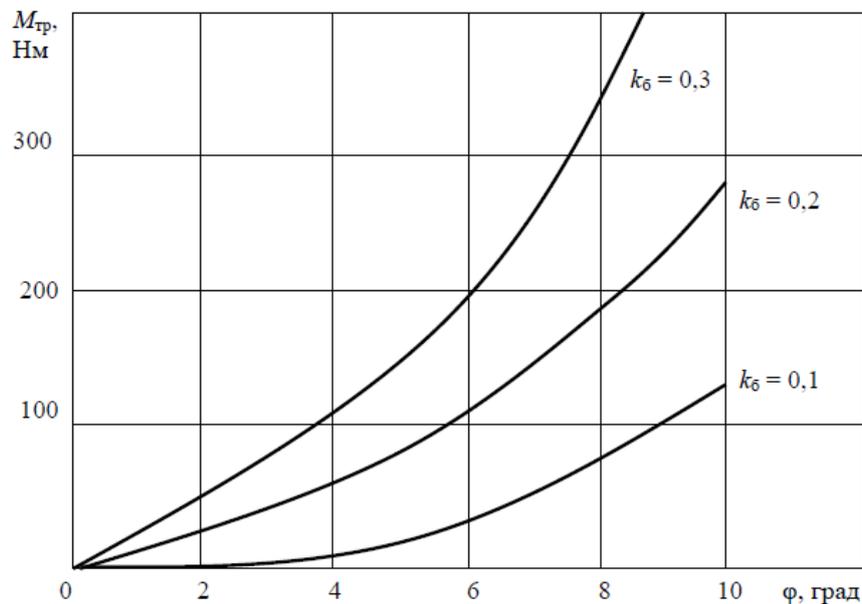


Рисунок 3 – момента  $M_{тр}$  трения в дифференциале от угла  $\varphi$  трения между плунжером и рабочими поверхностями обойм

Значительные силовые нагрузки, возникающие при срабатывании дифференциала данного типа, вызывают на рабочих поверхностях плунжера и кулачках обойм определённые напряжения, способные снизить их ресурс или нарушить работоспособность всего узла.

Оценка работоспособности элементов асимметричного кулачково-плунжерного дифференциала производится на смятие в зонах контактов плунжеров и кулачков обойм в варианте наибольшего нагружения, существующего при прямолинейном движении автомобиля.

Тогда напряжения смятия в зоне контакта плунжера с наружной кулачковой обоймой можно определить по зависимостям [17]:

$$\sigma_{см} = 0,418k_6 \sqrt{\frac{P_1 E}{l_{к1}} \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)},$$

для контакта плунжера с внутренней кулачковой обоймой

$$\sigma_{см} = 0,418k_{\delta} \sqrt{\frac{P_2 E}{l_{к2}} \left( \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right)},$$

где  $E$  – модуль упругости материала первого рода, для применяемых материалов  $E = 210$  ГПа;  $l_{к}$  – длина линии контакта плунжера и кулачка, м;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – соответственно радиусы кривизны плунжера и соприкасающегося с ним кулачка, м.

Определение сил  $P_1$  и  $P_2$  должно производиться для случаев передачи крутящего момента от двигателя и от реализации сил сцепления ведущих колес с дорогой. Для материала плунжеров и кулачков при использовании стали 40ХФА допустимые напряжения смятия согласно [12] находятся в пределах  $[\sigma_{см}] = 610 \dots 820$  МПа; для стали 20ХГНР  $[\sigma_{см}] = 540 \dots 750$  МПа.

Ресурс рабочих поверхностей плунжеров и кулачков обойм находится в зависимости от действующих на эти поверхности сил и вызываемых ими напряжений, а также свойств используемых для их изготовления материалов, а также последующей термообработки. При этом уровень напряжений, возникающих на рабочих поверхностях элементов, определяется как действующими силовыми факторами, так и такими геометрическими параметрами, как длина контактной линии зоны трения  $l_{к}$  и радиусы  $\rho_1$  и  $\rho_2$  кривизны рабочих поверхностей плунжера и кулачков внутренней и наружной обойм полуосей. На рис. 4 показана зависимость напряжений смятия, возникающих на контактирующих поверхностях плунжера и кулачках внутренней и наружной обойм, от длины контактной линии  $l_{к}$  при разных значениях коэффициента блокировки дифференциала  $k_{\delta}$ . Величина подводимого к коробке дифференциала от двигателя составляла 3600 Нм, при этом остальные параметры соответствовали данным трансмиссии ГАЗ-4901.

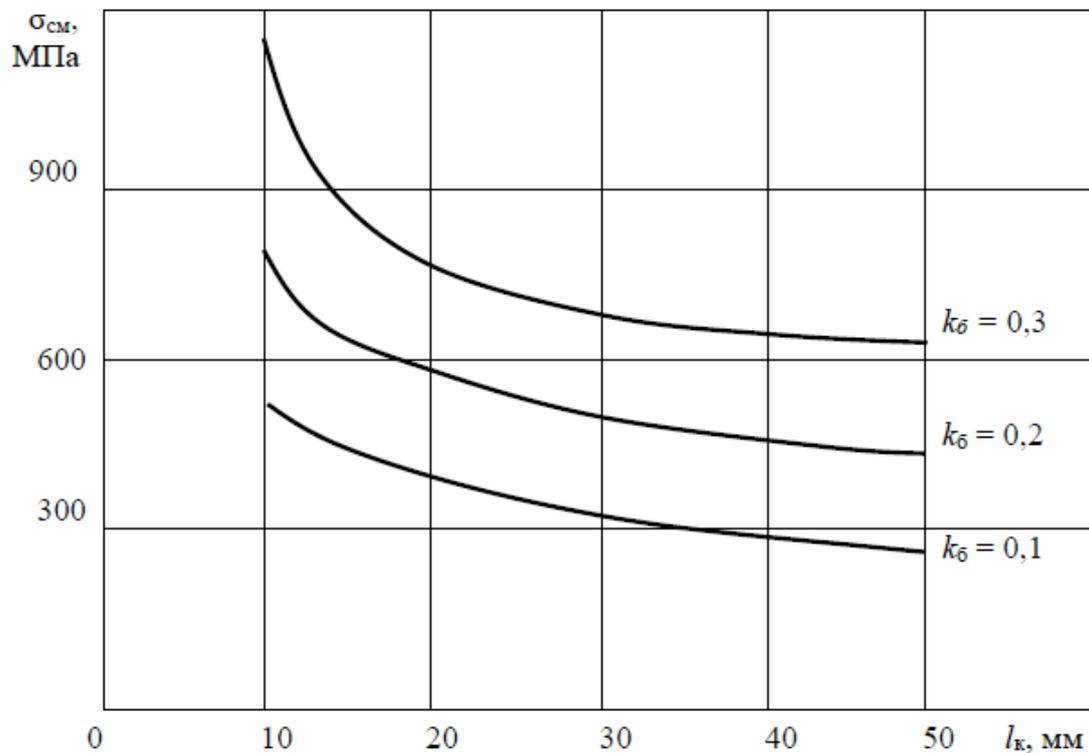


Рисунок 4 – Зависимость напряжений смятия, возникающих на рабочих поверхностях плунжеров и кулачках обойм от длины контактной линии их соприкосновения при разных значениях коэффициента блокировки дифференциала

Как видно из рис. 4, напряжения смятия, возникающие в зонах контактов плунжеров и кулачков обойм полуосей, находятся в нелинейной обратной зависимости от длины  $l_k$  контактной поверхности, при этом данные напряжения тем выше, чем большую величину имеет коэффициент блокировки дифференциала. С учётом того, что при использовании рабочих деталей дифференциала стали 40ХФА, имеющей допускаяемые напряжения смятия в пределах  $[\sigma_{см}] = 610 \dots 820$  МПа, при длине контактной линии  $l_k = 30$  мм, при коэффициенте блокировки дифференциала  $k_6 = 0,3$ , запас прочности деталей находится на достаточно низком уровне, что оказывает негативное влияние на ресурс всего рассматриваемого узла. При меньших величинах коэффициента блокировки дифференциала напряжения на контактирующих поверхностях снижаются, что способствует увеличению запаса прочности деталей и, соответственно, ресурсу узла. Предметом дальнейшего поиска по результатам данной работы может быть определение оптимальной величины коэффициента блокировки межколёсного дифференциала, при котором возможно некоторое снижение напряжений в зонах контакта плунжеров и кулачков обойм полуосей.

#### 4 Обсуждение и заключение

Результаты работы по оценке влияния характеристик межосевого дифференциала на распределение крутящих моментов между ведущими осями обсуждались на научно-практических конференциях, проводимых в Воронежском государственном лесотехническом университете имени Г.Ф. Морозова в 2020-2024 годах и в Орловском государственном университете в 2022 и 2023 годах. При этом было отмечено, что наличие асимметричного межколёсного дифференциала, способствует повышению проходимости автомобиля, однако приводит к определённым затратам мощности на циркуляцию момента между ведущими колёсами. Авторам данной работы было указано, что по направлению дальнейших действий следует уделить большее внимание вопросам поиска оптимальной величины коэффициента блокировки дифференциала, позволяющей повысить ресурс узла без заметного ухудшения проходимости автомобиля. Авторами работы было выражено согласие с данным замечанием, однако при этом было пояснено, что при поиске оптимальной величины коэффициента блокировки межколёсного дифференциала необходимо учитывать нагрузочные условия, действующие как со стороны двигателя, так и со стороны дороги по задаваемым характеристикам дорожных условий. При обсуждении результатов работы отмечалось, что по сведениям, показанным на рис. 2 и 3, может быть осуществлён анализ влияния потерь мощности, расходуемой на циркуляцию момента между ведущими колёсами, на показатели топливной экономичности автомобиля.

##### *Заключение*

1 Принудительная блокировка межколёсного дифференциала в главной передаче автомобиля при движении в сложных дорожных условиях на данный момент развития конструкторских решений представляет достаточно сложную задачу.

2 Работа асимметричного дифференциала в главной передаче автомобиля вызывает циркуляцию мощности между ведущими колёсами при криволинейном движении автомобиля, величина которой возрастает с увеличением его скорости.

3 Величина коэффициента блокировки асимметричного дифференциала существенно влияет на потери мощности на преодоление внутреннего трения и на ресурс сопрягаемых деталей.

4 В дальнейшей работе целесообразно сосредоточить внимание на определении оптимальной величины коэффициента блокировки асимметричного межколёсного дифференциала, позволяющей снизить потери мощности на циркуляцию между ведущими колёсами без ухудшения показателей проходимости автомобиля.

Список литературы

- 1 Антонов, Д. А. Теория движения многоосных автомобилей / Д.А. Антонов. - М.: Машиностроение, 1978. – 216 с.
- 2 Аксенов, П. В. Многоосные автомобили / П. В. Аксенов. - М.: Машиностроение, 1980. – 207 с.
- 3 Агейкин, Я. С. Проходимость автомобилей / Я.С. Агейкин. - М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
- 4 Андреев, А. Ф. Дифференциалы колёсных машин / А.Ф. Андреев, В.В. Ванцевич, А.Х. Лефаров; под общ. редакцией А.Х. Лефарова. – М.: Машиностроение, 1987. – 176 с.
- 5 Андреев, А. Ф. Статическая поворотливость полноприводных колёсных машин с дифференциальным межосевым приводом / А.Ф. Андреев, А.Х. Лефаров. - Автотракторостроение. - Минск: Вышэйша школа, 1978, вып. 11. С. 117-125.
- 6 Бухарин, Н. А. Автомобили. Конструкция, нагрузочные режимы, рабочие процессы, прочность агрегатов автомобиля. Учебное пособие для вузов. / Н.А. Бухарин, В.С. Прозоров, М.М. Щукин. – Л.: Машиностроение, 1973. – 504 с.
- 7 Волков, В. С. Специализированный подвижной состав автомобильного транспорта: учебное пособие для вузов / В.С. Волков. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 216 с.
- 8 Лефаров, А. Х. Дифференциалы автомобилей и тягачей / А.Х. Лефаров. - М.: Машиностроение, 1972. – 147 с.
- 9 Гришкевич, А. И. Автомобили. Теория. Учебник для вузов / А.И. Гришкевич. - Минск: Вышэйша школа, 1986. – 208 с.
- 10 Литвинов, А. С. Управляемость и устойчивость автомобиля / А.С. Литвинов. – М.: Транспорт, 1971. – 416 с.
- 11 Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем: учебник для вузов / В. П. Тарасик. – Минск, дизайн ПРО, 2004. – 640 с.
- 12 Тарасик, В. П. Моделирование дифференциальных приводов ведущих колёс мобильных машин / В. П. Тарасик, Пузанова О.В., Курстак В.И. – Вестник Белорусско-Российского университета, 2009, № 3 (24). – С. 42-52.
- 13 Круташов, А. В. Дифференциал повышенного трения плюс ПБС. Энергетическая эффективность распределения мощности / А.В. Круташов. //Автомобильная промышленность, 2011, №1. С. 11-13.
- 14 Круташов А.В., Баулина Е.Е., Серебряков В.В. Цилиндрический дифференциал с сателлитами непрерывного чередования (дифференциал «Квайф»). Конструкция, расчёт зацепления, расчёт коэффициента блокировки. - М: Тракторы и сельхозмашины, 2014 – 58 с.
- 15 Лукин, П. П. Конструирование и расчет автомобиля. Учебник для студентов ВТУЗов, обучающихся по специальности "Автомобили и тракторы" / П.П. Лукин, Г.А. Гаспарянц, В.Ф. Родионов. – М.: Машиностроение, 1984 – 376 с.
- 16 Афанасьев, Б.А. Проектирование полноприводных колесных машин: Учебник для вузов / Б.А. Афанасьев, Б.Н. Белоусов, Г.И. Гладов; под ред. А.А. Полуняна. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008 – 496 с.
- 17 Селифонов, В. В. Многоцелевые полноприводные АТС и дифференциал повышенного трения / В.В. Селифонов, А.В. Круташов, Е.Е. Баулина. // Автомобильная промышленность, 2005, №3. – С. 25-29.
- 18 Gethoffen H. Einsatz von Mikroprozessoren in der Nachrichtentechnik. Mikroprozessoren und ihre Anwendungen. / H. Gethoffen // Hrsg. von W. Hiibert und R. Piloty. Munchen, Wien, R. Oldenbourg Verlag, 1977.
- 19 Konig, R. Schmiertechnik / R. Konig. – Springer, 1972 – p.164. 32 Lange F. H. Signale und Systeme / F. H. Lange. - Bd. 1,2. - Berlin: VEB Verlag Technik, 1975.
- 20 Mikell, Processes, and Systems / P. Mikell. - John Wiley & Sons, 2010 - p. 1024 34 Pacejka H.B. Some recent investigations into dynamics and frictional behavior of pneumatic tires / H.B. Pacejka// Phys. Tire tract: Theory and Exp. - New-York - London, 1974.
- 21 Rabiner R. Theory and Application of Digital Signal Processing / R. Rabiner, B. Gold. -New York, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, 1975.
- 22 Wittel, H. Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung - Lehrbuch und Tabellenbuch / H. Wittel, D. Muhs, D. Jannasch. - Vieweg+Teubner Verlag, 2011.

References

- 1 Antonov, D. A. Theory of motion of multi-axle vehicles / D. A. Antonov. - M.: Mashinostroenie, 1978. - 216 p.
- 2 Aksenov, P. V. Multi-axle vehicles / P. V. Aksenov. - M.: Mashinostroenie, 1980. - 207 p.

- 3 Ageikin, Ya. S. Cross-country ability of vehicles / Ya. S. Ageikin. - M.: Mashinostroenie, 1981. - 232 p.
- 4 Andreev, A. F. Differentials of wheeled vehicles / A. F. Andreev, V. V. Vantsevich, A. Kh. Lefarov; under the general editorship of A. Kh. Lefarov. - M.: Mashinostroenie, 1987. - 176 p.
- 5 Andreev, A. F. Static turning ability of all-wheel drive wheeled vehicles with differential interaxle drive / A. F. Andreev, A. Kh. Lefarov. - Automotive and tractor manufacturing. - Minsk: Higher School, 1978, issue 11. Pp. 117-125.
- 6 Bukharin, N. A. Automobiles. Design, load conditions, working processes, strength of vehicle units. Textbook for universities. / N. A. Bukharin, V. S. Prozorov, M. M. Shchukin. - L.: Mechanical Engineering, 1973. - 504 p.
- 7 Volkov, V. S. Specialized rolling stock of automobile transport: textbook for universities / V. S. Volkov. - St. Petersburg: Lan, 2023. - 216 p.
- 8 Lefarov, A.Kh. Differentials of cars and tractors / A.Kh. Lefarov. - M.: Mashinostroenie, 1972. - 147 p.
- 9 Grishkevich, A.I. Cars. Theory. Textbook for universities / A.I. Grishkevich. - Minsk: Vysheysya shkola, 1986. - 208 p.
- 10 Litvinov, A.S. Controllability and stability of the car / A.S. Litvinov. - M.: Transport, 1971. - 416 p.
- 11 Tarasik, V.P. Mathematical modeling of technical systems: textbook for universities / V.P. Tarasik. - Minsk, design PRO, 2004. - 640 p.
- 12 Tarasik, V. P. Modeling of differential drives of driving wheels of mobile machines / V. P. Tarasik, O. V. Puzyanova, V. I. Kurstak. - Bulletin of the Belarusian-Russian University, 2009, No. 3 (24). - P. 42-52.
- 13 Krutashov, A. V. Limited slip differential plus LSD. Energy efficiency of power distribution / A. V. Krutashov. // Automobile industry, 2011, No. 1. P. 11-13.
- 14 Krutashov A. V., Baulina E. E., Serebryakov V. V. Cylindrical differential with continuous alternation satellites (differential "Quaif"). Design, engagement calculation, locking coefficient calculation. - M: Tractors and agricultural machinery, 2014 – 58 p.
- 15 Lukin, P. P. Design and calculation of the car. Textbook for students of higher technical educational institutions studying in the specialty "Cars and tractors" / P. P. Lukin, G. A. Gasparyanc, V. F. Rodionov. - M.: Mechanical Engineering, 1984 – 376 p.
- 16 Afanasyev, B. A. Design of all-wheel drive wheeled vehicles: Textbook for universities / B. A. Afanasyev, B. N. Belousov, G. I. Gladov; edited by A. A. Polungyan. - M.: Bauman Moscow State Technical University, 2008 – 496 p.
- 17 Selifonov, V. V. Multipurpose all-wheel drive vehicles and limited slip differential / V. V. Selifonov, A.V. Krutashov, E.E. Baulina. // Automotive industry, 2005, No. 3. – pp. 25-29.
- 18 Gethoffen H. Einsatz von Mikroprozessoren in der Nachrichtentechnik. Mikroprozessoren und ihre Anwendungen. / H. Gethoffen // Hrsg. von W. Hiibert und R. Piloty. Munchen, Wien, R. Oldenbourg Verlag, 1977.
- 19 Konig, R. Sehmiertechnik / R. Konig. – Springer, 1972 – p.164. 32 Lange F. H. Signale und Systeme / F. H. Lange. - Bd. 1.2. - Berlin: VEB Verlag Technik, 1975.
- 20 Mikell, Processes, and Systems / P. Mikell. - John Wiley & Sons, 2010 - p. 1024 34 Pacejka H.B. Some recent investigations into dynamics and frictional behavior of pneumatic tires / H.B. Pacejka // Phys. Tire tract: Theory and Exp. - New-York - London, 1974.
- 21 Rabiner R. Theory and Application of Digital Signal Processing / R. Rabiner, B. Gold. -New York, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, 1975.
- 22 Wittel, H. Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung - Lehrbuch und Tabellenbuch / H. Wittel, D. Muhs, D. Jannasch. - Vieweg+Teubner Verlag, 2011.



УДК 656.1

UDC 656.1

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**ВЛИЯНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ НА АВАРИЙНОСТЬ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ФЕДЕРАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ**

**THE IMPACT OF THE RESULTS OF ROAD CONSTRUCTION WORK ON THE ACCIDENT RATE OF FEDERAL MOTORWAYS**

**Новиков Иван Алексеевич**, д.т.н., профессор, директор Транспортно-технологического института Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова, г. Белгород.

**Novikov Ivan Alekseevich**, doctor of technical sciences, professor, director of the Transportation technology institute (Belgorod state technological university named after V. G. Shukhov), Belgorod.

✉<sup>1</sup> **Печатнова Елена Владимировна**, к.т.н., доцент кафедры «Организация и безопасность движения», Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, г. Барнаул, e-mail: [phukcia@yandex.ru](mailto:phukcia@yandex.ru)

✉<sup>1</sup> **Pechatnova Elena Vladimirovna**, candidate of technical sciences, associate professor of the department «Organization and safety of traffic», Altai state technical university named after I. I. Polzunov, Barnaul, e-mail: [phukcia@yandex.ru](mailto:phukcia@yandex.ru)

**Кирышин Иван Иванович**, старший преподаватель кафедры информатики и специальной техники, Барнаульский юридический институт МВД России, г. Барнаул.

**Kiryushin Ivan Ivanovich**, senior lecturer at the department of computer science and special technology, Barnaul law institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Barnaul.

**Еськов Александр Васильевич**, д.т.н., профессор, начальник кафедры информационной безопасности, Краснодарский университет МВД Российской Федерации, г. Краснодар.

**Eskov Alexander Vasilievich**, doctor of technical sciences, professor, head of the department of information security, Krasnodar university of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, Krasnodar.

**Аннотация.** Дорожно-строительные работы являются одним из условий обеспечения безопасности дорожного движения. В работе определено влияние реконструкции (с увеличением числа полос без ограждения, разделяющего транспортные потоки), капитального ремонта (с увеличением числа полос с разделяющим ограждением и без него; без увеличения числа полос) и ремонта моста на изменение числа учетных ДТП. Методом исследования выступил расчет коэффициента изменения аварийности с помощью статистического сравнения «до» и «после».

**Annotation.** Road construction works are one of the conditions for ensuring road safety. The work determines the impact of reconstruction (with an increase in the number of lanes without barriers separating traffic flows), major repairs (with an increase in the number of lanes with and without barriers; without an increase in the number of lanes) and bridge repairs on changes in the number of registered accidents. The method of research was the calculation of the coefficient of change in accidents using a statistical comparison of "before" and "after".

**Ключевые слова:** ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНАЯ АВАРИЙНОСТЬ, ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ, РЕКОНСТРУКЦИЯ, КАПИТАЛЬНЫЙ РЕМОНТ, АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ ФЕДЕРАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ.

**Keywords:** ROAD ACCIDENTS, ROAD TRAFFIC ACCIDENTS, ROAD CONSTRUCTION WORKS, RECONSTRUCTION, MAJOR REPAIRS, FEDERAL ROADS.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

## 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Дорожная деятельность является одним из ведущих направлений, обеспечивающим безопасность и качество автомобильных перевозок [1, 2]. Дорожно-строительные работы оказывают комплексное воздействие на безопасность дорожного движения (БДД), которое может носить как негативный (временное ухудшение условий движения), так и позитивный характер (долгосрочное улучшение параметров дороги) [3, 4].

В соответствии с ОДМ 218.4.031-2016 дорожная деятельность включает в себя 6 направлений: деятельность по проектированию, строительству, реконструкции, капитальному ремонту, ремонту и содержанию автомобильных дорог и дорожных сооружений<sup>1</sup>. Каждое из направлений играет определенную роль в обеспечении безопасности дорожного движения. Наибольшую роль играют проведения работ по реконструкции, капитальному ремонту и ремонту автомобильных дорог и искусственных сооружений, поскольку связаны со значительными изменениями в движении транспортного потока. Именно эти направления далее будут рассматриваться в работе.

Рассмотрим основные работы посвящённые связи дорожно-строительных работ с безопасностью дорожного движения.

В [5] указывается, что плохое состояние обочин и мостов является сопутствующей причиной ДТП в 10-12 % ДТП, неровность покрытия – до 25 % ДТП (в работе [6] – 13-18 %), в связи с чем подчеркивается качественный подход к проектированию, строительству и содержанию дорог. В работах [7–11] указывается, что неудовлетворительное состояние дорожного покрытия увеличивает риск столкновений транспортных средств. В исследованиях [12, 13] указывается значимость проведения дорожно-строительных работ, в частности, в обновлении разметки, устранении дефектов дорожного покрытия, установке дорожных знаков.

Оценка влияния дорожно-ремонтных работ на безопасность движения рассмотрена в работе [14], в частности, представлены графики вероятности снижения ДТП при ямочном ремонте, при ремонте с устройством выравнивающего слоя, при устройстве нового дорожного покрытия. В работе [15] указывается, что устройство многополосных дорог при растущей интенсивности может не только способствовать снижению аварийности, но и снижать влияние геометрии на риск ДТП. Результаты оценки эффективности мероприятий по повышению безопасности дорожного движения методом выгод и затрат рассмотрены в работе [16].

Вопросы обеспечения безопасности дорожного движения в местах производства дорожных и иных работ рассмотрены в работах [17-19], приводятся отдельные результаты анализа статистических данных. В работе [20] указывается, что наибольшее число ДТП происходит в зоне отгона (44 %) и зоне безопасности (33 %). Среди видов ДТП наиболее распространены наезды на ограждающие и направляющие устройства (33 %) и наезды на дорожные машины и механизмы (11 %). Особенности организации безопасности движения во время капитального ремонта на участке автомобильной дороги Р-257 «Енисей» Красноярск – Абакан –

---

<sup>1</sup> ОДМ 218.4.031-2016 Рекомендации по организации и проведению ведомственного контроля (мониторинга) качества при выполнении дорожных работ на автомобильных дорогах общего пользования федерального значения

Кызыл рассмотрены в работе [21], рассмотрены основные требования к организации ремонтных работ на участке.

Обзор показал, что многие исследования содержат результаты, подчеркивающие значимость проведения дорожно-строительных работ, отдельные работы посвящены влиянию недостатков содержания дорог на вероятность ДТП. При этом определен недостаток теоретических результатов оценки влияния проведения дорожно-строительных работ на изменение показателей аварийности.

Целью работы является оценка влияния дорожно-строительных работ (капитального ремонта, реконструкции и ремонта искусственных сооружений) на изменение числа учетных ДТП на примере автомобильных дорог федерального значения в Алтайском крае.

## 2 Материалы и методы

Для определения изменения аварийности после проведения дорожно-строительных работ выбрана методика расчета коэффициента изменения аварийности ( $K_d$ ), рассчитываемого по формуле:

$$K_d = \frac{\overline{A_{\text{после}}}}{\overline{A_{\text{до}}}}, \quad (1)$$

где  $\overline{A_{\text{после}}}$ ,  $\overline{A_{\text{до}}}$  – средняя годовая аварийность на участке после и до проведения дорожно-строительных работ соответственно.

Год проведения дорожно-строительных работ не учитывался.

Если  $K_d$  меньше 1, то проведенные дорожно-строительные работы положительно отразились на улучшении безопасности дорожного движения на участке. Если  $K_d \sim 1$ , то проведенные дорожно-строительные работы не повлияли на безопасность движения [22].

Для анализа аварийности использовались данные о ДТП с пострадавшими за 2019-2024 годы, которые в соответствии с координатами были нанесены на карту с помощью сервиса Yandex DataLens. Этот сервис был необходим для определения аварийности на конкретных участках в заданное время.

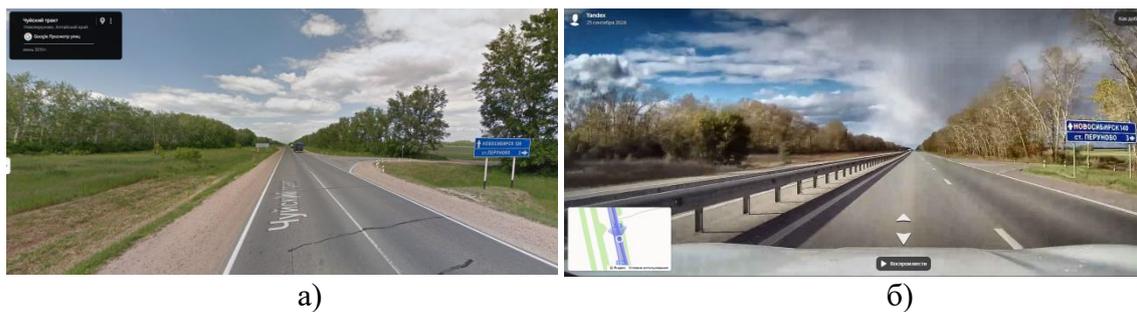
Выбраны 7 участков на федеральных дорогах Алтайского края, на которых в период с 2020 по 2023 год был проведен один из выбранных видов дорожно-строительных работ (реконструкция, капитальный ремонт, ремонт искусственных сооружений). Для наглядности по каждому участку добавлены снимки с Яндекс карт (зеркала)<sup>2</sup> и Гугл карт (панорамы)<sup>3</sup> в период до проведения дорожно-строительных работ и после их проведения. Снимки получены для одной и той же точки.

## 3 Результаты исследований

Рассмотрим каждый из участков. Участок ФАД Р-256 км 135+277-143+000 – капитальный ремонт был проведен в 2022-2023 г. После проведения капитального ремонта была изменена схема движения: произведено расширение проезжей части, увеличение числа полос движения, устройство разделительной полосы. Также ликвидирован пешеходный переход на км 139+166 и остановочный пункт вблизи него, оборудована зона разворота, увеличена длина переходно-скоростных полос для поворота на АЗС и ликвидировано левоповоротное движение для въезда в Курочкино и Староперуново (въезд осуществляется через разворот). Внешний вид участка показан на рис. 1.

<sup>2</sup> <https://yandex.ru/maps>

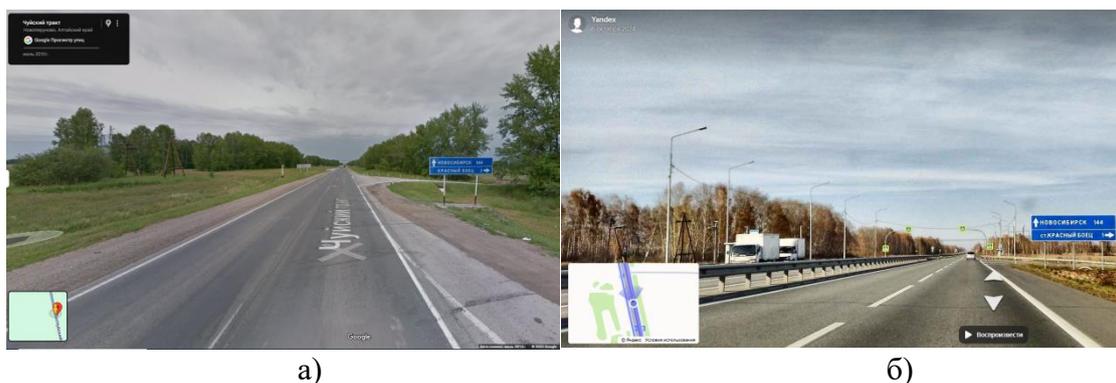
<sup>3</sup> <https://www.google.ru/maps>



а) до капитального ремонта; б) после капитального ремонта.

Рисунок 1 – Р-256 км 135+277 - 143+000

Участок ФАД Р-256 км 143+000 - 150+000 – капитальный ремонт был проведен в 2022 году. После проведения капитального ремонта была изменена схема движения: произведено расширение проезжей части, увеличение числа полос движения, устройство разделительной полосы. Ограничено движение скорости до 70 км/ч на нерегулируемых пешеходных переходах. Ликвидировано левоповоротное движение на Красный боец, ПТФ «Новоеловская» (въезд через разворот). Внешний вид участка показан на рис. 2.



а) до капитального ремонта; б) после капитального ремонта

Рисунок 2 – Р-256 км 143+000 - 150+000

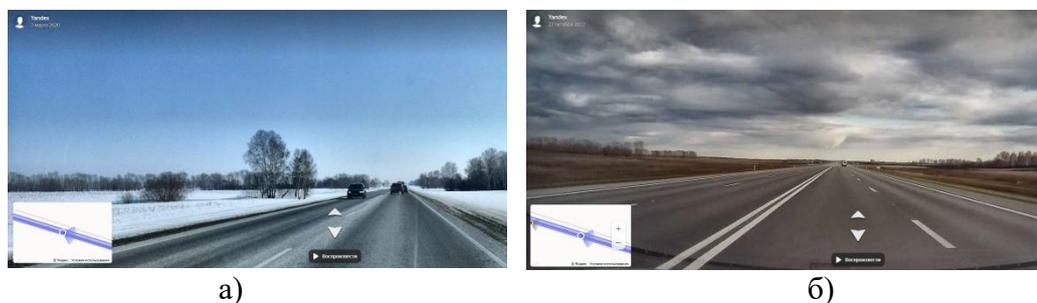
Участок Р-256 км 212+480 до 216+722, капитальный ремонт был проведен в 2021-2022 г. Основными изменениями в организации движения стали следующие аспекты: расширение проезжей части и увеличение числа полос движения, устройство разделительной полосы, организация населенного пункта (поселок Новый) с уменьшением скоростного режима до 60 км/ч, устройство регулируемого пешеходного перехода, обустройство разворота (при движении в сторону Бийска на Барнаул). Внешний вид участка показан на рис. 3.



а) до капитального ремонта; б) после капитального ремонта

Рисунок 3 – Р-256 от км 212+480 до 216+722

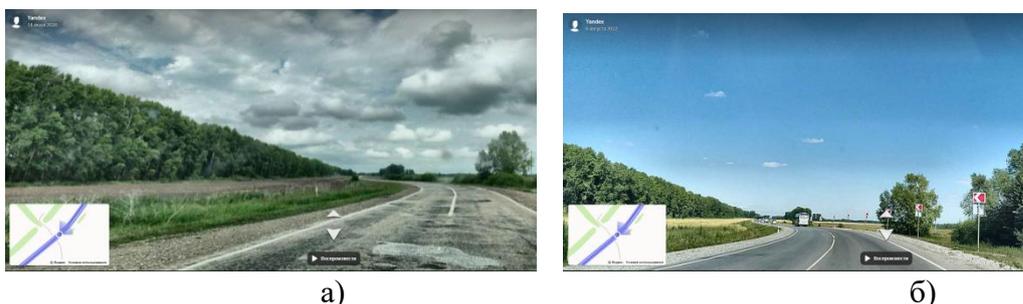
Участок дороги Р-256 км 216+000 до 223+000 – реконструкция дороги была проведена в 2020–2021 годах. После проведения реконструкции изменились характеристики участка – произведено расширение проезжей части до двух полос в каждую сторону с разделительной полосой без ограждения, обустроены 2 площадки отдыха для большегрузного транспорта. Кроме того, после реконструкции трехкилометровый участок перегона обустроен для использования специальной авиационной техники при ликвидации последствий ЧС. Внешний вид участка показан на рис. 4.



а) до капитального ремонта; б) после реконструкции

Рисунок 4 – Р-256 от км 216+000 до 223+000

Участок ФАД А-321 км 158+300 до 162+597 – капитальный ремонт был проведен в 2021 г. В результате капитального ремонта основными изменениями, связанными с организацией движения, стали: замена дорожного покрытия, на км 161+570 установлены дорожные знаки 1.34.1 «Направление поворота». Внешний вид участка показан на рис. 5.



а) до капитального ремонта; б) после капитального ремонта

Рисунок 5 – А-321 от км 158+300 до 162+597

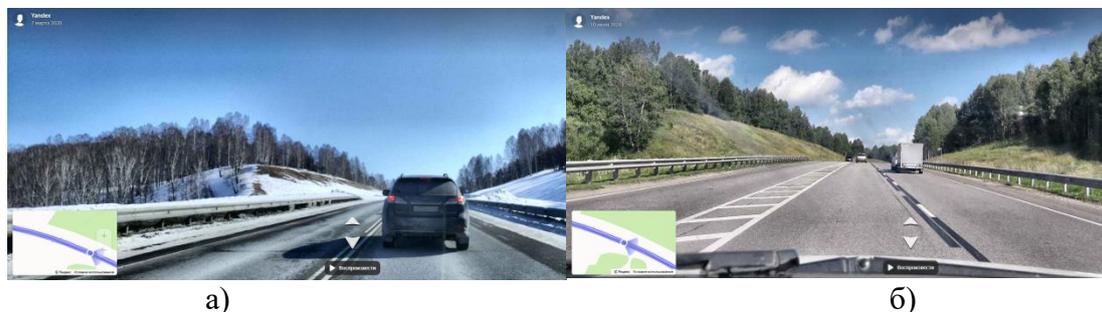
Участок дороги А-322 Барнаул – Рубцовск – граница с Республикой Казахстан км 38+018 – ремонт моста через реку Бураниха был проведен в 2020 г. В результате ремонта произведено устройство дорожной одежды и покрытия на проезжей части моста и тротуарах, ремонт опор, пролетных строений. Внешний вид участка показан на рис. 6.



а) до ремонта; б) после ремонта

Рисунок 6 – А-322 км 38+018

Участок Р-256 км 268+000 до 271+600 – капитальный ремонт был проведен в 2020–2021 годах. После проведения капитального ремонта изменились характеристики участка – произведено расширение проезжей части по схеме «2+1» (две полосы при движении в сторону Бийска на 269ом и 271ом километре, две полосы при движении в сторону Барнаула на 270ом километре). На км 268+400 установлен знак 1.14 «Крутой подъём». Внешний вид участка показан на рис. 7.



а) до капитального ремонта; б) после капитального ремонта

Рисунок 7 – Р-256 от км 212+480 до 216+722

#### 4 Обсуждение и заключение

Для каждого из участков рассчитан коэффициент  $K_d$  по формуле (1), результаты показаны в табл. 1.

Таблица 1 – Итоговые значения  $K_d$

Участок	Вид дорожно-строительных работ	Значение $K_d$
Р-256 км 135+277 – 143+000	Капитальный ремонт	0,21
Р-256 км 143+000 – 150+000	Капитальный ремонт	0,33
Р-256 км 212+480 – 216+722	Капитальный ремонт	0,89
Р-256 км 216+000 – 223+000	Реконструкция	1,00
А-321 км 158+300 – 162+597	Капитальный ремонт	1,33
А-322 км 38+018	Ремонт моста	0,37
Р-256 км 268+000 – 271+600	Капитальный ремонт	1,00

Анализ табл. 1 позволяет сделать вывод о том, что в основном дорожно-строительные работы способствуют повышению безопасности дорожного движения. Значительное снижение аварийности отмечено на участках, где в результате капитального ремонта проезжая часть расширена до двух полос в каждую сторону с установкой ограждения, разделяющего встречные потоки (первые три участка). Также снижение аварийности отмечено на участке А-322 км 38+018 (ремонт моста).

Сохранение показателей аварийности отмечено на участках, на которых в результате проведения работ расширена проезжая часть, запрещен обгон, но ограждение, разделяющее встречные потоки не установлено. Так основными видами непосредственных нарушений ПДД при ДТП на участке Р-256 км 216+000 - 223+000 после реконструкции являлись: выезд на полосу встречного движения, несоответствие скорости конкретным условиям движения, нарушение правил расположения ТС на проезжей части, разворот в местах, где разворот запрещён, несоблюдение бокового интервала. На участке Р-256 км 268+000 - 271+600 после капитального ремонта основные виды непосредственных нарушений ПДД при ДТП были: выезд на полосу встречного движения, несоответствие скорости конкретным условиям движения, неправильный выбор дистанции. Это может свидетельствовать о том, что улучшение характеристик участка приводит к повышению скорости движения, а отсутствие средств, препятствующих выезду на встречную полосу, позволяет ряду водителей совершать нарушения правил обгона.

Увеличилось количество учетных ДТП на участке ФАД А-321 км 158+300 - 162+597, где в результате капитального ремонта устранены дефекты покрытия. Это приводит к значительному росту скорости движения, а в совокупности с увеличивающейся интенсивностью движения (в среднем на 10 % в год) ведет к ДТП. После капитального ремонта основным видом непосредственных нарушений ПДД при ДТП на данном участке было несоответствие скорости конкретным условиям движения и выезд на полосу встречного движения. Кроме того, все ДТП совершены водителями в состоянии алкогольного опьянения.

Таким образом, значительному снижению аварийности способствует разделение транспортных потоков. Расширение проезжей части и улучшение качества покрытия может способствовать повышению скорости и выезду на полосу встречного движения, поэтому необходим дополнительные меры по предупреждению этих нарушений ПДД.

Проведенное исследование позволило определить относительную величину влияния дорожно-строительных работ (реконструкции, капитального ремонта и ремонта искусственных сооружений) на количество учетных ДТП на примере ФАД Алтайского края. Выявлено, что в целом дорожно-строительные работы оказывают положительное влияние на повышение безопасности дорожного движения, особенно при увеличении числа полос при установке разделяющего ограждения. В случаях увеличения числа полос без ограждения, разделяющего транспортные потоки, показатели аварийности сохраняются на прежнем уровне. Однако, учитывая растущую интенсивность движения (на 12 % в среднем за последние 3 года), можно констатировать, что эти виды работ также способствуют безопасности дорожного движения. Улучшение качества покрытия на участках с низкой интенсивностью движения представляет собой потенциальную опасность и требует дополнительных мер по предупреждению ДТП, в частности рекомендуется контроль со стороны Госавтоинспекции по выявлению лиц в алкогольном опьянении.

Результаты исследования представляют собой научную и практическую значимость поскольку содержат количественные значения, отражающие влияние проведения дорожно-строительных работ на изменение числа учетных ДТП.

Перспективами исследования является аналогичный анализ влияния дорожно-строительных работ на число ДТП без пострадавших.

### Список литературы

- 1 Гатиятуллин, М. Х. Влияния транспортно-эксплуатационного состояния автомобильной дороги на аварийность на примере участка Р-177 «Поветлужье» / М. Х. Гатиятуллин, А. Г. Пекчеркин // Техника и технология транспорта. – 2022. – № 2(25). – С. 1-3.
- 2 Алексиков С. В. Влияние ровности дорожного покрытия на себестоимость перевозок и безопасность движения / С. В. Алексиков, А. И. Лескин, Д. И. Гофман, М. И. Альшанова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2020. – № 2(79). – С. 24-31.
- 3 Akbari, Mahdi Evaluating the Safety Effects of Pavement Condition Index (PCI) on Frequency of Run-off-road Accidents / Akbari Mahdi, Shafabakhsh Gholamali, Ahadi, Mohammad // JTIE. – 2015. – № 1(3). – p. 47-61. DOI: 10.22075/jtie.2015.316.
- 4 Rasee, Muhammad AI-driven Vision-based Pothole Detection for Improved Road Safety / Rasee Muhammad, Ung Ling, Tan Gloria, Tan Chi Wee, Buking Ron, Yahya Norziana, Ismail Habibah // Pertanika Journal of Science and Technology. – 2025. – 33. DOI: 10.47836/pjst.33.3.20.
- 5 Веселов, В. Н. Влияние технического уровня и эксплуатационного состояния автомобильных дорог на уровень аварийности / В. Н. Веселов // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2012. – № 1(53). – С. 21-26.
- 6 Товбоев, Б. Х. Влияние различных эксплуатационных свойств дороги на безопасность движения / Б. Х. Товбоев // Экономика и социум. – 2023. – № 12-1(115). – С. 1421-1423.
- 7 Albar, Aniza Pavement maintenance and surface treatment: Evaluation and prevention towards road safety aspect along Ampang Jaya road / Albar Aniza, Rashid I, Haron S, Abidin A, Ramli Rozaini // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2024. – 1369. – 012027. DOI:10.1088/1755-1315/1369/1/012027.
- 8 Tamiru, Getu The Effect of Asphalt Concrete (AC) Pavement Distress on Road Traffic Accident: As Case Study / Tamiru Getu, Ponnurangam Palani, Mose Gemechu // Pramana Research Journal. – 2023. – № 8 (10). – p.73-86.
- 9 Salgude, Rohit Effect of geopathic stress on flexible pavement distresses and accidents / Salgude Rohit, Pimplikar Sunil, Kumbhar Pranav, Shinde Kalpesh // Materials Today: Proceedings. – 2022. – 65. DOI:10.1016/j.matpr.2022.04.472.

10 Yalew, Lijalem Impact of a pothole on road user response in terms of driving safety and comfort for pavement maintenance prioritization / Yalew Lijalem, Virgianto Gatot, Inagi Marei, Tomiyama // Kazuya Journal of JSCE. – 2023. – Vol.11, No.2. – 23-21035. DOI:10.2208/journalofjsce.23-21035.

11 Aydin, Metin Effects of pavement surface deformations on traffic flow / Aydin Metin, Topal Ali // Transport. – 2019. – 34. – 204-214. DOI:10.3846/transport.2019.8631.

12 Zahidy Aniq Examining the relationship between road service quality and road traffic accidents: a case study on an expressway in Malaysia / Zahidy Aniq, Sutanto Muslich, Sorooshian Shahryar // Traffic Safety Research. – 2024. – № 8. – e000056. DOI:10.55329/gzqy4926

13 Attawuwur, Mega The Lack of Safety Facilities on Pintu Angin Biak Road Results in Less Users Negating Driving Safety / Attawuwur Mega, Marwanto Riza, Hadi Suprpto // Journal of Artificial Intelligence and Engineering Applications (JAIEA). – 2025. – 4. – p.1556-1561. DOI:10.59934/jaiea.v4i3.942.

14 Стефаненко, И. В. Оценка влияния дорожно-ремонтных работ на безопасность движения / И. В. Стефаненко, С. В. Алексиков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2017. – № 48(67). – С. 159-165.

15 Александров, Н. Н. Методика прогнозирования количества транспортных средств, вовлеченных в ДТП, на двухполосных загородных автомобильных дорогах с использованием принципов логики вероятностей / Н. Н. Александров // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 1(33). – С. 112-122.

16 Рыбин, А. Л. Результаты оценки эффективности мероприятий по повышению безопасности дорожного движения методом выгод и затрат / А. Л. Рыбин // Дороги и мосты. – 2020. – № 1(43). – С. 142-150.

17 Ложкин, Д. С. О повышении безопасности дорожного движения в местах производства дорожных и иных работ на автомобильных дорогах и улицах в населенных пунктах / Д. С. Ложкин // Современная наука. – 2024. – № 3. – С. 37-44.

18 Демьянушко И. В. Повышение безопасности дорожного движения при проведении ремонтных работ / И. В. Демьянушко, Б. Т. Тавшавадзе, П. С. Михеев, И. А. Карпов // Мир дорог. – 2020. – № 131. – С. 102-107.

19 Андреев, П. Г. Обеспечение безопасности дорожного движения при производстве дорожных работ / П. Г. Андреев // Управление деятельностью по обеспечению безопасности дорожного движения: состояние, проблемы, пути совершенствования: Сборник материалов XVIII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Орёл, 25–26 апреля 2024 года. – Орёл: Орловский юридический институт МВД РФ им. В.В. Лукьянова, 2024. – С. 22-26.

20 Сильянов, В. В. Организация движения в местах производства дорожных работ / В. В. Сильянов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2012. – № 2(61). – С. 2а-5.

21 Агбай Оол, А. А. Особенности организации безопасности движения во время капитального ремонта на участке автомобильной дороги р - 257 «Енисей» Красноярск - Абакан – Кызыл / А. А. Агбай Оол // Проблемы и тенденции научных исследований в системе образования : сборник статей Международной научно-практической конференции, Тюмень, 09 декабря 2019 года. Том Часть 3. – Тюмень: Общество с ограниченной ответственностью «ОМЕГА САЙНС», 2019. – С. 6-8.

22 Печатнова, Е. В. Расчет коэффициента опасности дороги в зонах проведения дорожно-строительных работ / Е. В. Печатнова // Вопросы современной науки: проблемы, тенденции и перспективы: Материалы международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 07–08 декабря 2017 года / Ответственный редактор Э.И. Забнева. Редколлегия: Л.С. Кочкина [и др.]. – Новокузнецк: ИП Кеньшенская Виктория Валерьевна (издательство «Зебра»), 2017. – С. 94-96.

## References

1 Gatiyatullin, M. X. Vliyaniya transportno-e`kspluatacionnogo sostoyaniya avtomobil`noj dorogi na avarijnost` na primere uchastka R-177 «Povetluzh`e» / M. X. Gatiyatullin, A. G. Pekcherkin // Tekhnika i texnologiya transporta. – 2022. – № 2(25).

2 Aleksikov S. V. Vliyanie rovnosti dorozhnogo pokry`tiya na sebestoimost` perevozok i bezopasnost` dvizheniya / S. V. Aleksikov, A. I. Leskin, D. I. Gofman, M. I. Al`shanova // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel`nogo universiteta. Seriya: Stroitel`stvo i arxitektura. – 2020. – № 2(79). – S. 24-31.

3 Akbari, Mahdi Evaluating the Safety Effects of Pavement Condition Index (PCI) on Frequency of Run-off-road Accidents / Akbari Mahdi, Shafabakhsh Gholamali, Ahadi, Mohammad // JTIE. – 2015. – № 1(3). – p. 47-61. DOI: 10.22075/jtie.2015.316.

4 Rasee, Muhammad AI-driven Vision-based Pothole Detection for Improved Road Safety / Rasee Muhammad, Ung Ling, Tan Gloria, Tan Chi Wee, Buking Ron, Yahya Norziana, Ismail Habibah // Pertanika Journal of Science and Technology. – 2025. – 33. DOI: 10.47836/pjst.33.3.20.

5 Veselov, V. N. Vliyanie texnicheskogo urovnya i e`kspluatacionnogo sostoyaniya avtomobil`ny`x

dorog na uroven` avarijnosti / V. N. Veselov // Vestnik Astraxanskogo gosudarstvennogo texniceskogo universiteta. – 2012. – № 1(53). – S. 21-26.

6 Tovboev, B. X. Vliyanie razlichny`x e`kspluatacionny`x svojstv dorogi na bezopasnost` dvizheniya / B. X. Tovboev // E`konomika i socium. – 2023. – № 12-1(115). – S. 1421-1423.

7 Albar, Aniza Pavement maintenance and surface treatment: Evaluation and prevention towards road safety aspect along Ampang Jaya road / Albar Aniza, Rashid I, Haron S, Abidin A, Ramli Rozaini // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2024. – 1369. – 012027. DOI:10.1088/1755-1315/1369/1/012027.

8 Tamiru, Getu The Effect of Asphalt Concrete (AC) Pavement Distress on Road Traffic Accident: As Case Study / Tamiru Getu, Ponnurangam Palani, Mose Gemechu // Pramana Research Journal. – 2023. – № 8(10). – p.73-86

9 Salgude, Rohit Effect of geopathic stress on flexible pavement distresses and accidents / Salgude Rohit, Pimplikar Sunil, Kumbhar Pranav, Shinde Kalpesh // Materials Today: Proceedings. – 2022. – 65. DOI:10.1016/j.matpr.2022.04.472.

10 Yalew, Lijalem Impact of a pothole on road user response in terms of driving safety and comfort for pavement maintenance prioritization / Yalew Lijalem, Virgianto Gatot, Inagi Marei, Tomiyama // Kazuya Journal of JSCE. – 2023. – Vol.11, No.2. – 23-21035. DOI:10.2208/journalofjsce.23-21035.

11 Aydin, Metin Effects of pavement surface deformations on traffic flow / Aydin Metin, Topal Ali // Transport. – 2019. – 34. – 204-214. DOI:10.3846/transport.2019.8631.

12 Zahidy Aniq Examining the relationship between road service quality and road traffic accidents: a case study on an expressway in Malaysia / Zahidy Aniq, Sutanto Muslich, Sorooshian Shahryar // Traffic Safety Research. – 2024. – № 8. – e000056. DOI:10.55329/gzqy4926

13 Attawuwur, Mega The Lack of Safety Facilities on Pintu Angin Biak Road Results in Less Users Negating Driving Safety / Attawuwur Mega, Marwanto Riza, Hadi Suprpto // Journal of Artificial Intelligence and Engineering Applications (JAIEA). – 2025. – 4. – p.1556-1561. DOI:10.59934/jaiea.v4i3.942.

14 Stefanenko, I. V. Ocenka vliyaniya dorozhno-remontny`x rabot na bezopasnost` dvizheniya / I. V. Stefanenko, S. V. Aleksikov // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel`nogo universiteta. Seriya: Stroitel`stvo i arxitektura. – 2017. – № 48(67). – S. 159-165.

15 Aleksandrov, N. N. Metodika prognozirovaniya kolichestva transportny`x sredstv, vovlechny`x v DTP, na dvuxpolosny`x zagorodny`x avtomobil`ny`x dorogax s ispol`zovaniem principov logiki veroyatnostej / N. N. Aleksandrov // Nauchny`j vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel`nogo universiteta. Stroitel`stvo i arxitektura. – 2014. – № 1(33). – S. 112-122.

16 Ry`bin, A. L. Rezul`taty` ocenki e`ffektivnosti meropriyatij po povy`sheniyu bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya metodom vy`god i zatrat / A. L. Ry`bin // Dorogi i mosty`. – 2020. – № 1(43). – S. 142-150.

17 Lozhkin, D. S. O povy`shenii bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya v mestax proizvodstva dorozhny`x i iny`x rabot na avtomobil`ny`x dorogax i uliczax v naseleenny`x punktax / D. S. Lozhkin // Sovremennaya nauka. – 2024. – № 3. – S. 37-44.

18 Dem`yanushko I. V. Povы`shenie bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya pri provedenii remontny`x rabot / I. V. Dem`yanushko, B. T. Tavshavadze, P. S. Mixeev, I. A. Karpov // Mir dorog. – 2020. – № 131. – S. 102-107.

19 Andreev, P. G. Obespechenie bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya pri proizvodstve dorozhny`x rabot / P. G. Andreev // Upravlenie deyatel`nost`yu po obespecheniyu bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya: sostoyanie, problemy`, puti sovershenstvovaniya : Sbornik materialov XVIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. V 2-x chastyax, Oryol, 25–26 aprelya 2024 goda. – Oryol: Orlovskij yuridicheskij institut MVD RF im. V.V. Luk`yanova, 2024. – S. 22-26.

20 Sil`yanov, V. V. Organizaciya dvizheniya v mestax proizvodstva dorozhny`x rabot / V. V. Sil`yanov // Nauka i texnika v dorozhnoj otrasli. – 2012. – № 2(61). – S. 2a-5.

21 Agbaj Ool, A. A. Osobennosti organizacii bezopasnosti dvizheniya vo vremya kapital`nogo remonta na uchastke avtomobil`noj dorogi r - 257 «Enisej» Krasnoyarsk - Abakan – Ky`zy`l / A. A. Agbaj Ool // Problemy` i tendencii nauchny`x issledovaniy v sisteme obrazovaniya : sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Tyumen`, 09 dekabrya 2019 goda. Tom Chast` 3. – Tyumen`: Obshhestvo s ogranichennoj otvetstvennost`yu «OMEGA SAJNS», 2019. – S. 6-8.

22 Pechatnova, E. V. Raschet koefficienta opasnosti dorogi v zonax provedeniya dorozhno-stroitel`ny`x rabot / E. V. Pechatnova // Voprosy` sovremennoj nauki: problemy`, tendencii i perspektivy`: Materialy` mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Novokuzneczk, 07–08 dekabrya 2017 goda / Otvetstvenny`j redaktor E`.I. Zabneva. Redkollegiya: L.S. Kochkina [i dr.]. – Novokuzneczk: IP Ken`shenskaya Viktoriya Valer`evna (izdatel`stvo «Zebra»), 2017. – S. 94-96.



**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИН С БАРАБАНАМИ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ И ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE INTERACTION PROCESSES OF PNEUMATIC TIRES WITH TEST STAND DRUM AND HORIZONTAL SUPPORT SURFACE**

**Гудков Виктор Владимирович**,  
к.т.н., доцент, доцент кафедры автомобильной подготовки ВУНЦ ВВС «ВВА им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж.

**Gudkov Viktor Vladimirovich**,  
candidate of technical sciences, associate professor, associate of department of automotive training, Military Education and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defense of the RF, Voronezh.

✉<sup>1</sup> **Сокол Павел Александрович**,  
к.т.н., преподаватель кафедры автомобильной подготовки ВУНЦ ВВС «ВВА им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж,  
e-mail: [pavsokol@yandex.ru](mailto:pavsokol@yandex.ru)

✉<sup>1</sup> **Sokol Pavel Alexandrovich**,  
candidate of technical sciences, lecturer of department of automotive training, Military Education and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defense of the RF, Voronezh,  
e-mail: [pavsokol@yandex.ru](mailto:pavsokol@yandex.ru)

**Аннотация.** В статье проанализированы способы и методы испытаний пневматических шин на стендах различной конструкции, рассмотрены их достоинства и недостатки. Приведены ограничения, влияющие на качество проведения испытаний шин и на их результаты. Рассмотрены характерные особенности проведения стендовых испытаний пневматических шин, а также возможность прогнозирования их надежности и предполагаемой нормы наработки в реальных условиях эксплуатации автомобилей. Проанализирован выбор режимов проведения испытаний, оказывающий существенное влияние на полученные результаты при оценке их надежности, возможной степени влияния на безопасность дорожного движения и норму наработки пневматических шин.

**Annotation.** The article analyzes the methods and techniques for testing pneumatic tires on various types of testing stands, and discusses their advantages and disadvantages. The limitations that affect the quality of tire testing and its results are listed. The article discusses the specific features of bench tests of pneumatic tires, as well as the possibility of predicting their reliability and expected service life under real-world vehicle operating conditions. The choice of test modes, which has a significant impact on the results obtained when assessing their reliability, the possible degree of influence on road safety, and the service life of pneumatic tires, has been analyzed.

**Ключевые слова:** ПНЕВМАТИЧЕСКАЯ ШИНА, ИСПЫТАНИЯ, БАРАБАН, СОПРОТИВЛЕНИЕ КАЧЕНИЮ, НАГРУЗКИ, СТЕНДОВЫЕ, НАТУРНЫЕ. **Keywords:** PNEUMATIC TIRE, TESTS, DRUM, RESISTANCE TO SWING, LOADS STAND, NATURAL.

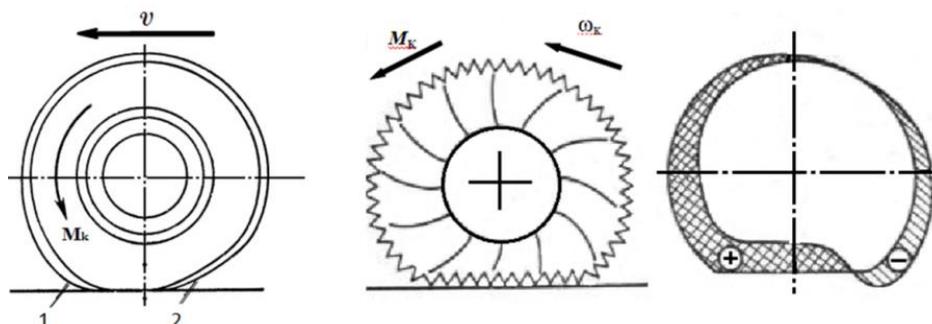
<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

### **1 Актуальность, постановка вопроса, план исследования (обзора)**

При движении автомобиля от его ведущих колес на опорную поверхность (ОП) действуют как вертикальные нагрузки, так и сдвигающие усилия. При этом тяговая реакция ОП, находящаяся в области их контакта, будет величиной переменной и зависящей от ее прочностных и иных характеристик, характера и величины действующих на нее нагрузок, конструктивных особенностей пневматических шин и коэффициента буксования колес. Причем характер нагрузок, действующих на ОП будет различен в зависимости от режима качения колес, действующие внешние силы могут изменять свою величину, а в некоторых случаях – и направление действия. Описание процессов взаимодействия ведущих колес с различными типами ОП представляет собой очень сложную задачу, связанную со множественными показателями, характеризующими их параметры (плотность, коэффициент внутреннего трения, влажность, липкость и т.д.). При этом, на характер взаимодействия ведущих колес с ОП оказывают влияние размер и форма области их контакта (отношение длины области контакта к ее ширине), характер распределения удельных давлений по площади контакта, конструкция грунтозацепов и их шаг (насыщенность профиля). При качении колеса кроме непрерывной деформации шины (изгиба, сжатия и растяжения) и ее трения по ОП беговая дорожка протектора подвергается систематическим и сосредоточенным ударным нагрузкам от неровностей и препятствий, находящихся на ОП, приводящим к значительному ее нагреву и потере прочности материала покрышки. В то же время внешние нагрузки, действующие на шину при качении, распределяются по ее элементам неравномерно, т.к. в каждый момент времени они находятся в рабочей части шины, когда остальные ее части находятся без нагрузки, что проявляется в неравномерном давлении элементов протектора шины на ОП.

В настоящее время существуют несколько противоречивых теорий, описывающих процессы качения и проскальзывания (буксования) элементов протектора пневматической шины относительно ОП, ввиду сложного механизма их взаимодействия при качении колеса, который усложняется циклически изменяющимися контактными деформациями и напряжениями, зависящими, в свою очередь, от конструкции каркаса, типа, числа слоев корда (нормы слойности) и геометрических размеров шины. При этом образуются участки сжатия и расширения элементов беговой дорожки протектора шины по ширине и высоте профиля (рис. 1). Учитывая различную скорость нагружения и восстановления шины в области загрузки и разгрузки, с увеличением скорости качения возможно снижение размеров области разгрузки и перераспределение вертикальной нагрузки несимметрично по вертикальной оси.

Максимальное значение нагрузки, действующей в области контакта, будет состоять из нагрузки, действующей от сжатия воздуха, при изменении внутреннего объема шины, связанного с прогибом ее каркаса, и нагрузки от деформации каркаса шины по высоте ее профиля [1]. Сжатый воздух будет создавать дополнительную нагрузку на шину, но, придавая ей дополнительную упругость, оптимальную конфигурацию рабочего профиля, распределяя значительную часть нагрузки от области контакта по ее внутренней поверхности. При этом будет происходить изменение длины области контакта шины с ОП из-за деформации шины по ширине ее профиля, находящегося в области контакта.



$1$  – участок сжатия шины (+);  $2$  – участок растяжения шины (-);  
 $M_k$  – крутящий момент;  $\omega_k$  – угловая скорость вращения колеса

Рисунок 1 – Деформация участков пневматической шины при качении

Действие внешней боковой силы, направленной перпендикулярно плоскости колеса, приводит к деформации шины в поперечном (боковом) направлении, способствуя уходу колеса  $\Delta$  с первоначальной траектории при криволинейном движении, приводя к увеличению величины трения скольжения по ОП (рис. 2) [2]. При этом, каждая модель шины имеет определенные величины максимальной боковой силы и максимального угла ухода без проскальзывания элементов ее протектора в боковом направлении. Способность шины к боковой деформации существенно влияет на управляемость автомобиля и его устойчивость при движении.

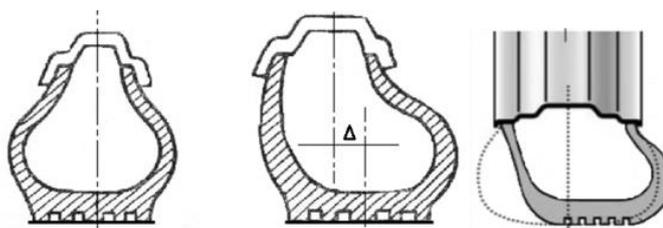


Рисунок 2 – Деформация пневматической шины под действием внешней боковой силы

Таким образом, при качении колеса происходит процесс сложной деформации шины в виде последовательных и непрерывных (циклических) изгибов выпрямлений боковых стенок по высоте профиля и беговой дорожки в рабочей части шины, при одновременном сжатии и растяжении элементов протектора по области контакта с ОП и на прилегающих к ней участках.

При движении по слабонесущим ОП повышенная эластичность пневматических шин и снижение в ней давления воздуха будут способствовать повышению проходимости при улучшении взаимодействия ведущих колес с ОП не вызывая перегрузок при ее деформации [3]. При этом, шина будет подобна гусеничной ленте с длиной опорной ленты, равной длине области контакта деформированной шины с ОП (рис. 3). Также, ввиду незначительного погружения колес в грунт будет иметь место меньшее сопротивление их качению. В общей сумме удельных нагрузок, действующих в области контакте колес с ОП, это приведет к тому, что доля удельных вертикальных нагрузок будет снижена, а доля допустимых горизонтальных нагрузок возрастет вместе с возрастающей удельной касательной силой.

Эффект гусеницы будет проявляться во времени воздействия уплотняющей силы на ОП и возрастать пропорционально увеличению длины области контакта колеса с ОП. Также, вследствие эластичности шины и переменного и неоднородного характера ее нагружения геометрические размеры и параметры имеют переменный характер, постоянно изменяясь в процессе качения, приводя к тому, что один и тот же параметр может иметь несколько значений [4].

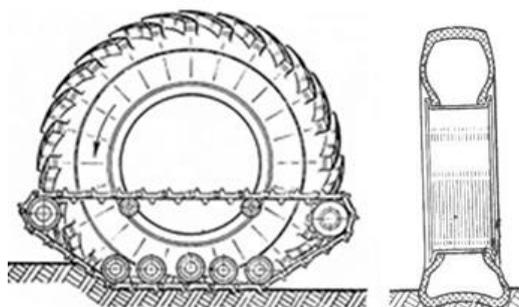
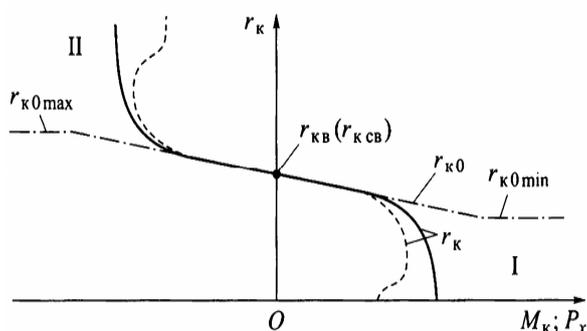


Рисунок 3 – Деформация пневматической шины с эффектом гусеницы

Каркас пневматической шины, состоящий из скрещивающихся слоев корда, имеет своеобразные механические свойства, что объясняется значительным различием жесткости резины шины и корда [5]. А механические свойства боковой поверхности (ширины профиля) шины зависят от угла, который составляют нити перекрещивающихся слоев корда, изменение которого ведет к изменению свойств и характеристик шины.

Также, при качении колеса возникают дополнительные силы, вызванные действием неоднородности шины (геометрической неоднородностью, неоднородным распределением масс, неоднородностью жесткостных характеристик) [6]. При этом, беговая дорожка протектора шины в области контакта с ОП выпрямляется (становится условно плоской), приводя к сжатию его подканавочного слоя и искривлению выступов, а боковые стенки становятся выпуклыми. Изменение величины кинематического радиуса колеса в зависимости от действия силовых параметров, тангенциальной эластичности и сцепных свойств беговой дорожки шины с ОП показано на рис. 4 [7].



I - зона буксования; II - зона юза;  $r_k$  – кинематический радиус;  $r_{к св}$  – радиус качения в свободном режиме;  $r_{к0}$  – радиус чистого качения;  $r_{к0 max}$  – радиус максимального чистого качения в зоне буксования;  $r_{к0 min}$  – радиус минимального чистого качения в зоне юза

Рисунок 4 – Зависимость радиуса качения колеса от силовых параметров

При движении по недеформируемой ОП внутреннее давление воздуха в шине, как правило, является величиной постоянной [8]. Однако, деформация шины происходит при изменении комплекса внешних нагрузок и не является функцией одного параметра. Погрешности при расчетах вертикальной деформации шины могут привести к неточностям при определении: внешних реакций (вертикальной, горизонтальной и боковой) в области ее контакта с ОП; сопротивления качению; нагрузок, действующих на узлы и агрегаты трансмиссии и снижающих тяговые показатели колесного движителя. Неравномерность распределения нормальных напряжений показана на рис. 5. Как видно из его анализа, при качении шины по поверхности бегового барабана неравномерность распределения вертикальных напряжений обусловлена

жесткостью боковин шины и нагрузкой от момента сил при преодолении внешних сопротивлений [5]. Величина неравномерности зависит от нормы слоистости шины, и, соответственно, от жесткости боковин и беговой дорожки.

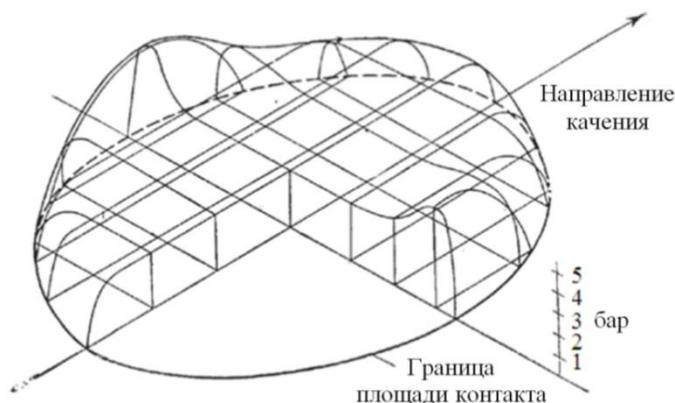
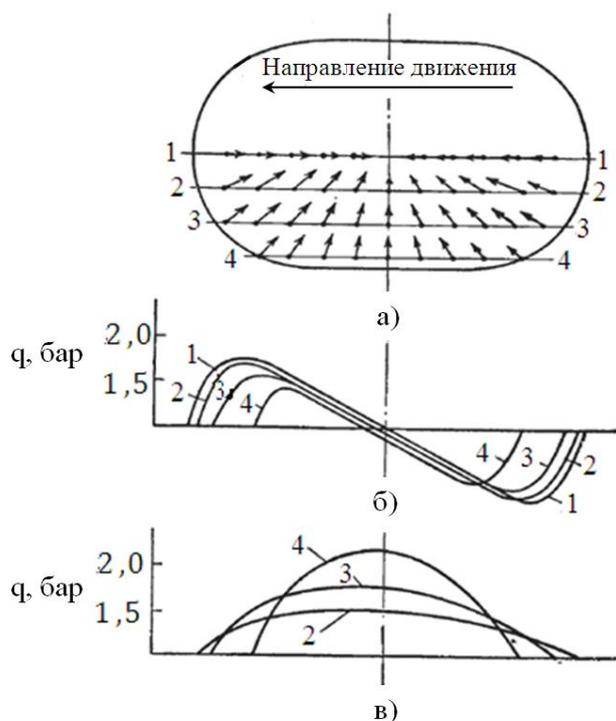


Рисунок 5 – Схема распределения давления в области контакта шины с беговым барабаном

При этом, деформация поверхностного слоя при нагружении шины вызывает появление касательных напряжений в области контакта с ОП, направленных к ее центру (рис. 6). Также, при качении колеса в разных сечениях шины действуют различные по величине касательные и нормальные напряжения, однако характер их изменения одинаков, что свидетельствует о наличии зон юза и буксования как в зоне разгрузки, так и в зоне загрузки. А наибольшие по величине напряжения будут наблюдаться по центральному сечению шины.



а) картина касательных напряжений; б) распределение касательных напряжений; в) распределение нормальных напряжений; 1, 2, 3, 4 – продольные сечения области контакта

Рисунок 6 – Схема распределения касательных сил в области контакта шины и опорной поверхности

При движении по слабонесущим ОП, характеристики которых изменяются в широком диапазоне, для повышения проходимости транспортного средства давление воздуха в шине можно изменить в достаточно большом диапазоне (в 4-8 раз). При этом изменяется и величина вертикальной деформации шины, а также параметры беговой дорожки шины и ОП в области их контакта. В результате этого погрешности при аналитических расчетах увеличиваются, т.к. значительно возрастают потери полезной мощности на ее циркуляцию, а также увеличиваются нагрузки на трансмиссию и колесный движитель, приводя к снижению тяговых показателей.

Таким образом, рассматривая процессы и величины деформаций пневматической шины по области контакта в вертикальном и горизонтальном направлении можно выделить зоны, в которых касательные напряжения будут превышать возможности сцепления шины с ОП (грунт, асфальтобетон, металлическая поверхность барабана стенда).

В случае превышения касательных напряжений в некоторой зоне области контакта возможно возникновение проскальзывания элемента по ОП, которое будет сопровождаться повышенным износом протектора шины и снижением силы сцепления (тяги), что приведет к потере устойчивости и управляемости автомобиля. В связи с этим необходимо корректно учитывать особенности процессов, происходящих при проскальзывании элементов протектора шины в области контакта с ОП. Увеличение скорости движения автомобиля приведет к увеличению угловой скорости вращения колеса, способствуя повышению скорости загрузки в области загрузки шины, которая будет зависеть от скорости движения. При этом, скорость загрузки будет постоянной, и, зависящей только от жесткостных свойств шины. Следовательно, можно предположить наличие несимметричности нормальных напряжений по области контакта шины с ОП с возможным увеличением их величины, а также возможное увеличение зон проскальзывания с дальнейшим срывом колеса в буксование (скольжение).

## 2 Анализ информационных источников

Материал пневматической шины является эластомером, с резко выраженной способностью к высокоэластичным деформациям, развивающихся при сравнительно малых напряжениях, достигая 500-700 % от исходного размера, при этом, напряжение при деформации со временем снижается, т. е. происходит его релаксация [9]. В реальных условиях качения колеса нагружение шины происходит с различной скоростью, поэтому механические свойства резины шины будут определяться ее упругими свойствами при равновесии, а также релаксационными свойствами, связанными со скоростью установления этого равновесия. Процесс релаксации ускоряется при повышении температуры, поэтому механические свойства резины шины значительно зависят от ее температуры. При этом проявляются значительные несовпадения упругих характеристик шины при ее нагружении и разгрузке из-за действия явления внутреннего трения, количественной оценкой которого является величина, составляющая разность между работой, затраченной на ее нагружение и на разгрузку. Эта величина зависит от параметров шины, режимов деформирования и от температуры, при которой происходят процессы деформации. Экспериментально возможно определить величину внутреннего трения при проведении циклических режимов нагружения (которое зависит от температуры шины и от амплитуды ее деформации), учитывая изменение деформации и напряжения шины по времени [10].

В работах [11-14] показано, что внешнее трение резины протектора шины по ОП в области их контакта обусловлено преодолением адгезионных сил (возникающими между трущимися телами) и преодолением сопротивления объемной деформации материала шины при обтекании неровностей ОП, величина которых изменяется в зависимости от условий контакта с ОП. При этом на сухих и гладких ОП преобладает адгезионная составляющая внешних сил трения, а на влажных ОП – деформационная или гистерезисная составляющая. Соотношение между ними будет зависеть от внутреннего давления воздуха, шероховатости ОП, температуры и скорости относительного перемещения трущихся поверхностей. Экспериментально

было установлено, что коэффициент трения зависит от сочетания материала шины, конструкции трущихся объектов и режима качения по ОП, которые обуславливают изменения, протекающие как в материале шины, так и в геометрическом очертании неровностей ОП. При этом, значительное влияние на величину коэффициента трения оказывает площадь контакта беговой дорожки шины и ОП, которая зависит от геометрии ОП, ее состояния и вертикальной нагрузки на колесо. Поэтому, необходимо корректно вычислять величины коэффициентов трения для тщательного и точного выполнения условий проведения экспериментов [15].

При качении эластичного колеса происходит изменение его формы и геометрических размеров из-за неоднородной деформации пневматической шины (ввиду повышения жесткости ее материала при динамическом нагружении), а также из-за меняющихся условий образования области контакта с ОП и под действием внешних сил и внутреннего давления воздуха, что сопровождается циклическими изменениями напряженного состояния ее элементов [5].

В ходе проведения экспериментов по изучению деформаций пневматических шин были установлены отличия в характере деформаций шин различной конструкции [16]. Так, диагональные шины имели достаточно большую зону повышенной радиальной деформации и меньшую зону касательной деформации по сравнению с радиальными шинами, имеющими высокую жесткость брекерного пояса в касательном направлении, способствующую изменению направления касательного смещения в центре области ее контакта с ОП.

В работе [17] на основе анализа процессов неустойчивого качения колеса с упругой шиной в режиме автоколебаний по прямой (шимми) предположил, что шина в условиях деформации обладает вертикальной, боковой и пяточной жесткостью. При смещении обода в поперечном направлении деформация шины характеризовалась тремя составляющими и было принято допущение, что масса деформируемой части была незначительной и ей можно было пренебречь. При этом не учитывалась диссипация энергии, связанная с деформацией шины и не рассматривалась ее продольная деформация. А отсутствие проскальзывания беговой дорожки протектора шины в области контакта с ОП было предположением, на основании которого согласно теории М. В. Келдыша записывались уравнения кинематических связей. Однако отсутствие скольжения шины по ОП учитывалось при выполнении следующих условий:

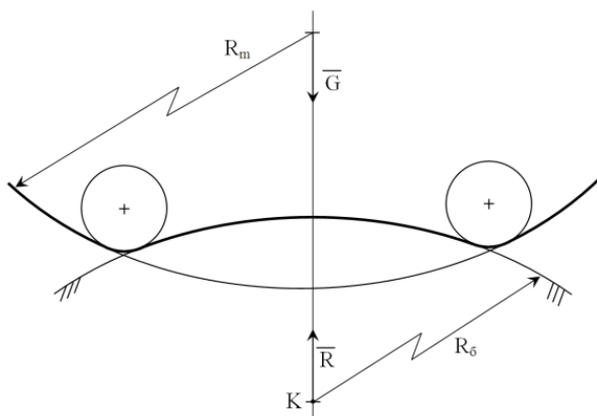
- при совпадении касательной к линии качения по ОП шины с осью области контакта;
- когда кривизна линии качения шины по ОП будет определяться тремя параметрами ее деформации.

Автор в работе [18] предложил метод определения деформации шины однодискового колеса в области контакта с ОП в условиях пренебрежимо незначительного его проскальзывания по ОП. При этом деформации были представлены суммой конечных деформаций при невозмущенном качении колеса и малых отклонениях.

В настоящее время используются несколько методов эксплуатационных испытаний автомобильных пневматических шин: дорожные, полигонные, ускоренные в условиях обычной эксплуатации и специальные дорожные, которые позволяют получить наиболее достоверные результаты по износу протектора. Также широко применяются и лабораторно-стендовые методы оценки его износостойкости, где проблемным и сложным вопросом является точная имитация основных условий нагружения пневматических шин, максимально соответствующих реальным условиям эксплуатации.

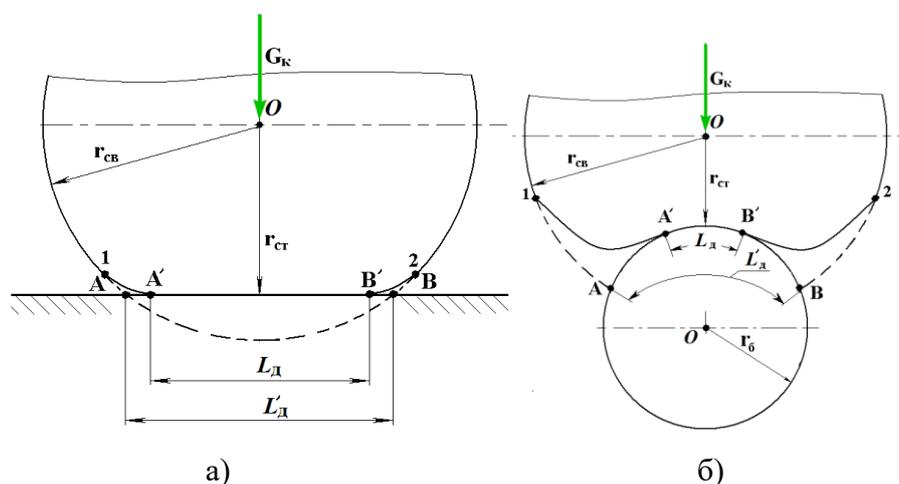
В дорожных условиях в ходе проведения испытаний шин возможно определить силовые показатели взаимодействия колеса и ОП, характеристики сопротивления качению, бокового увода, влияния параметров шин на эксплуатационные показатели автомобиля, надежность колесного движителя в условиях, характерных для условий эксплуатации [19].

Для упрощения модели нагружения колеса при его качении по барабану испытательного стенда в условиях лабораторно-стендовых испытаний примем, что деформация шины в зоне статической нагрузки и разгрузки имеет некоторый радиус (рис. 7). При этом следует учитывать значительный разброс величины этого радиуса, зависящего от соотношения радиусов барабана и колеса, что иллюстрирует рис. 8 [20].



$R_m$  – радиус недеформированного профиля колеса, мм;  $R$  – реакция от барабана, мм;  
 $G$  – нагрузка на колесо, Н;  $R_6$  – радиус барабана, мм

Рисунок 7 – Деформация шины при статической нагрузке на барабане радиуса  $R_6$



а) на дороге; б) на беговом барабане;

$G_k$  – нагрузка на колесо, Н;  $r_{св}$  – свободный радиус колеса, мм;  $r_{ст}$  – статический радиус колеса, мм;  
 $r_6$  – радиус барабана, мм;  $L_d$  – длина контакта с ОП, мм;  $L'_d$  – геометрическая длина контакта;  
 А, Б, А', Б' – точки контакта колеса с ОП

Рисунок 8 – Схема деформации шины неподвижного колеса

Из анализа рис. 8 очевидно, что существует различие между геометрической длиной области контакта с ОП и ее фактической длиной. Это явление может быть обусловлено наличием в области контакта шины с ОП сил трения, препятствующих смещению поверхностного слоя по внешнему направлению. Но если при нагружении и качении шины по горизонтальной ОП отличие в длине области контакта не столь значительно, то при качении шины по барабану испытательного стенда к существенному различию в длине области контакта добавляется отрицательная кривизна прогиба шины в области контакта и значительно меньшие радиусы изгиба шины при входе и выходе испытуемого колеса из области контакта с беговой дорожкой барабана испытательного стенда.

Область контакта пневматической шины и недеформируемой ОП имеет форму эллипса и вытянуто в продольном направлении, а на ролике барабанного стенда – в поперечном направлении. При этом расхождения в площади области контакта шины с ОП и с беговым барабаном будут зависеть от геометрических размеров и числа контактных роликов. При контакте шины с двумя роликами стенда погрешность будет меньше, чем при контакте с шины одним роликом.

Барабанные многоосные стенды позволяют проводить испытания транспортных средств с режимами нагружения колесного движителя, близкими к реальным [21]. В то же время, подобные стенды могут сохранять все недостатки и особенности специфической деформации шины при качении колеса по барабану стенда, т.к. диаметр барабанов стенда может быть соизмерим с диаметром колеса транспортного средства (рис. 9).



Рисунок 9 – Общий вид барабанного испытательного стенда

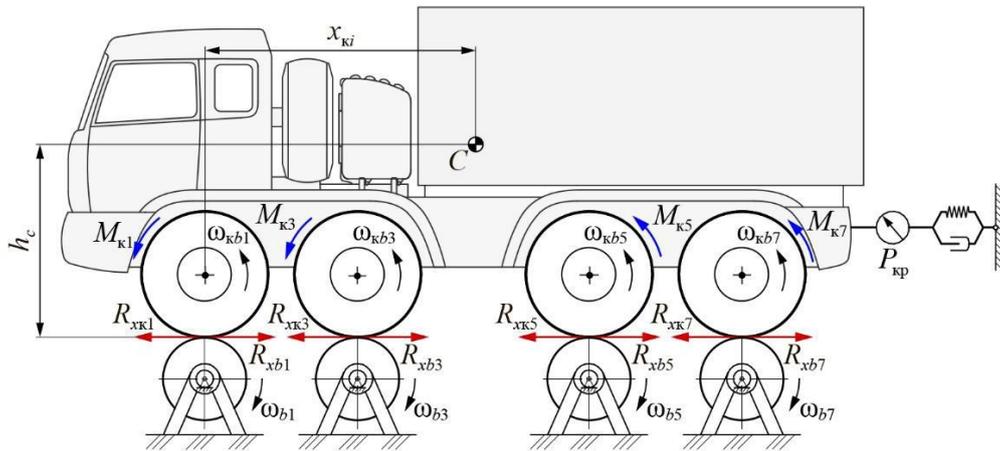
Использование современных многоточечных синхронизированных систем измерения позволяет проводить качественные динамические исследования в различных условиях и режимах нагружения (рис. 10).

При испытаниях необходимо учитывать, что в процессе проведения исследований взаимодействие колеса с пневматической шиной и металлическим цилиндрическим барабаном будет происходить при возрастающем ее скольжении по поверхности барабана в промежутке 0-100 % [22].

Автор в работе [23] предположил, что качение цилиндрической модели шины по цилиндрическому барабану сопровождается распределением нормальных и касательных напряжений, определяемых режимом качения и геометрией поверхностей (рис. 11). Так, нормальные напряжения в вертикальном и боковом направлениях ( $\sigma_z$  и  $\sigma_y$ ) имеют максимальные значения в точке над осью вращения. Величины касательных напряжений ( $\sigma_x$ ) будут определяться изменением геометрии шины в области контакта от круговой к плоской поверхности и сцеплением поверхностного слоя беговой дорожки шины с ОП. Соответственно, в области контакта появятся слои с зонами буксования и юза, имеющие разные направления поверхностных касательных напряжений.

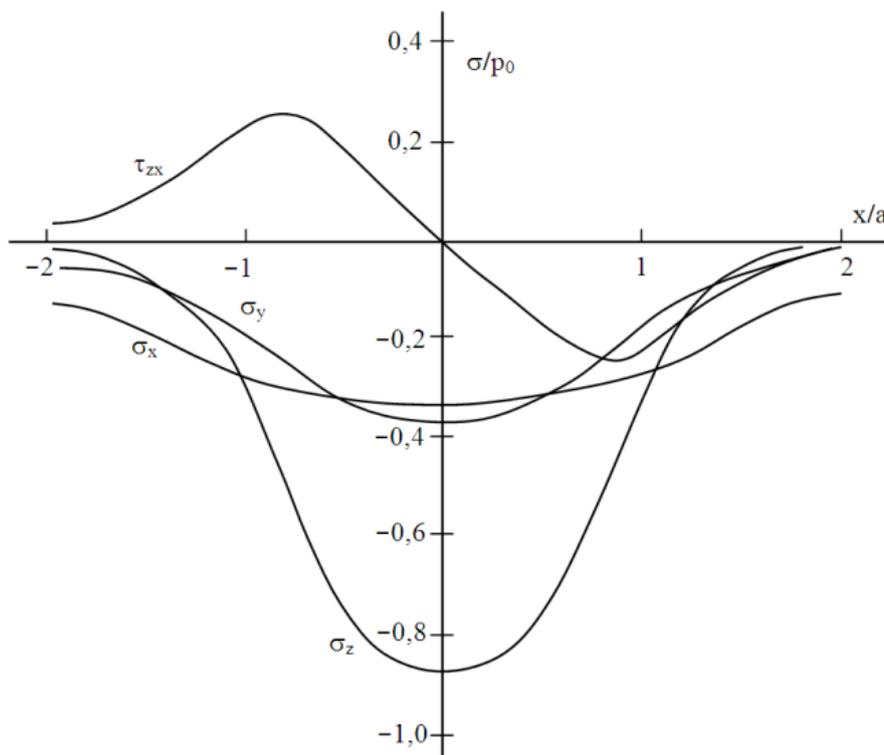
Рассматривая реальные процессы, возникающие при контакте колеса (как жесткого, так и деформируемого объекта) можно наблюдать деформацию ОП как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении (рис. 12, а) [24]. Следовательно, перед катящимся колесом возможно возникновение зоны выдавливания верхнего слоя ОП с увеличением силы сопротивления качению (рис. 12, б).

На рис. 13, а представлены кривые изменения напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$  и  $\tau_1$  по глубине поверхности контакта, а на рис. 13, б – линии уровня максимального касательного напряжения  $\tau_1$  [24]. Из анализа рисунка видно, что касательные напряжения в области контакта двух цилиндров достигают максимального значения ближе к центру области контакта. Нормальные напряжения по вертикальной и горизонтальной оси по длине контакта уменьшаются. Однако, нормальные напряжения по оси  $x$  увеличиваются более интенсивно.



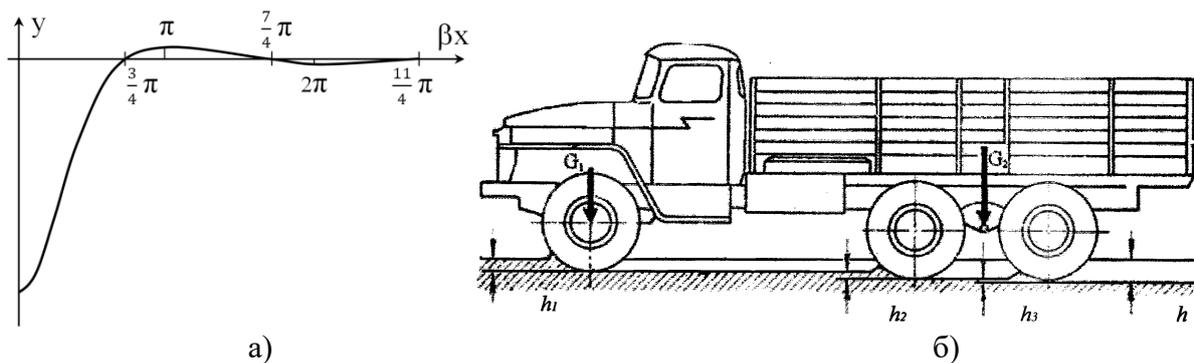
$M_{ki}$  – крутящий (приводной) момент на  $i$ -ом колесе, Н·м;  $R_{xki}$  – продольная реакция  $i$ -го колеса при взаимодействии с поверхностью  $i$ -го барабана, Н;  $R_{xbi}$  – продольная реакция на поверхности  $i$ -го барабана при взаимодействии с  $i$ -ым колесом, Н;  $P_{кр}$  – сила на крюке, Н;  $\omega_{kbi}$  – угловая скорость  $i$ -го колеса, рад/с;  $\omega_{bi}$  – угловая скорость  $i$ -го барабана, рад/с;  $x_{ki}$  – расстояние от центра тяжести до оси  $i$ -го колеса, м;  $h_c$  – высота центра тяжести от плоскости контакта, м

Рисунок 10 – Расчетная схема динамики колесного движителя на барабанном стенде (нечетная сторона)



сплошные линии – упругие напряжения на глубине  $z = 0,5a$ ;  $a$  – длина зоны контакта, мм;  
 $p_0$  – среднее нормальное напряжение по области контакта, Па

Рисунок 11 – Контакт качения упругопластических цилиндров



$\beta_x$  – угол поворота колеса;  $h_1, h_2, h_3$  – величина деформации ОП;  $G_1, G_2$  – нагрузка на оси

Рисунок 12 – Деформация упругой опорной поверхности при вертикальном контакте с колесом

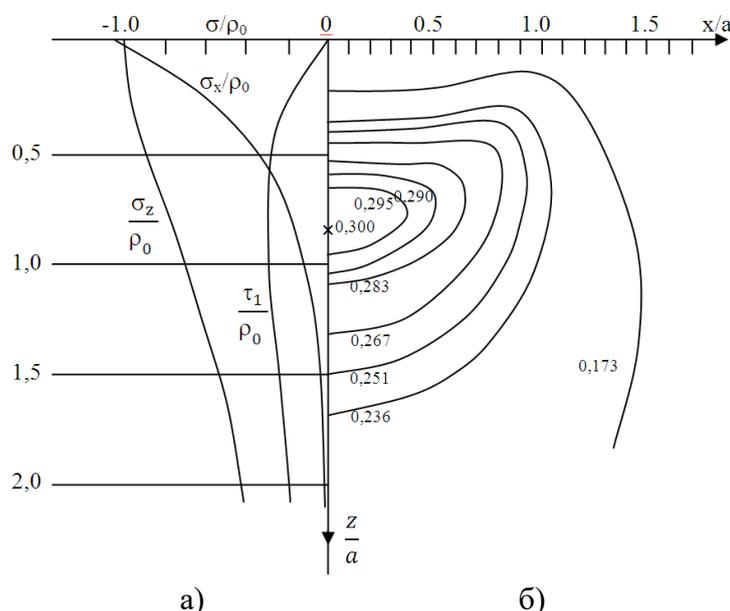
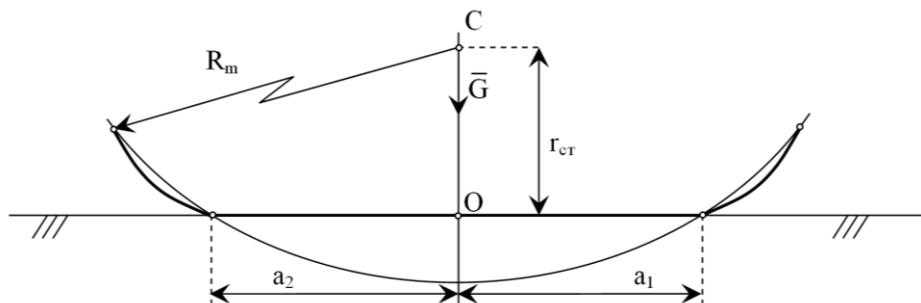


Рисунок 13 – Контакт цилиндров и распределение напряжений вдоль оси  $z$  (а) и линии уровня максимального касательного напряжения  $\tau$  (б)

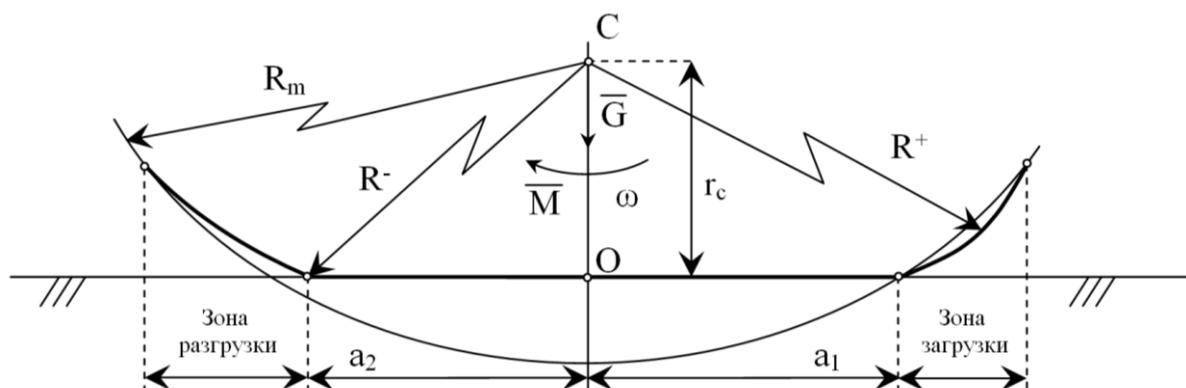
При статическом нагружении шины на горизонтальной и недеформируемой опорной поверхности ( $R = \infty$ ) зоны загрузки по вертикальной оси одинаковы и определяются силами трения и коэффициентом сцепления по области контакта от его центра к его краям (рис. 14).



$R_m$  – радиус колеса перед зоной деформации;  $a_1, a_2$  – полудлина зоны контакта

Рисунок 14 – Деформация шины при статической нагрузке на недеформируемой поверхности ( $R = \infty$ )

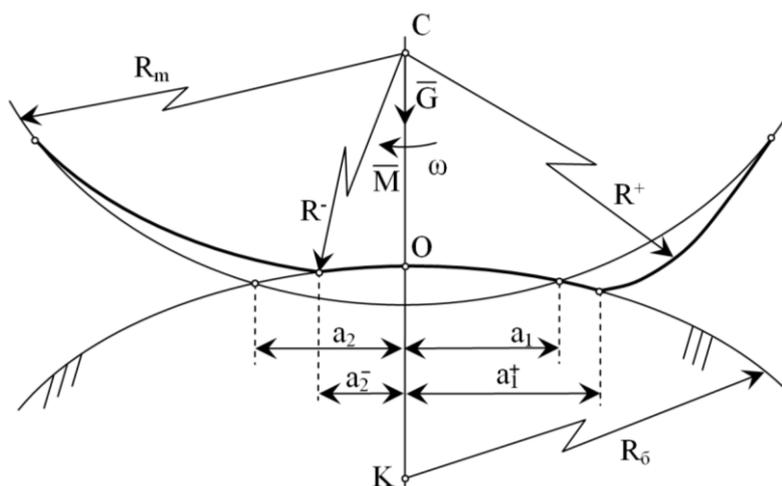
При переходе колеса в тяговый (ведущий) режим качения к статическому нагружению шины добавляется момент  $M$ , который создает в зоне нагружения бóльшую загрузку, и, соответственно, бóльшую деформацию (рис. 15). В зоне разгрузки за счет растягивающих касательных сил происходит более ранний выход шины из области контакта. Соответственно, изменяется величина (длина) зон загрузки и разгрузки и величины радиусов кривизны в этих зонах.



$R^-$  – радиус колеса в зоне разгрузки, мм;  $R^+$  – радиус колеса в зоне загрузки, мм;  $r_c$  – силовой радиус колеса, мм;  $\omega$  – угловая скорость вращения, рад/с;  $M$  – момент из колеса, Н·м;  $a_1$  – длина зоны загрузки в области контакта с ОП, мм;  $a_2$  – длина зоны разгрузки в области контакта с ОП, мм

Рисунок 15 – Деформация шины при качении колеса в тяговом режиме по недеформируемой поверхности ( $R = \infty$ )

Аналогичная картина наблюдается при качении колеса по барабану испытательного стенда, но зоны загрузки и разгрузки более выражены и, соответственно, более значительно в них изменяются радиусы кривизны затрагивая деформацией бóльший сектор шины (рис. 16).



$a_1^+$  – длина зоны загрузки в области контакта с барабаном;  
 $a_2^-$  – длина зоны разгрузки в области контакта с барабаном

Рисунок 16 – Деформация шины при качении колеса в тяговом режиме по беговому барабану радиуса  $R_б$

Для большинства строительно-дорожных (землеройно-транспортных) машин и машин лесного комплекса пневматические шины являются единственным упруго-демпфирующим элементом, играющим роль подвески и определяющим их плавность хода и частоту колебаний [25]. При этом важными характеристиками шин являются номинальная грузоподъемность ( $Q$ ,

Н) и статический прогиб ( $f_{ш}$ , м), который в нормальных условиях может быть только положительным, определяя односторонний характер работы шины. В первом приближении в работе [26] предложена для этого использовать формулу Р. Хедекеля:

$$f_{ш} = Q \frac{1}{\pi p_{ш} \sqrt{2RD}}, \quad (1)$$

где  $p_{ш}$  – давление воздуха в шине, Па;  $R$  – радиус кривизны протектора, м;  $D$  – наружный диаметр шины, м.

Однако формула (1) была получена в предположении, что шина деформируется только в области ее контакта с недеформируемой ОП, а давление в области контакта одинаково с давлением воздуха в шине. В то же время, Бидерман В. Л. предложил статический прогиб шины определять по формуле (2), которая наиболее полно отражает ее нагрузочные характеристики:

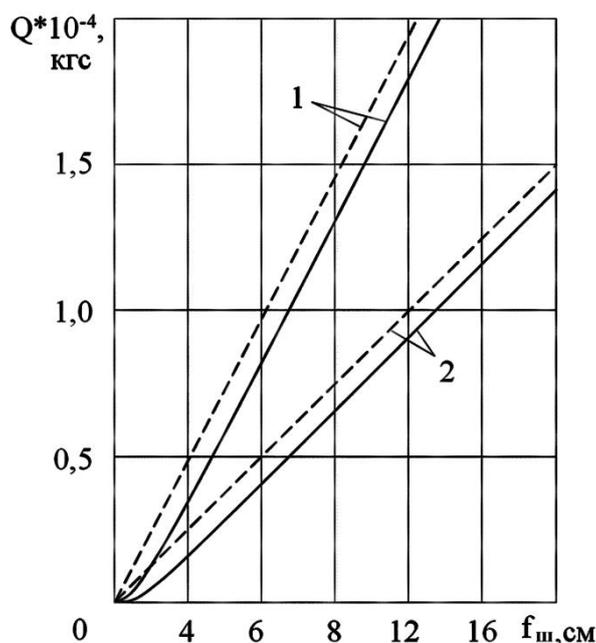
$$f_{ш} = \frac{C_2 Q}{2p_{ш}} + \sqrt{\left(\frac{C_2 Q}{2p_{ш}}\right)^2 + C_1 Q}, \quad (2)$$

где

$$C_1 = \frac{\varphi h_{ш}}{E \pi \sqrt{2RD}}, \quad C_2 = \frac{1}{r \pi \sqrt{2RD}}, \quad (3, 4)$$

где  $C_1, C_2$  – коэффициенты, учитывающие геометрические и прочностные характеристики материала шин;  $\varphi$  – безразмерный коэффициент, характеризующий рисунок протектора шины;  $E$  – модуль упругости шины, Па;  $h_{ш}$  – толщина протектора шины, м;  $r$  – отношение изменения объема шины к объему эллиптического сегмента деформации.

На рис. 17 показаны упругие характеристики пневматической шины, имеющие линейную зависимость, определенные по формулам Хедекеля и Бидермана.



1 – давление 4 бар; 2 – давление 2 бар;  
сплошные линии – вычисления по формуле Хедекеля;  
пунктирные линии – вычисления по формуле Бидермана

Рисунок 17 – Упругие характеристики шины в зависимости от внутреннего давления

Из анализа графика (рис. 17) очевидно, что упругие характеристики шин, вычисленные по формулам (1) и (2) носят линейный характер. Однако, при проведении аналитических расчетов по определению жесткости шин необходимо учитывать, что крупногабаритные шины имеют уникальную конструкцию и изучать их характеристики зачастую бывает очень затруднительно. А в реальных условиях эксплуатации транспортных средств происходит одновременная деформация протектора шины и ее каркаса, причем зависимость прогиба профиля шины от действующей на нее нагрузки не будет являться линейной функцией внутреннего давления воздуха и действующей на нее внешней нагрузки [25]. Таким образом, основным недостатком барабанных стендов заключается в отличие механики взаимодействия колеса с роликами стенда, которая существенно отличается от механики взаимодействия колеса с ОП. Поэтому, для анализа результатов испытаний транспортного средства на барабанных стендах необходимо применять различные поправочные коэффициенты. При этом отсутствуют закономерности изменения тяговых усилий при проведении испытаний на барабанных стендах, которые и определяют характер движения транспортного средства. Барабанные испытательные стенды применяются в основном на заводах изготовителях пневматических шин для определения их относительной долговечности (больше-меньше), при этом ошибка в определении нормы наработки может быть 3-5-кратной.

### 3 Обобщение результатов исследований

Колесный движитель транспортных средств при качении по ОП зачастую испытывает значительные внешние горизонтальные, вертикальные и боковые нагрузки, одновременно циклично и комплексно действующие на пневматические шины, а также многократные сложные деформации. При этом работа шин в сложных и жестких условиях способствует их ускоренному износу и разрушению каркаса. А корректное и точное аналитическое вычисление возникающих напряжений представляет собой очень сложную научную задачу, имеющую большое практическое значение.

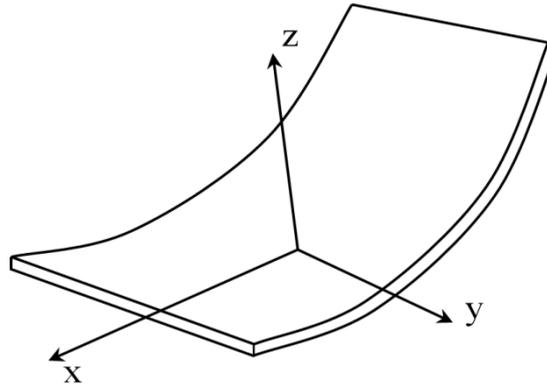
Даже, если все свести к системе дифференциальных уравнений в частных производных, то граничные условия необходимо будет ставить на заранее неизвестных поверхностях, что сразу делает невозможным применение традиционных методов решения задачи. Авторы статьи предлагают применить в данном вопросе подходы, близкие к науке «сопротивление материалов». Такая методика требует привлечения положений из теории упругости, и использования частных производных второго порядка при анализе связи напряжения – деформации. При этом необходимо учитывать, что, в отличие от стальных конструкций, деформации шин считать малыми, а уравнения линейными некорректно. Каучук и резина обладают значительной эластичностью по сравнению со сталью, и, соответственно, имеют под нагрузкой значительные сложные деформации. Однако, предположим, что под нагрузкой резина материала пневматической шины обладает малой деформацией на основании принципа Сен-Венана (строго не доказанного, но и не имеющего экспериментальных данных, ему противоречащих). Будем считать линейным изменение смещений точек протектора шины по толщине самого протектора (высоте профиля шины).

Принимаем, что пневматическая шина состоит из элементов с торообразными поверхностями постоянной кривизны, с достаточно тонким каркасом (рис. 18). При подаче в шину воздуха под давлением в ней возникнут усилия:

$$T_{\phi} = pR, \quad (5)$$

$$T_{\psi} = pr, \quad (6)$$

где  $T_{\phi}$  и  $T_{\psi}$  – усилия, возникающие в торе вдоль большой и малой окружностей, Н;  $R$  – большой радиус тора, мм;  $r$  – малый радиус тора, мм. ;  $p$  – линейное внутреннее давление воздуха в шине, Н/мм.



$x$  – продольные (по направлению качения) координаты элемента шины;  
 $y$  – поперечные (боковые) координаты элемента шины;  
 $z$  – (вертикальные) координаты элемента шины в направлении центра колеса

Рисунок 18 – Элемент торообразной поверхности шины

Запишем уравнения тора с параметрами  $\varphi$  и  $\psi$  в параметрической форме:

$$x(\varphi, \psi) = (R + z \cos \psi) \cos \varphi, \quad (7)$$

$$y(\varphi, \psi) = z \sin \psi, \quad (8)$$

$$z(\varphi, \psi) = R + z - (R + z \cos \psi) \sin \varphi. \quad (9)$$

Если произошла деформация шины, то границы области контакта с ОП при  $z = \text{const}$  будут определяться уравнениями, которые представляют собой уравнения плоской кривой (в плоскости  $x$  и  $y$ ), а при  $z = \text{const}$  будут определять максимальную величину деформации шины:

$$x = (R + r \cos \psi) \cos \varphi, \quad (10)$$

$$y = z \sin \psi, \quad (11)$$

$$R + z - (R + z \cos \psi) \sin \varphi = \text{const}. \quad (12)$$

Графически однопараметрическую кривую можно представить так, как показано на рис. 19. При этом направление  $x$  показывает направление проскальзывания поверхности протектора шины при ее качении.

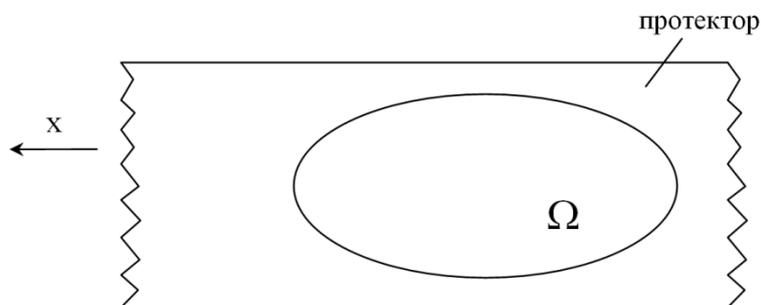


Рисунок 19 – Графическая однопараметрическая кривая

Уравнение равновесия в проекции на ось  $z$  будет иметь вид:

$$Q = \iint_{\Omega} N d\varphi d\psi, \quad (13)$$

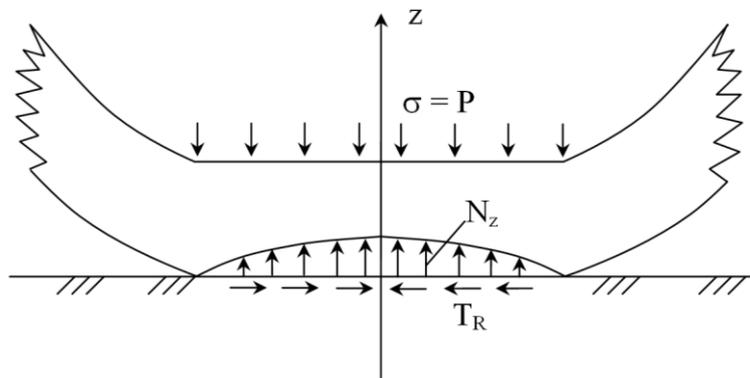
где  $Q$  – часть веса автомобиля, приходящаяся на одно колесо;  $N(\varphi, \psi)$  – реакция ОП на единицу площади области контакта;  $\Omega$  – граница области контакта.

Предположим, что:

$$Nz(\varphi, \psi) = Ez(\varphi, \psi), \quad (14)$$

где  $E$  – модуль упругости, МПа;  $z$  – вертикальная деформация протектора шины, мм.

На рис. 20 показана вертикальная деформация протектора шины (вид сбоку).



$N_z$  – нормальная реакция опорной поверхности;  $T_R$  – сила трения в зоне контакта;  $\sigma$  – давление воздуха в шине

Рисунок 20 – Вертикальная деформация протектора шины

Так как имеется равенство  $N = N(x, y)$ , то для линейных сдвиговых напряжений можно записать по соответствующим осям:

$$F_x = E_{ед} \frac{dN}{dx}, \quad (15)$$

$$F_y = E_{ед} \frac{dN}{dy}, \quad (16)$$

где  $E_{ед}$  – безразмерный коэффициент осевого модуля упругости при сдвиге.

Аналогичная картина наблюдается для проекции  $(y, z)$ . При качении колеса возникают силы трения, которые можно описать классической формулой:

$$T_R = kN, \quad (17)$$

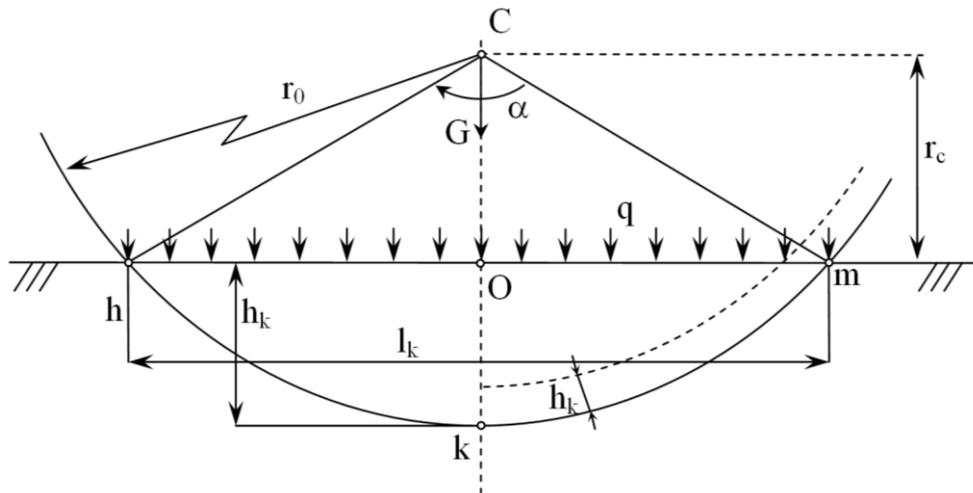
где  $k$  – коэффициент трения.

Общую (суммарную) силу трения можно вычислить по формуле:

$$\int T_R d\psi\varphi = k \int_{\Omega} N d\varphi d\psi = kQ \quad (18)$$

Если следовать предложенному выше методу, то решение задачи по определению напряжений в области контакта можно получить как в численном виде, так и графически, используя, например, компьютерные программы, с помощью которых возможно построить графики при конкретно заданных параметрах пневматических шин (радиусов, толщины боковин, модуля упругости и др.).

Для решения приближенной модели взаимодействия рассмотрим нагружение шины при качении в свободном режиме по недеформируемой ОП или при статическом неподвижном нагружении силой  $G$  (рис. 21).



$q$  – давление воздуха в шине, МПа;  $l_k$  – длина контакта, мм;  $h_k$  – величина деформации шины, мм;  $\alpha$  – угол контакта, град;  $h, m$  – точки границы контакта

Рисунок 21 – Схема нагружения шины при качении в свободном режиме

Под действием этой силы происходит деформация шины на величину  $h_k$  и свободный радиус колеса  $r_o$  уменьшается до радиуса  $r_c$ . Эти данные являются стандартными и предоставляются заводами изготовителями пневматических шин. А расчет взаимодействия колеса с беговым барабаном испытательного стенда в данной статье будет рассматриваться как приближенный. Зная величины нагрузки и деформации возможно определить общую жесткость пневматической шины (модуль упругости):

$$E_{ш} = G/h_k. \quad (19)$$

Однако пневматическая шина представляет собой сложный объект и ее сопротивление нагружению будет состоять из нескольких составляющих:

$$G = S_k q + P_{деф}, \quad (20)$$

где  $S_k = B \times l_k$  – площадь области контакта;  $l_k$  – длина области контакта, мм;  $B$  – ширина протектора, мм;  $q$  – величина внутреннего давления воздуха, Па;  $P_{деф}$  – сила от деформации (изгиба) брекера, Н.

Длина области контакта беговой дорожки шины и ОП может быть определена как длина хорды по формуле (21):

$$l_k = 2r_o \sin \alpha/2. \quad (21)$$

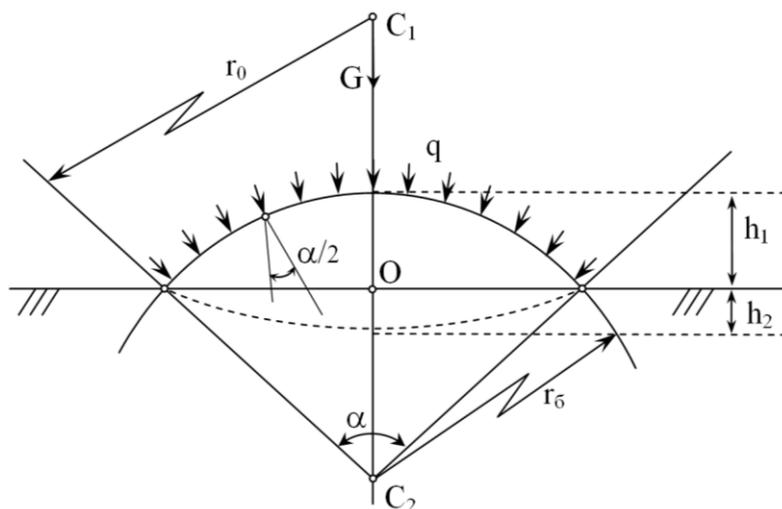
Величину угла  $\alpha$  или  $\alpha/2$  можно определить по формуле:

$$\cos \alpha/2 = r_c/r_o . \quad (22)$$

Тогда  $\alpha/2 = \arccos(r_c/r_o)$ . Следовательно, возможно выделить величину силы определяющей деформацией только слоя брекера – протектор:

$$P_{\text{деф}} = G - S_k q = G - Bl_k q. \quad (23)$$

При качении пневматической шины по барабану испытательного стенда получается более сложная картина, т.к. деформация шины имеет большую величину при отрицательной кривизне беговой дорожки (рис. 22).



$h_1, h_2$  – деформация шины от геометрии барабана и внешней нагрузки

Рисунок 22 – Схема качения пневматической шины по барабану стенда

Следует учитывать особенность внутреннего давления воздуха в шине как давления газа на поверхность, которое всегда будет направлено перпендикулярно к касательной в каждой точке поверхности. Следовательно, нормальное давление воздуха в шине ( $q$ ) будет направлено по выпуклой поверхности, и, за счет действия под некоторым углом, будет меньшей величины, чем при действии по прямолинейной плоскости. Данное уменьшение силы может компенсироваться большей силой от прогиба протектора. Сила давления газа на выпуклую поверхность будет определяться как интеграл по углу контакта шины по поверхности барабана испытательного стенда. Однако длина площади контакта в данном случае будет являться дугой по соответствующему углу:

$$l_k = \frac{\pi R_6}{180^\circ} \alpha^\circ. \quad (24)$$

Тогда запишем формулу для определения силы, действующей на поверхность:

$$P = S_k^1 \int_0^\alpha q \cos \alpha d\alpha = qBl_k \sin a = q \frac{\pi BR_6}{180^\circ} \alpha^\circ \sin \alpha^\circ. \quad (25)$$

В общем случае, величина этой силы может быть известна, но, величина  $\alpha$  остается неизвестной. Данное уравнение может быть решено приближенно с учетом малой деформации шины при  $\sin \alpha \approx \alpha$ , тогда запишем:

$$\alpha = \sqrt{\frac{180P}{q\pi BR_0}}. \quad (26)$$

Полученное значение угла позволит более корректно разделить силу деформации и силу от давления воздуха в шине исходя из условия, что:

$$E_{ш} = P / h_{ш}. \quad (27)$$

Тогда давление от изгиба, при деформации на барабане будет определяться прогибом колеса от собственного радиуса и по барабану. Соответственно, наличие отрицательного прогиба будет уменьшать значимость силы от внутреннего давления, и увеличивать значимость силы от изгиба. В то же время столь значительные деформации поверхностного слоя шины (протектор + корд) требуют учета многослойности шины т.к. слои корда так таковые не растягиваются, а деформация будет определяться растяжением со сдвигом слоев резины между слоями корда, что, в свою очередь, будет резко увеличивать процесс разрушения и расслоения шины от увеличения внутренних нормальных и касательных напряжений и напряжений между слоями корда.

#### **4 Формулирование научно-технического проблемного вопроса дальнейших исследований (проблемы), концепции и задачи исследования**

Таким образом, совершенствование конструкции транспортных средств, увеличение их грузоподъемности и скоростей, и нагрузки на колесный движитель потребует разработки пневматических шин, приспособленных к изменяющимся условиям эксплуатации. Соответственно, потребуются уточненные модели нагружения пневматических шин, учитывающие их многослойность, различие механических и прочностных свойств отдельных слоев, в том числе и при многоцикловых нагрузках, кривизну поверхностей деформируемых слоев. Для проверки разработанных моделей и конструкций соответственно потребуется разработка методик испытаний и новые конструкции стендов для проведения испытаний пневматических шин. При этом, полученные результаты должны коррелироваться с данными реальной эксплуатации транспортных средств. На основании вышеизложенного, можно сформулировать несколько приоритетных направлений по созданию новых моделей пневматических шин и проведения их испытаний на стендах с беговыми барабанами:

- создание математических моделей, учитывающих многослойность шин и их начальную конструктивную кривизну;
- усовершенствование существующих испытательных стендов (с движущейся прямолинейно опорной поверхностью) а также создание испытательных стендов с прямолинейными беговыми поверхностями с имитацией различных поверхностей качения;
- создание высокоточных многоточечных систем измерения с синхронным считыванием данных для определения нормальных и касательных напряжений и деформаций по всем направлениям деформации шин.

Учитывая сложность и взаимозависимость процессов, происходящих при взаимодействии пневматических шин и ОП, а также значительные величины их деформаций и возникающих внутренних напряжений, необходимо более подробно исследовать процессы деформации и нагружения шин при их испытаниях на стендах с беговыми барабанами с целью приближения условий испытаний к реальным эксплуатационным условиям для получения корректных и адекватных результатов.

Список литературы

- 1 Петров, М.А. Работа автомобильного колеса в тормозном режиме / М.А. Петров. – Омск.: Зап. – Сиб. книжное издательство, 1973. – 224 с.
- 2 Майборода О.В. Основы управления автомобилем и безопасность дорожного движения / О.В. Майборода. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 256 с.
- 3 Лаврентьев В.Б. В помощь строителям БАМ. Вождение автомобилей высокой проходимости / В.Б. Лаврентьев. – М.: Транспорт, 1974. – 92 с.
- 4 Ковальчук, В.П. Эксплуатация и ремонт автомобильных шин / В.П. Ковальчук. – М.: Транспорт, 1972. – 256 с.
- 5 Бидерман В.Л., Гуслицер Р.Л., Захаров С.П. и др. Автомобильные шины (конструкция, расчет, испытания, эксплуатация) / В.Л. Бидерман, Р.Л. Гуслицер, С.П. Захаров и др. – М.: ГНТИ Химической литературы, 1963. – 384 с.
- 6 Третьяков, О.Б. Автомобильные шины. Конструкция, механика, свойства, эксплуатация / О.Б. Третьяков, В.А. Гудков, А.А. Вольнов, В.Н. Тарновский. – М.: Колос С, Химия, 2007. – 432 с.
- 7 Ларин В.В. Теория движения полноприводных колесных машин / В.В. Ларин. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – 391 с.
- 8 Ларин В.В. Зависимости вертикальной деформации пневматических шин // Инженерный журнал: наука и инновации. Вып. 12. 2013 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL:<http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/1032.html>. (дата обращения 25. 08.2025).
- 9 Петров М.А. Работа автомобильного колеса в тормозном режиме / М.А. Петров. – Западно – Сибирское книжное издательство. Омское отделение, 1973. – 224 с.
- 10 Резниковский М.М., Лукомская А.И. Механические испытания каучука и резины / М.М. Резниковский, А.И. Лукомская. – М.: Химия, 1968. – 242 с.
- 11 Крагельский И. В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 481 с.
- 12 Боуден Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор. – М.: Машиностроение, 1968. – 544 с.
- 13 Бартенев Г. М., Елькин А. И. О механизме трения высокоэластичных материалов при высоких и низких температурах / Г.М. Бартенев, А.И. Елькин // Сборник «Теория трения и износа». М.: Наука, 1965. – С. 57 – 59.
- 14 Kummer IT. \V. and Mayer W. E. Skid or slip Resistance Journal of Materials, Vol № 3, 1966. „Schallamach A. Chemistry and Physics of Rubberlike Substances. Сп. 13,1963, P. 355—416.
- 15 Дерягин, Б. В. Что такое трение? / Б.В. Дерягин. – М. – Изд. АН СССР, 1963. – 230 с.
- 16 Петров М. А. Исследование торможения автомобиля и работы пневматических шин / М.А. Петров. – Западно-Сибирское книжное издательство, Омск, 1970. – 158 с.
- 17 Келдыш М.В. Шимми переднего колеса шасси самолета / М.В. Келдыш. –Труды ЦАГИ, Изд. Бюро новой техники НКАП, № 564, 1945. – 34 с.
- 18 Левин М.А., Фуфаев Н.А. Теория качения деформируемого колеса / М.А. Левин, Н.А. Фуфаев. – М.: Наука, 1989. – 272 с.
- 19 Балабин И.В. и др. Испытания автомобилей / И.В. Балабин, Б.А. Куров, С.А. Лаптев. – М.: Машиностроение, 1988. – 192 с.
- 20 Бойко А.В., Распопина В.Б. Математическая модель для расчета коэффициента сцепления от проскальзывания с использованием нормальных и касательных распределенных нагрузок по длине пятна контакта эластичной шины с дорогой и беговым барабаном диагностического стенда / А.В. Бойко, В.Б. Распопина // Вестник ИрГТУ, 2014. – № 10 (93). – С. 168 – 172.
- 21 Захаров, А.Ю. Технология экспериментальных исследований колесных транспортных средств на стендах с имитацией качения движителей по опорной поверхности. Дис... канд. техн. наук: 05.05.03 / А.Ю. Захаров – Москва, 2016. – 171 с.
- 22 Бойко А.В., Распопина В.Б. Датчик для измерения нормальных и продольных касательных реакций, распределенных по длине пятна контакта при взаимодействии колеса с эластичной шиной с цилиндрической опорной поверхностью / А.В. Бойко, В.Б. Распопина // Сборник научных трудов по материалам МНПК «Закономерности развития, современного естествознания, техники и технологий», Белгород: ООО Агентство перспективных научных исследований (АПНИ), 2018. – 204 с.
- 23 Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 510 с.

24 Беляев Н.М. Сопротивление материалов / Н.М. Беляев. – М.: Наука, 1965. – 856 с.

25 Малиновский Е.Ю., Гайцгорн М.М. Динамика самоходных машин с шарнирной рамой / Е.Ю. Малиновский, М.М. Гайцгорн. – М.: Машиностроение, 1974. – 176 с.

26 Литвинов А.С. Управляемость и устойчивость автомобиля / А.С. Литвинов. – М.: Машиностроение, 1971. – 415 с.

### References

1 Petrov, M.A. The operation of a car wheel in the braking mode / M.A. Petrov. – Omsk: Zap. – Sib. book publishing house, 1973. – 224 p.

2 Mayboroda, O.V. Fundamentals of Car Driving and Road Safety / O.V. Mayboroda. – M.: Publishing Center "Academy", 2007. – 256 p.

3 Lavrentiev V.B. In the Aid of the BAM Builders. Driving High-Terrain Vehicles / V.B. Lavrentiev. – M.: Transport, 1974. – 92p.

4 Kovalchuk V.P. Operation and Repair of Automobile Tires / V.P. Kovalchuk. – 256p.– M.: Transport, 1972.

5 Biderman V.L., Guslitzer R.L., Zakharov S.P. et al. Automobile Tires (Design, Calculation, Testing, Operation) / V.L. Biderman, R.L. Guslitzer, S.P. Zakharov et al. – M.: GNTI of Chemical Literature, 1963.– 384 p.

6 Tretyakov O.B. et al. Automobile Tires. Design, Mechanics, Properties, and Operation / O.B. Tretyakov, V.A. Gudkov, A.A. Volnov, and V.N. Tarnovsky. Moscow: KolosS, Chemistry, 2007. – 432 p.

7 Larin V.V. Theory of motion of four-wheel drive wheeled vehicles / V.V. Larin. M.: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2020. – 391 p.

8 Larin V.V. Dependence of vertical deformation of pneumatic tires // Engineering Journal: Science and Innovation. Issue. 12. 2013 [Electronic Access mode:–resource]. URL:<http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/1032.html>. (accessed on 25.08.2025).

9 Petrov, M.A. The operation of a car wheel in braking mode / M.A. Petrov. – West Siberian Book Publishing House. Omsk branch, 1973. – 224 p.

10 Reznikovskiy, M.M., Lukomskaya, / M.M. Reznikovskiy, A.I. Lukomskaya. – Mechanical Testing of Rubber and Elastomers. M.: Khimiya, 1968. – 242 p.

11 Kragelsky I. V. Friction and Wear / I.V. Kragelsky. – M.: Mechanical Engineering, 1968. – 481 p.

12 Bowden F. P., Tabor D. Friction and Lubrication of Solids / F.P. Bowden, D. Tabor. M.: Mechanical Engineering, 1968. –544p.

13 Bartenev, G. M., Yelkin, A. I. On the Friction Mechanism of Highly Elastic Materials at High and Low Temperatures / G. M. Bartenev, A. I. Yelkin // In The Theory of Friction and Wear, M.: Nauka. 1965. – P. 57 – 59.

14 Kummer IT. \V. and Mayer W. E. Skid or slip Resistance Journal of Materials, Vol № 3, 1966. Schallamach A. Chemistry and Physics of Rubberlike Substances. Cn. 13, 1963, P. 355 – 416.

15 Deryagin B. V. What is Friction? / B.V. Deryagin – M. : Publishing House of the USSR Academy of Sciences. 1963. – 230 p.

16 Petrov M. A. Research on Car Braking and Pneumatic Tire Operation / M.A. Petrov. – West Siberian Book Publishing House, Omsk, 1970. –158 p.

17 Keldysh, M.V. Shimmie of the Front Wheel of an Aircraft's Chassis / M.V. Keldysh – Proceedings of TsAGI, Publishing House of the Bureau of New Technology of the NKAP, №. 564, 1945. – 34 p.

18 Levin, M.A., Fufaev, N.A. Theory of Rolling of a Deformable Wheel / M.A. Levin, N.A. Fufaev. – M.: Nauka, 1989. – 272 p.

19 Balabin I.V. et al. Testing of Cars / I.V. Balabin, B.A. Kurov, S.A. Laptev. – M.: Mechanical Engineering, 1988. – 192 p.

20 Boyko A.V., Raspopina V.B. Mathematical model for calculating the coefficient of adhesion from slipping using normal and tangential distributed loads along the length of the contact patch of an elastic tire with the road and the running drum of a diagnostic stand / A.V. Boyko, V.B. Raspopina // Bulletin of Irkutsk State Technical University, 2014. – No. 10 (93). – P. 168 – 172.

21 Zakharov, A.Yu. Technology of experimental studies of wheeled vehicles on stands with simulation of propulsion units rolling on the support surface. Dis... cand. tech. sciences: 05.05.03 / A.Yu. Zakharov – Moscow, 2016. – 171 p.

22 Boyko A.V., Raspopina V.B. Sensor for measuring normal and longitudinal tangential reactions distributed along the length of the contact spot during the interaction of a wheel with an elastic tire with a

cylindrical support surface / A.V. Boyko, V.B. Raspopina // Collection of scientific papers based on the materials of the MNPC "Patterns of development, modern natural science, engineering and technology", Belgorod: The Agency for Advanced Scientific Research (APNI), LLC, 2018. – 204 p.

23 Johnson, K. Mechanics of Contact Interaction / K. Johnson.– М.: Mir, 1989. –510 p.

24 Belyaev, N.M. Resistance of Materials / N.M. Belyaev.– М.: Nauka, 1965. – 856 p.

25 Malinovsky, E.Yu., and Gaitsgorn, M.M. Dynamics of Self-Propelled Machines with a Swivel Frame. – М.: Mashinostroenie, 1974. – 176 p.

26 Litvinov, A.S. Vehicle Handling and Stability / A.S. Litvinov.– М.: Mechanical Engineering, 1971. – 415 p.

© Гудков В. В., Сокол П. А., 2025



2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ  
ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ ЦИКЛА ДВС  
ПРИ РАБОТЕ НА ГАЗОПАРОВОДЯНОЙ  
СМЕСИ**

✉<sup>1</sup> **Толстов Сергей Анатольевич**,  
к.т.н., доцент кафедры электротехники, теплотехники и гидравлики, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: [serezha.tolstoff@yandex.ru](mailto:serezha.tolstoff@yandex.ru)

**Панченко Сергей Леонидович**,  
к.т.н., доцент кафедры электротехники, теплотехники и гидравлики, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

**Толстова Александра Сергеевна**,  
студент, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

**Аннотация.** Рассмотрена проблема загрязнения атмосферного воздуха токсичными газами, содержащимися в продуктах сгорания автомобильного топлива и необходимость решения этой задачи. Предложена экспериментальная установка ДВС, позволяющая вводить в топливовоздушную смесь влажного насыщенного воздуха, для получения которого разработан парогенератор на базе ультразвукового излучателя. Изложены результаты экспериментальных данных работы ДВС на топливовоздушной смеси, которые показали положительный эффект от добавления впрыском воды в топливовоздушную смесь для снижения токсичности выхлопных газов.

**REDUCTION OF TOXICITY OF  
YOU-COTTON GASES OF ICE CYCLE  
WHEN WORKING ON  
GAS-STEAM-WATER MIXTURE**

✉<sup>1</sup> **Tolstov Sergey Anatolievich**,  
candidate of technical sciences, associate professor of electrical engineering, heat engineering and hydraulics department, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozova, Voronezh, e-mail: [serezha.tolstoff@yandex.ru](mailto:serezha.tolstoff@yandex.ru)

**Panchenko Sergey Leonidovich**,  
candidate of technical sciences, associate professor of electrical engineering, heat engineering and hydraulics department, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozova, Voronezh.

**Tolstova Aleksandra Sergeevna**,  
student, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozova, Voronezh.

**Annotation.** The problem of atmospheric air pollution with toxic gases contained in the combustion products of automobile fuel and the need to solve this problem are considered. An experimental ICE installation is proposed, which makes it possible to introduce moist saturated air into a fuel-air mixture, to obtain which a steam generator based on an ultrasonic radiator is developed. The results of experimental data of the ICE operation on the fuel-water-air mixture, which showed a positive effect of adding water to the fuel-air mixture to reduce the toxicity of exhaust gases, are presented.

**Ключевые слова:** ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ, ТОПЛИВОВОЗДУШНАЯ СМЕСЬ, ПРОДУКТЫ СГОРАНИЯ, ТОКСИЧНЫЕ ГАЗЫ, ПАРОГЕНЕРАТОР, ГАЗОАНАЛИЗАТОР.

**Keywords:** INTERNAL COMBUSTION ENGINE, FUEL-AIR MIXTURE, COMBUSTION PRODUCTS, TOXIC GASES, STEAM GENERATOR, GAS ANALYZER.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

## 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Начиная с XVII века изобретатели, инженеры и ученые всего мира взялись за конструирование двигателей внутреннего сгорания. История создания и развития ДВС показала недостатки, над которыми работали создатели первых моделей двигателя, а также проблемы, с которыми они сталкивались: выбор топлива, система его дозирования и подачи; поджиг горючей смеси и система зажигания; система смазки и охлаждения; улучшение испарения топлива, уменьшение массы и габаритов и т.д. Первые рабочие образцы таких машин по современным меркам практически не производили полезной работы, так как их КПД составлял всего 3...5 %. Тем не менее настойчивость, уверенность в положительном результате и научные достижения в области термодинамики, электротехники и механики дали свои плоды. И сегодня КПД таких двигателей приближается к 50 %. За прошедшие 200 лет ДВС превратился практически в совершенную машину.

В настоящее время двигатели внутреннего сгорания являются самыми распространенными, производятся и используются повсеместно, служат человечеству в различных сферах его деятельности. В мире огромное количество авто- и мототранспорта с ДВС, используемого в промышленности и в личных целях. Объем автомобильных перевозок сегодня в пять раз превышает объем железнодорожных и в 18 раз – объем перевозок, выполняющихся морским флотом. Таким образом, можно сделать вывод, что мы живем в веке ДВС.

Несмотря на это, двигатели внутреннего сгорания являются весьма несовершенным типом тепловых машин, поскольку имеют низкий КПД, повышенную шумность, токсичные выбросы, небольшой ресурс, сложную конструкцию.

Топливом для ДВС служат фракции от переработки нефти (в основном это бензин и дизельное топливо). В настоящее время в мире эксплуатируется около полутора миллиарда автомобилей, которые потребляют более 70 % объема всей добываемой нефти. При сгорании автомобильного топлива в атмосферу выбрасываются различные токсичные вещества: оксид углерода (CO), углекислый газ (CO<sub>2</sub>), оксиды азота – (NO<sub>x</sub>), а также углеводороды (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>). Данные вещества загрязняют окружающую среду, негативно воздействуют на здоровье людей и создают серьезную экологическую озабоченность.

Таким образом, можно сказать, что одним из основных поставщиков вредных веществ в атмосферу является автомобильный транспорт, оснащенный двигателем внутреннего сгорания [1- 3, 12, 13].

Это практически заставляет отказаться от ДВС, что наглядно подтверждается постоянным ужесточением экологических требований к ним, а также политикой перевода автотранспорта на альтернативные виды топлива и электропривод.

Однако сразу перевести мировой парк транспортных средств на другой вид энергии невозможно, да и нецелесообразно, в связи с их огромным количеством. Именно поэтому во всем мире ведутся работы и применяются меры по снижению потребления топлива и вредных выбросов в атмосферу путем усовершенствования существующих ДВС.

С целью решения данной проблемы уже существует несколько основных направлений, реализуемых на сегодняшний день, а именно: работа по снижению удельного расхода топлива; применение принципиально новых конструкций двигателей; повышение качества топлива; до-

бавка в топливо присадок; использование экологически более безопасных видов топлива; утилизация или нейтрализация вредных выбросов; уменьшение массы автомобиля и улучшение его аэродинамических форм; своевременная диагностика и правильная наладка всех систем двигателя; соблюдение предписанных норм технического обслуживания (ТО).

Разработаны опытные образцы новых типов двигателей (Scuderi, Pinnacle, ОРОС, Waste Heat Engine (WHE), двигатель Стирлинга, роторные и роторно-лопастные двигатели), разрабатываются новые конструкции отдельных систем (двигатели без распределительных валов, двигатель с переменным коэффициентом сжатия, двигатель с регулируемым подъемом клапанов и т.д.); внедряются новые материалы, в том числе композитные, для корпусных и нагруженных частей двигателя, переходят на использование альтернативных видов топлива (в первую очередь природного газа, биотоплива и водорода). Однако почти все представленные выше пути повышения экологичности работы ДВС либо уже исчерпали себя, либо требуют больших материальных затрат и времени [2, 4, 5-14].

Конечно, данная работа будет продолжаться, и многие дорогие методы со временем станут незначительными, а конкретно сегодня необходимо широкомасштабно применить знакомые, известные способы по повышению эффективности работы поршневого двигателя.

Рассмотрим возможность уменьшения выброса в атмосферу токсичных газов и снижения расхода топлива при работе поршневого двигателя внутреннего сгорания.

Для примера исследуем цикл ДВС с изохорным подводом теплоты, реализуемый в бензиновом двигателе с принудительным поджигом (цикл Отто). Термический КПД цикла, другими словами, количество теплоты, превращенное в полезную работу, определяется известным уравнением:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_{ц}}{q_1}, \quad (1)$$

где  $q_1, q_2$  – соответственно количество подведенной и отведенной в цикле теплоты, Дж/кг;  $l_{ц}$  – полезная работа цикла, Дж/кг.

Кроме того, для рассматриваемого цикла Отто с изохорным подводом теплоты термический КПД можно выразить через степень сжатия:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – степень сжатия;  $k$  – показатель адиабаты.

Как следует из формулы (2), для увеличения полезной работы двигателя необходимо воздействовать либо на степень сжатия, либо на показатель адиабаты, либо на обе величины одновременно. Определяя величину, на которую необходимо воздействовать, проанализируем, как она повлияет не только на повышение КПД, но и на другие важные показатели. Например, большое значение, как было сказано выше, имеют экологические показатели выхлопных газов, расход топлива, а также необходимость внесения изменений в рабочие узлы и механизмы двигателя, ресурс работы.

Можно сказать, что наиболее известным способом достижения роста КПД является увеличение степени сжатия  $\varepsilon$ , определяемой в соответствии с выражением:

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c}, \quad (3)$$

где:  $V_a$  – полный объем цилиндра, м<sup>3</sup>;  $V_c$  – объем камеры сгорания, м<sup>3</sup>.

Выражение (3) показывает, что степень сжатия является конструктивным параметром двигателя внутреннего сгорания, определяемым относительной величиной объема сжатия рабочего тела, но в то же время несет в себе и энергетическую характеристику, отвечающую за количество подведенной теплоты и, как итог, за работу термодинамического цикла [1]. Данная работа, в свою очередь, характеризуется величиной среднего давления, представляющего собой работу за цикл, отнесенную к  $1 \text{ м}^3$  рабочего объема цилиндра:

$$p_t = \frac{L_i}{V_h}, \quad (4)$$

где:  $p_t$  – среднее давление, Па;  $L_i$  – работа цикла, Дж;  $V_h$  – рабочий объем цилиндра,  $\text{м}^3$ .

Среднее давление можно представить, как постоянное давление, которое за один ход поршня производит работу, равную работе цикла.

Учитывая, что в соответствии с (3) рабочий объем цилиндра определяется следующим образом:

$$V_h = V_a - V_c = V_a \left( \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \right), \quad (5)$$

а степень повышения давления в процессе подвода теплоты:

$$\lambda = \frac{p_z}{p_h}, \quad (6)$$

где:  $p_z$  – максимальное давление цикла, Па;  $p_h$  – давление в конце процесса сжатия, Па.

Среднее давление возможно рассчитать в соответствии со следующей зависимостью:

$$p_t = p_a \frac{\varepsilon^k \eta_t}{(k - 1)(\varepsilon - 1)} (\lambda - 1), \quad (7)$$

где:  $p_t$  – среднее давление, Па;  $p_a$  – давление начала сжатия, Па.

Уравнение (7) наглядно показывает связь степени сжатия с величиной среднего давления цикла, характеризующего работу цикла. Наглядно величину среднего давления можно показать на графике, представленном на рис. 1.

Как видно из уравнения (7), с увеличением степени сжатия среднее давление цикла повышается. Также с увеличением степени сжатия точки  $c$ ,  $l$ ,  $m$ ,  $z$  на диаграмме сместятся влево (на рис. 1 показано пунктиром), что повлечет к увеличению площади, эквивалентной работе цикла [1].

Практически увеличить степень сжатия не составляет большого труда. Для этого нужно уменьшить объем камеры сгорания, что достигается, например, заменой прокладки между головкой цилиндра и цилиндром на более тонкую, либо фрезеровкой головки. На схеме (рис. 2) хорошо видно, что при использовании одного из вариантов объем камеры сгорания уменьшается.

Так обычно и делают «умельцы» у себя в гаражах, однако поставить данный способ на конвейер, к сожалению, невозможно. Если проанализировать теоретический цикл ДВС на  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$  диаграммах (рис. 3), то можно сделать вывод, к чему это приведет.

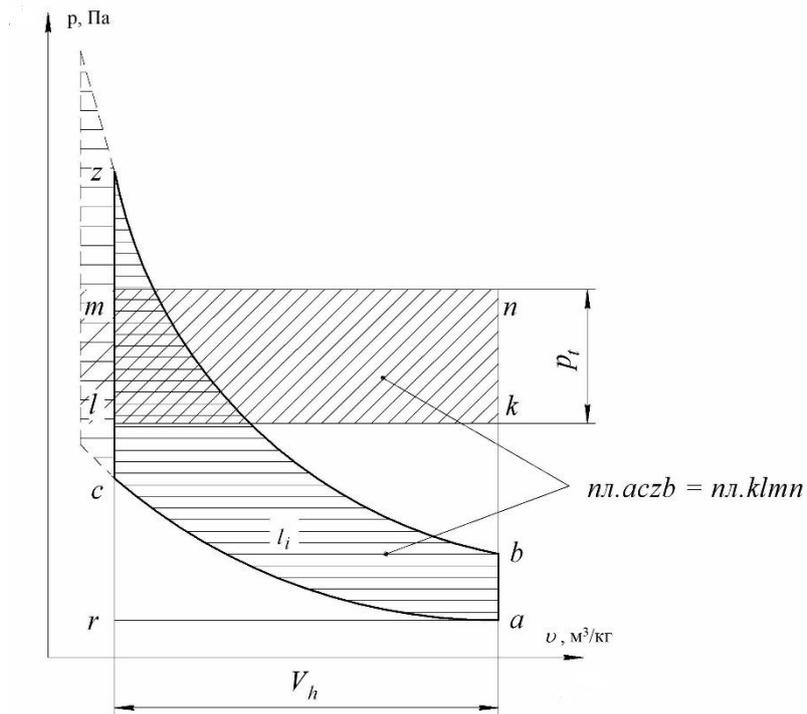


Рисунок 1 – Диаграмма и среднее индикаторное давление цикла бензинового двигателя

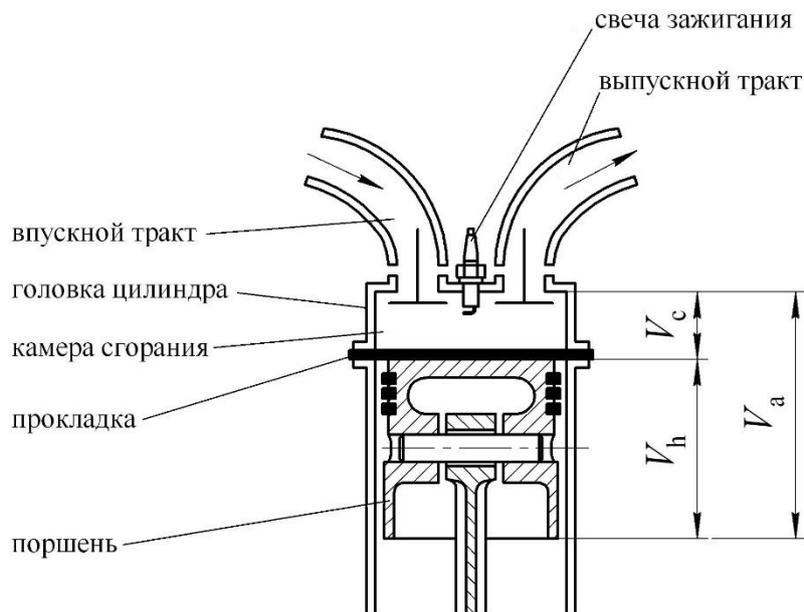
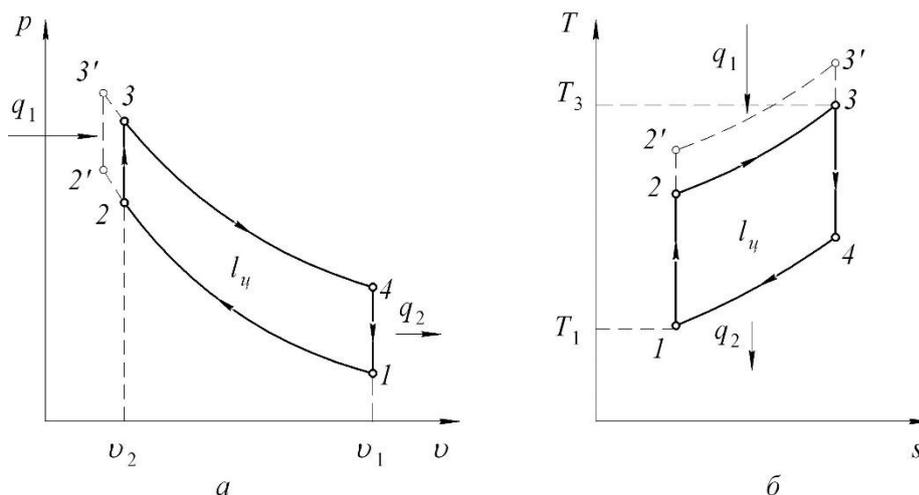


Рисунок 2 – Схема основных элементов ДВС



а) диаграмма  $p-v$ ; б) диаграмма  $T-s$ ;

1-2 – процесс сжатия топливно-воздушной смеси; 2-3 – процесс подвода теплоты;  
3-4 – процесс расширения продуктов сгорания; 4-1 – процесс отвода теплоты

Рисунок 3 – Диаграммы теоретического цикла ДВС с изохорным подводом теплоты

Из рис. 3 видно, что при уменьшении объема камеры сгорания точка 2 на  $p-v$  диаграмме, характеризующая объем рабочего тела после процесса сжатия, поднимется вверх (точка 2' на рис. 3, а), т.к. повысится давление. Это в свою очередь повлечет увеличение температуры рабочего тела, т.к. с ростом давления температура повышается, т.е. на  $T-s$  диаграмме точка 2 так же переместится вверх (точка 2' на рис. 3, б). Далее в цикле следует подвод теплоты, близкий к изохорному (т.к. топливно-воздушная смесь сгорает в цилиндре практически мгновенно и ее объем не успевает при этом измениться), при этом точка 3 примет другое положение с более высокой температурой, характеризуемой точкой 3'. Кроме того, с ростом температуры увеличивается и теплоемкость газовой смеси. Таким образом, увеличивается количество подводимой в цикле теплоты  $q_1$  и значение термического КПД, определяемого уравнениями:

$$q_1 = c_{v_{см}}(T_3 - T_2), \quad (8)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1}, \quad (9)$$

где  $c_{v_{см}}$  – удельная изохорная теплоемкость газовой смеси, Дж/(кг·К);  $T_2, T_3$  – соответственно термодинамическая температура воздуха в конце процесса сжатия и газовой смеси в конце процесса подвода теплоты, К;  $q_1, q_2$  – соответственно количество подводимой и отводимой теплоты в цикле, Дж/кг.

Однако изменение температурного режима, а именно рост температуры продуктов сгорания в цилиндре двигателя, неблагоприятно скажется на долговечности и ресурсе, ведь материалы цилиндра, поршня, клапанов, головки, прокладки рассчитаны при проектировании двигателя на определенную тепловую нагрузку. Как правило, это в скором времени приведет к термическому разрушению (прогоранию) названных элементов. Рост температуры, в свою очередь, негативно повлияет и на систему охлаждения, увеличив температуру охлаждающей жидкости, а значит, ухудшит охлаждение. Кроме того, самовольное увеличение степени сжатия, приводящее, как было сказано выше, к росту температур, непременно приводит к самовозгоранию топливно-воздушной смеси, что приводит к детонационному режиму работы двигателя, являющегося недопустимым, и ведущим, в конце концов, к его разрушению. Таким образом, увеличивая степень сжатия, одновременно необходимо решить задачу по снижению

температуры внутри камеры сгорания. Нельзя забывать и о возросшем давлении, которое будет оказывать большую силу на все внутренние элементы цилиндра и шатунно-поршневой группы (поршневой палец, шатун, коленчатый вал, подшипники, вкладыши, сальники), что также может привести к их разрушению или нарушению герметичности камеры сгорания путем утечки газа через кольца поршня, прокладку или клапаны.

Данную задачу можно решить путем замены материалов на более жаростойкие и жаропрочные, увеличить толщину деталей, настроить систему зажигания на новые условия, обеспечить надежное соединение головки с блоком цилиндров, клапанов в седлах головки, прилегание колец к поршню и цилиндру. Однако это потребует серьезного вмешательства в конструкцию и технологический процесс изготовления деталей, повлечет к увеличению массы и габаритов двигателя. По сути, необходима разработка нового двигателя, а это потребует больших капитальных вложений и удорожание двигателя. Кроме того, данные мероприятия не избавят от проблемы токсичности выхлопных газов.

Вторым способом увеличения КПД является изменение показателя адиабаты, который, как известно, зависит от рода газа, т.е. можно сказать от состава рабочей смеси, поступающей в цилиндр. Это, в свою очередь, влияет на количество выделяющегося тепла и, в конечном итоге, на КПД. Рассмотрим возможность изменения состава газа в камере сгорания путем впрыска воды в топливно-воздушную смесь. Такой метод известен давно, однако, как говорится, все новое – это хорошо забытое старое. Сохранились сведения об опытах Гюгона по впрыску воды для снижения температуры в цилиндре в двигателе Лемуара, проведенных еще в 1864 г. Технология впрыска воды широко применялась во время Второй мировой войны в радиальных поршневых авиационных двигателях самолетов для кратковременного форсажа. Автогигант Chrysler применял данный метод для увеличения мощности и снижения детонации на моделях с моторами большого объема, Saab, устанавливал систему впрыска воды на скоростном Saab 99 Turbo S вплоть до начала 1980-х годов. Для повышения мощности и охлаждения камеры сгорания система впрыска воды использовалась в автогонках Формулы-1 и WRC, и показала свою результативность. Выпускались даже комплекты впрыска, например известными фирмами AEM, Aquamist, JPlab Basic (рис. 4), которые можно было поставить на любой автомобиль, оборудованный ДВС. Однако до конвейерного производства данная технология не дошла.



Рисунок 4 – Системы впрыска воды

И в настоящее время ученые и исследователи во многих странах продолжают работы над разработкой и внедрением устройств систем для впрыска воды (или водяного пара) в ДВС.

Пока в продаже нет автомобилей с такими двигателями, но это не значит, что их нет на наших дорогах. Система впрыска воды в двигатель является одним из доступных способов тюнинга силового агрегата. Некоторые увлеченные автомобилисты и сегодня своими руками мастерят простые самодельные устройства подачи воды в двигатель и ездят на своих машинах. Что их толкает на такие эксперименты? Наблюдая за работой двигателя, они утверждают, что уменьшается расход бензина, повышается тяга. При разборке двигателя выясняется, что свечи

и поверхности контакта с продуктами сгорания имеют меньше нагара, т.е. увеличивается ресурс двигателя, а при диагностике выхлопных газов наблюдается их меньшая токсичность. Данными фактами практически подтверждается положительное влияние воды в цикле ДВС.

Время от времени тема применения воды в ДВС «всплывает» и сегодня на различных форумах, но, как правило, всё сводится к общепринятым и бесконечно повторяющимся данным. Также приводятся одни и те же примеры более или менее удачного применения воды в плане эффективности, но нет главного – конкретных цифр и результатов практических экспериментов или, в широком понимании, теории.

Рассмотрим и проанализируем данные факты. При впрыске воды, давление в процессе сжатия будет возрастать, и точка 2 на  $p-v$  диаграмме поднимется выше. Однако, в отличие от работы на обычной топливоздушном смеси, температура смеси не повысится, а понизится. Понятно, что это связано как раз с добавлением воды, имеющей уникальные свойства, а именно большую теплоемкость (теплоемкость воды равна  $4,19 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , тогда как у бензина она примерно  $2 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ) и теплоту парообразования (теплота парообразования воды равна  $2260 \text{ кДж}/\text{кг}$  при температуре  $100^\circ\text{C}$ , в то время как у топлива примерно  $300 \text{ кДж}/\text{кг}$ ). Поэтому часть теплоты, подводимой в момент сгорания топлива, идет на нагрев воды, ее испарение и перегрев пара, чем и объясняется охлаждающий эффект воды, впрыснутой в цилиндры двигателя. Благодаря высокой теплоёмкости вода значительно уменьшает температуру в двигателе, что в итоге приводит к снижению температуры смеси, а именно продуктов сгорания (именно поэтому воду используют при тушении пожаров: при соприкосновении с горящим предметом вода забирает у него большое количество теплоты, которое значительно больше, чем при использовании такого же количества любой другой жидкости). Кроме того, более низкая температура смеси в конце впуска при использовании впрыска воды приводит к увеличению плотности заряда и повышению коэффициента наполнения, что, в свою очередь, ведет к повышению среднего эффективного давления и увеличению мощности двигателя (не случайно замечено, что двигатели автомобилей имеют лучшие рабочие и мощностные показатели в дождливую погоду, когда в камеру сгорания засасывается влажный воздух).

При повышении давления температура кипения воды будет гораздо больше. Но, как известно при температуре больше  $430^\circ\text{C}$  вода переходит в газообразное состояние независимо от увеличивающегося давления, а в цилиндре двигателя температура гораздо больше. В это же время будет протекать процесс диссоциации, т.е. расщеплении молекул воды, сопровождающийся поглощением теплоты и понижением температуры.

Кроме того, при появлении в камере сгорания водяного пара уменьшается количество поступающего в нее топлива и, как следствие, меньше выделяется тепла. С другой стороны, мельчайшие капельки воды, покрытые пленкой бензина, при повышении температуры разбиваются, что способствует лучшему смесеобразованию и более полному сгоранию топлива.

Расширяющийся в цилиндре пар ( $\text{H}_2\text{O}$ ) для экологии значительно безопаснее, чем сжатый воздух. Точка 4 на  $T-s$  диаграмме опустится ниже, а количество отводимой в цикле теплоты уменьшится. Кроме того, при диссоциации вода распадается в пределах  $4...10\%$  на водород и кислород. Водород участвует в процессе сгорания, выделяя дополнительное тепло и, таким образом, экономя топливо, а кислород обеспечит более полное сгорание топлива, снижая количество вредных веществ в выхлопных газах. Кроме того, частичная замена части воздуха, который содержит до  $80\%$  азота, водяным паром, уменьшает количество токсичных оксидов азота  $\text{NO}_x$  в выхлопе, образуя безвредные  $\text{CO}_2$  (углекислый газ) и  $\text{H}_2\text{O}$  (воду).

В данном случае просматривается положительный эффект, т.к. вода расширяется при испарении в  $1700$  раз от своего объема в жидком виде, давит на поршень в цилиндре двигателя, создает паровой эффект в двигателе внутреннего сгорания, который выражается в повышении крутящего момента двигателя.

Тем не менее, несмотря на актуальность рассмотренного вопроса и положительный результат данного способа, подтвержденный практикой, внедрения его в массовое производство не произошло. Основными причинами являются недостаточная научная проработка всего

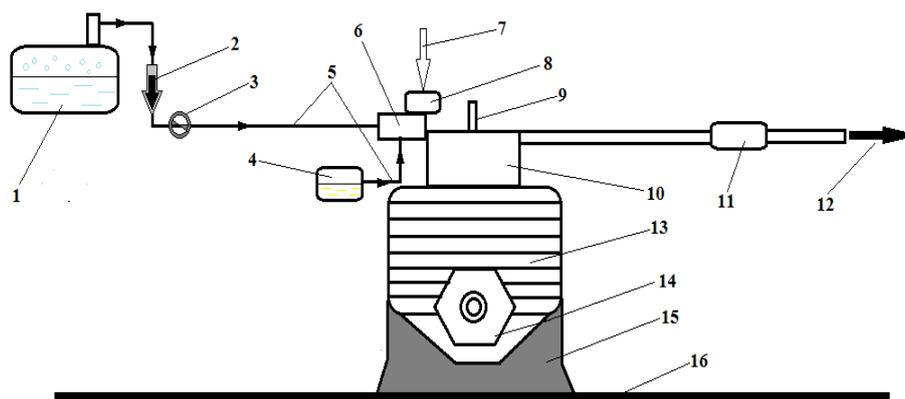
этого сложного комплекса взаимосвязанных процессов по подготовке, подаче, распылению, дозировке воды при различных условиях и режимах работы двигателя и достаточно сложная, в связи с этим, производственно-техническая задача.

Достижения научно-технического прогресса, особенно в части электроники, позволяют надеяться на положительное изменение в данной проблеме. Микропроцессор сможет следить и регулировать мгновенную подачу воды при соответствующей нагрузке с целью сохранения момента вращения маховика мотора.

## 2 Материалы и методы

Все это показывает перспективу для использования ДВС с впрыском воды. С целью экспериментального исследования процесса работы ДВС на топливо-водо-воздушной смеси разработана установка на базе четырехтактного двигателя (рис. 5).

Для получения водо-воздушной смеси разработана установка парогенератора на основе ультразвукового излучателя (рис. 6). Ультразвуковой излучатель, помещенный в воду, при помощи ультразвука превращает ее в холодный пар. При этом излучатель помещен в емкость с дистиллированной водой. Над поверхностью воды имеется пространство с целью аккумуляции пара и сепаратор для предотвращения попадания воды в выходной штуцер и вентилятор. Вентилятор создает циркуляцию воздуха: сухой (атмосферный) нагнетается в емкость, а влажный туман вытесняется из емкости в выходной штуцер, идущий к карбюратору ДВС.



1 – парогенератор, 2 – водяной пар, 3 – запорный кран, 4 – топливный бак, 5 – топливо-паропроводы, 6 – карбюратор, 7 – атмосферный воздух, 8 – воздухоочиститель, 9 – свеча зажигания, 10 – головка цилиндра, 11 – глушитель, 12 – выхлопные газы, 13 – цилиндр с картером, 14 – стартер, 15 – рама, 16 – станина

Рисунок 5 – Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования эффективности работы поршневого двигателя при использовании смеси топлива и водяного пара

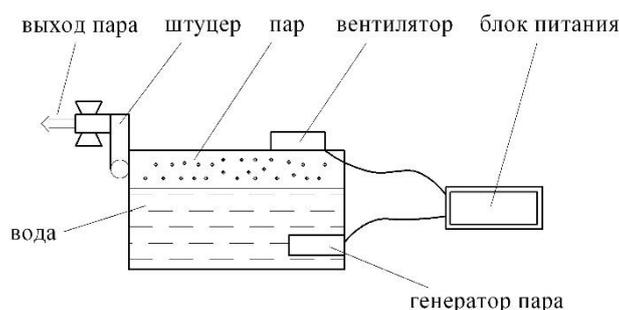


Рисунок 6 – Принципиальная схема парогенератора

На основе схемы собрана экспериментальная установка на базе четырехтактного одноцилиндрового бензинового двигателя HONDA GXV 160. Основные характеристики двигателя представлены в табл. 1.

На рис. 7 представлен внешний вид экспериментальной установки. Используемый ДВС 1 через резиновые подушки прикреплен к стальной раме 2, на которой также размещен парогенератор 3. Пар из парогенератора по паропроводу 4 непосредственно поступает в камеру смешения карбюратора 5, а оттуда непосредственно в цилиндр двигателя. Необходимый для окисления топлива кислород воздуха поступает в карбюратор из окружающей атмосферы через воздушный фильтр 6. Образовавшиеся после сгорания топлива продукты сгорания удаляются через глушитель 7.

Для снятия значений скорости вращения вала, температуры и токсичности выхлопных газов на стенде установлены тахометр, измеритель температуры с термопарами и газоанализатор. Газоанализатор «ИНФРАКАР М» предназначен для измерения объемной доли оксида углерода (CO), углеводородов (в пересчете на гексан), диоксида углерода (CO<sub>2</sub>), кислорода (O<sub>2</sub>) и оксида азота (NO) в отработавших газах автомобилей с бензиновыми двигателями.

Таблица 1 – Основные характеристики двигателя HONDA GXV 160

Тип двигателя	четырёхтактный одноцилиндровый бензиновый двигатель OHV с верхним расположением кулачков и вертикальным расположением вала
Тип гильзы цилиндра	чугунная гильза
Диаметр гильзы, мм	68
Ход поршня, мм	45
Рабочий объем, см <sup>3</sup>	163
Коэффициент сжатия	8,0 : 1
Полезная мощность	3,2 кВт (4,3 л.с.) / 3600 об/мин
Номинальная мощность	2,0 кВт (2,7 л.с.) / 3000 об/мин
Максимальный крутящий момент	9,6 Нм (0,98 кгм) / 2500 об/мин
Система зажигания	транзисторная магнето
Стандартная скорость холостого хода, об/мин	1400 + 200 / -150
Момент зажигания	фиксированный, 25° до в.м.т.
Зазор свечи зажигания, мм	0,70...0,80
Карбюратор	с горизонтальным потоком и поворотными заслонками
Система смазки	разбрызгиванием
Расход топлива при номинальной мощности	1,1 л/час – 3000 об/мин
Объем масла в двигателе, л	0,65
Применяемое топливо	бензин автомобильный АИ-92



1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – рама; 3 – парогенератор;  
4 – паропровод; 5 – карбюратор; 6 – воздушный фильтр; 7 – глушитель

Рисунок 7 – Экспериментальная установка для исследования эффективности работы поршневого двигателя при использовании смеси топлива и водяного пара

Порядок проведения экспериментов заключался в следующем. При закрытом кране подачи тумана производился запуск двигателя. После стабилизации равномерной работы на определенных оборотах включался парогенератор и открывался кран подачи тумана в камеру смешения карбюратора. При этом проводилось наблюдение за работой двигателя, как визуальное, так и по приборам, а именно фиксировались изменения частоты вращения вала, температуры выхлопных газов и их токсичность.

### 3 Результаты исследований

Основной состав используемого атмосферного воздуха представлен в табл. 2.

Таблица 2 – Основной состав атмосферного воздуха

Показатели	Значение, %
Азот	78
Кислород	20,95
Аргон	0,93
Углекислый газ	0,03
Другие газы	0,09

Реакция окисления углеводородов топлива, т.е. соединения с кислородом при высокой температуре более 1300 °С, дает образование оксидов углерода  $CO_n$ , оксидов азота  $NO_n$  и углеводородов  $C_nH_m$ . Состав продуктов сгорания исправного двигателя, работающего на стехиометрической смеси, когда отношение  $\alpha$  реального количества воздуха к теоретически необходимому для полного сжигания топлива равно единице ( $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха), имеет следующие параметры (табл. 3).

В реальном двигателе невозможно достичь идеальных значений, поэтому значение показателей выхлопных газов будут выше.

При проведении первоначальных экспериментов газоанализатор и измеритель температур показали следующие значения (табл. 4-8).

Таблица 3 – Состав продуктов сгорания ДВС, работающего на стехиометрической смеси

Показатели	Значение
CO	0,5...0,7 %
CO <sub>2</sub>	13,5...14 %
CH	100...200 млн <sup>-1</sup>
O <sub>2</sub>	0,5...1 %

Таблица 4 – Результаты эксперимента № 1

Показатели	Вредные выбросы	Вредные выбросы с использованием тумана
CO, %	6,592	6,333
CO <sub>2</sub> , %	9,567	9,183
CH, млн <sup>-1</sup>	99	87
t, °C, выхл. тр.	1028	991

Таблица 5 – Результаты эксперимента № 2

Показатели	Вредные выбросы	Вредные выбросы с использованием тумана
CO, %	6,962	6,724
CO <sub>2</sub> , %	8,944	8,930
CH, млн <sup>-1</sup>	86	76
t, °C, выхл. тр.	1129	1112

Таблица 6 – Результаты эксперимента № 3

Показатели	Вредные выбросы	Вредные выбросы с использованием тумана
CO, %	7,510	6,599
CO <sub>2</sub> , %	8,963	8,746
CH, млн <sup>-1</sup>	96	86
t, °C, выхл. тр.	1139	1128

Таблица 7 – Результаты эксперимента № 4

Показатели	Вредные выбросы	Вредные выбросы с использованием тумана
CO, %	6,833	6,257
CO <sub>2</sub> , %	9,583	9,229
CH, млн <sup>-1</sup>	89	82
t, °C, выхл. тр.	1135	1126

Таблица 8 – Результаты эксперимента № 5

Показатели	Вредные выбросы	Вредные выбросы с использованием тумана
CO, %	5,3	4,9
CO <sub>2</sub> , %	9,4	8,1
t, °C, выхл. тр.	1135	1125

#### 4 Обсуждение и заключение

Уменьшение количества вредных выбросов в атмосферу от ДВС уже на сегодняшний день является актуальной задачей в мире. Не трудно представить, как остро будет стоять эта проблема в будущем. Поэтому поиск решений этой задачи жизненно необходим. В данной работе рассмотрена возможность снижения токсичности выхлопных газов от ДВС путем добавления в топливовоздушную смесь воды в виде насыщенного влажного воздуха. Для реализации задачи разработана и смонтирована экспериментальная установка. Проведенные экспериментальные исследования выявили недостатки установки в плане определения некоторых параметров и поставили новые задачи, требующие реализации. Тем не менее, анализ первоначальных экспериментальных данных, снятых с установки, показал положительный эффект предложенного варианта. Во всех без исключения экспериментах зафиксировано снижение уровня токсичных газов: окиси углерода (CO) – на ~5 %, двуокиси углерода (CO<sub>2</sub>) – на ~5 %, углеводородов (СН) – на ~10 %. Полученные результаты вселяют уверенность в правильном выборе варианта решения задачи.

Все вышеизложенное подтверждает необходимость усовершенствования установки и дальнейшего проведения экспериментальных и теоретических исследований.

#### Список литературы

- 1 Дьяченко, Н.Х. Теория двигателей внутреннего сгорания. Рабочие процессы / Н.Х. Дьяченко. – Л.: Машиностроение, 1974. – 551 с.
- 2 Митрофанов, С.В. О ДВС, его резервах и перспективах развития глазами специалиста / С.В. Митрофанов // Вестник Пензенского государственного университета. – 2015. – № 4 (12)
- 3 Захаров, Е.А., Оценка экологической эффективности использования горючих газов как топлива для ДВС с искровым зажиганием / Е.А. Захаров, О.А. Шевякова, Д.Б. Ширшов // Молодой ученый. – 2012. – № 2 (37). – С. 29-32.
- 4 Злотин, Г.Н. Регулировка бензинового ДВС при переводе его на сжиженный нефтяной газ / Г.Н. Злотин, Е.А. Захаров, А.В. Кузьмин // Двигателестроение. – 2007. – № 2. – С.29-31.
- 5 Тамадаев, Т.В. Использование природного газа – решение экологических проблем отечественного автотранспорта [Электронный ресурс] / Т.В. Тамадаев, Л.М. Негинский, Е.В. Харченко // Юж. Рос. гос. техн. ун-т. – 2011. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-prirodnogo-gaza-reshenie-ekologicheskikh-problem-otchestvennogo-avtotransporta>.
- 6 Мефед, А.В. Перспектива применения электродвигателей в автомобилях / А.В. Мефед // Молодой ученый. – 2016. – № 11 (115). – С. 429-433.
- 7 2040 – нефть, электромобили и кое-что еще: сайт. URL: <https://www.finam.ru/analysis/newsitem/2040-neft-elektromobili-i-koe-chto-eshe-20190424-163728> (дата обращения 24.04.2023).
- 8 Современные транспортные технологии: сайт. URL: <https://azgaz.ru/gaz-world/news/gorkovskiy-avtozavod-predstavil-predseriynye-obraztsy-elektromobilya-gazelle-e-nn/> (дата обращения 01.10.2024).
- 9 Юга.ру: сайт. URL: <https://www.yuga.ru/news/453302-v-adygee-sobrali-pervyj-v-rossii-elektricheskij-mikroavtomobil/> (дата обращения 29.09.2024).
- 10 Высокие технологии: сайт. URL: <https://hightech.fm/2020/09/23/tesla-battery-day/> (дата обращения 25.10.2023).
- 11 Литвин, А.В. Современное состояние и перспективы развития пассажирского транспортного комплекса городской агломерации [Электронный ресурс] / А.В. Литвин, Ю.А. Мокрушин // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 1 – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya-passazhirskogo-transportnogo-kompleksa-gorodskoy-aglomeratsii>.
- 12 Морозов, В.А. Анализ влияния транспортных потоков на экологию / В.А. Морозов, О.Н. Морозова, Н.А. Поляков // Сб. статей XIX научно-технической конференции с международным участием на тему: «Транспорт, экология – устойчивое развитие ЭКО Варна. – Варна, 2013. – С. 416-418.
- 13 Панин, С. Совершенствование ДВС / С. Панин // журнал «За рулём». – 2002. – № 4 – С. 147-151.
- 14 Гридин, Н.А. Роторно-лопастной двигатель Гридина / Н.А. Гридин // журнал «Энергетика и промышленность России». – 2006. – № 10 (74) – С. 42-46.

References

- 1 D'achenko, N.Kh. Theory of internal combustion engine. Working processes / N.Kh. D'achenko. – L., Mechanical Engineering, 1974. – 551 p.
- 2 Mitrofanov, S.V. About internal combustion engine, reserves and development prospects through the eyes of a specialist / S.V. Mitrofanov // Bulletin of Penza State University. – 2015. – No. 4 (12).
- 3 Zakharov, E.A., Assessment of the environmental efficiency of using combustible gases as fuel for spark-ignition internal combustion engines / E.A. Zakharov, O.A. Shevyakova, D.B. Shirshov // Young scientist. – 2012. – No. 2 (37). – Pp. 29-32.
- 4 Zlotin, G.N., Adjustment of a gasoline internal combustion engine when converting it to liquefied petroleum gas / G.N. Zlotin, G.N., E.A. Zakharov, A.V. Kuz'min // Engine building. – 2007. – No. 2. – Pp. 29-31.
- 5 Tamadaev, T.V. The use of natural gas as a solution to environmental problems of domestic vehicles [Electronic resource] / T.V. Tamadaev, L.M. Neginsky, E.V. Kharchenko // South Russian State Technical University. Univ. – 2011. – Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-prirodnogo-gaza-reshenie-ekologicheskikh-problem-otekhnicheskogo-avtotransporta>.
- 6 Mefed, A.V. The prospect of using electric motors in cars / A.V. Mefed // Young Scientist. – 2016. – № 11 (115). – Pp. 429-433.
- 7 2040 – oil, electric vehicles and something else: a website. URL: <https://www.finam.ru/analysis/newsitem/2040-neft-elektromobili-i-koe-cto-eshe-20190424-163728> (accessed 04/24/2023).
- 8 Modern transport technologies: website. URL: <https://azgaz.ru/gaz-world/news/gorkovskiy-avtozavod-predstavil-predseriynye-obraztsy-elektromobilya-gazelle-e-nn/> (date of address 01.10.2024).
- 9 South.<url>: the website. URL: <https://www.yuga.ru/news/453302-v-adygee-sobrali-pervyj-v-rossii-elektricheskij-mikroavtomobil/> (accessed 29.09.2024).
- 10 High technology: a website. URL: <https://hightech.fm/2020/09/23/tesla-battery-day/> (accessed 10/25/2023).
- 11 Litvin, A.V. The current state and prospects of development of the passenger transportation complex of the urban agglomeration [Electronic resource] / A.V. Litvin, Yu.A. Mokrushin // Engineering Bulletin of the Don. – 2015. – No. 1 – Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya-passazhirskogo-transportnogo-kompleksa-gorodskoy-aglomeratsii>.
- 12 Morozov, V.A. Analysis of the impact of traffic flows on ecology / V.A. Morozov, O.N. Morozova, N.A. Polyakov // Collection of articles of the XIX scientific and technical conference with international participation on the topic: "Transport, ecology – sustainable development of ECO Varna. – Varna, 2013. pp. 416-418.
- 13 Panin, S. Improving the internal combustion engine / S. Panin // Za rulem magazine. - 2002. – No. 4 – pp. 147-151.
- 14 Gridin, N.A. Gridin's rotary-blade engine / N.A. Gridin // journal "Energy and Industry of Russia". – 2006. – № 10 (74) – Pp. 42-46.