

MIESIĘCZNIK  
POŁOCKI.

Т о м I.  
Р о к 1818.

*«Вестник Полоцкого государственного университета»  
продолжает традиции первого в Беларуси литературно-  
научного журнала «Месячник Полоцкий».*

№ 1(53), 2026

---

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
Серия В. Промышленность. Прикладные науки

В серии В научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области машиноведения и машиностроения, транспорта и химических технологий.

---

ВЕСНІК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАЎНАГА ЎНІВЕРСІТЭТА  
Серыя В. Прамысловасць. Прыкладныя навукі

У серыі В навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаваанне, змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне машыназнаўства і машынабудавання, транспарту і хімічных тэхналогій.

---

HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY  
Series B. Industry. Applied sciences

Series B includes reviewed articles which contain novelty in research and its results in machine science and mechanical engineering, transport and chemical engineering.

---

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.  
Электронная версия номера размещена на сайте: <https://journals.psu.by/industry>

Адрес редакции:  
Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,  
ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь  
тел. + 375 (214) 59 95 44, e-mail: [vestnik@psu.by](mailto:vestnik@psu.by)

Отв. за выпуск *В.П. Иванов.*  
Редактор *Т.А. Дарьянова.*

Подписано к печати 23.02.2026. Бумага офсетная 80 г/м<sup>2</sup>. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Цифровая печать.  
Усл. печ. л. 13,49. Уч.-изд. л. 16,25. Тираж экз. Заказ 97.

**МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ**

УДК 621.9

DOI 10.52928/2070-1616-2026-53-1-2-13

**ТЕСТЫ СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ  
РЕЗАНИЕМ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ  
«МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЕ СТАНКИ»***канд. техн. наук, проф. А.И. ГОЛЕМБИЕВСКИЙ**(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

*Показано, что способ формообразующей обработки резанием – это виртуальное техническое решение. По закону его функционирования посредством синтеза или функционального проектирования создается реальное техническое решение – кинематическая структура металлорежущего станка. При этом способ формообразующей обработки и синтезируемая на его основе кинематическая структура металлорежущего станка связаны общим творческим, или «изобретательским», замыслом. Разработан ряд иллюстрированных тестов в методике познания развивающего многообразия способов формообразующей обработки резанием.*

**Ключевые слова:** *способ формообразующей обработки, способ обработки как виртуальное техническое решение, многообразие способов, иллюстрация представления способов.*

**Введение.** Современная парадигма познания металлорежущих станков [1] – это не только изучение кинематических схем станочного оборудования, но и их синтез, т.е. проектирование кинематических или кинематико-компоновочных структурных схем. Такие схемы являются основой для последующей подробной разработки кинематических схем станочного оборудования. Синтез – это функциональное проектирование реального технического решения (кинематической или кинематико-компоновочной структурной схемы станка) по заданному функциональному назначению или по закону его функционирования, задаваемому виртуальным техническим решением, т.е. способом формообразующей обработки.

**Постановка задачи.** В учебном процессе при синтезе реального технического решения предпочтительно использование закона функционирования технического решения, получаемого на основе анализа виртуального технического решения – способа формообразующей обработки. В этом случае функциональное проектирование пересекается с научно-технической экспертизой изобретений, т.к. позволяет проследить путь создания, или «изобретения», кинематической структуры металлорежущего станка.

Из этого следует, что способ формообразующей обработки и соответствующая кинематическая структура металлорежущего станка связаны общим творческим, или «изобретательским», замыслом. При этом, в соответствии с нормами патентного права, способ формообразующей обработки и соответствующая кинематическая или кинематико-компоновочная структура станка могут защищаться совместным патентом или отдельными патентами. Предлагаемые тесты целесообразно использовать на промежуточных аттестациях при изучении станочного оборудования.

**Тесты.** Первые три теста выполнены по классической схеме и охватывают словарь специфических терминов [2]. Последующие тесты иллюстрированы и характерны для бифуркации, или поля ветвящихся путей эволюции способов формообразующей обработки.

**Тест 1.** Понятие «Поверхность», принятое в системологии способов формообразующей обработки, – это:

- 1) геометрическое место точек;
- 2) объединение воспроизводящих линий;
- 3) след, оставляемый образующей линией при ее перемещении по направляющей линии.

**Тест 2.** Способ формообразующей обработки – это:

- 1) схема резания;
- 2) возникновение поверхности в пространстве и времени;
- 3) целенаправленная совокупность приемов воздействия посредством инструмента на заготовку, осуществляемых в заданной последовательности с соблюдением определенных правил.

**Тест 3.** Характеристический образ инструмента – это:

- 1) передняя поверхность инструмента;
- 2) режущая кромка инструмента;
- 3) часть режущей кромки инструмента, перемещающаяся по воспроизводимым линиям при обработке.

На рисунках представлены схемы известных способов формообразующей обработки, иллюстрирующие взаимодействие заготовки и инструмента при обработке.

По рисунку 1

**Тест 1.1.** По форме режущего инструмента определить его характеристический образ:

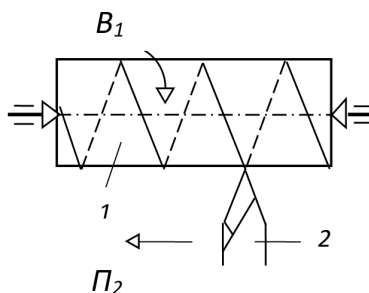
1.  $\{1\}_1$ . 2.  $\{E\}_1$ . 3.  $\{M_9\}_1$ .

**Тест 1.2.** По форме воспроизводимой поверхности, виду характеристического образа инструмента и характеру движений определить класс получения воспроизводящих линий:

- |                        |                        |
|------------------------|------------------------|
| Образующая:            | Направляющая:          |
| 1. Копирование – $E$ . | 1. Копирование – $E$ . |
| 2. След – $H^C$ .      | 2. След – $H^C$ .      |
| 3. Обкат – $H^K$ .     | 3. Обкат – $H^K$ .     |

**Тест 1.3.** Установить класс воспроизведения поверхности:

1. Копирование + след ( $E + H^C$ ).  
 2. Копирование + обкат ( $E + H^K$ ).  
 3. След + обкат ( $H^C + H^K$ ).



1 – заготовка; 2 – фасонный резец;  $\Phi_V(B_1P_2)$

Рисунок 1. – Способ нарезания резьбы

По рисунку 2

**Тест 2.1.** По форме режущего инструмента определить его характеристический образ:

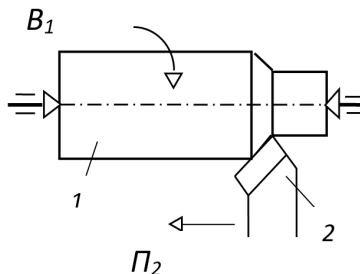
1.  $\{1\}_1$ . 2.  $\{E\}_1$ . 3.  $\{M_9\}_1$ .

**Тест 2.2.** По форме воспроизводимой поверхности, виду характеристического образа инструмента и характеру движений определить класс получения воспроизводящих линий:

- |                        |                          |
|------------------------|--------------------------|
| Образующая:            | Направляющая:            |
| 1. Копирование – $E$ . | 1. Копирование – $H^C$ . |
| 2. След – $H^C$ .      | 2. След – $H^C$ .        |
| 3. Обкат – $H^K$ .     | 3. Обкат – $H^K$ .       |

**Тест 1.3.** Установите класс воспроизведения поверхности:

1. След + след ( $H^C + H^C$ ).  
 2. Копирование + обкат ( $E + H^K$ ).  
 3. След + обкат ( $H^C + H^K$ ).



1 – заготовка; 2 – проходной резец;  $\Phi_V(B_1), \Phi_V(P_2)$

Рисунок 2. – Способ продольного точения

По рисунку 3

**Тест 3.1.** По форме режущего инструмента определить его характеристический образ:

1.  $\{M_9\}_2$ . 2.  $\{E\}_1$ . 3.  $\{M_9\}_1$ .

**Тест 3.2.** По форме воспроизводимой поверхности, виду характеристического образа инструмента и характеру движений определить класс получения воспроизводящих линий

Образующая:

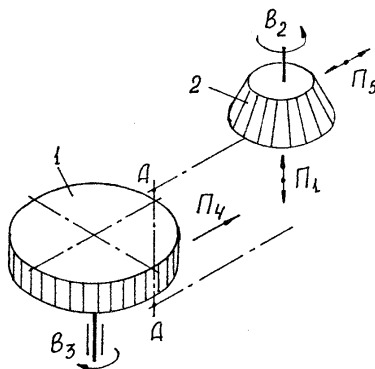
1. Копирование –  $E$ .
2. След –  $H^C$ .
3. Обкат –  $H^K$ .

Направляющая:

1. Копирование –  $E$ .
2. След –  $H^C$ .
3. Обкат –  $H^K$ .

**Тест 3.3.** Установить класс воспроизведения поверхности:

1. След + след ( $H^C + H^C$ ).
2. Копирование + обкат ( $E + H^K$ ).
3. След + обкат ( $H^C + H^K$ ).



1 – заготовка; 2 – зуборезный долбяк;  $\Phi_V(\Pi_1)$ ,  $\Phi_S(B_2B_3)$ ,  $B_P(\Pi_4)$ ,  $B_C(\Pi_5)$

Рисунок 3. – Способ зубодобления цилиндрических колес при радиальном врезании

По рисунку 4

**Тест 4.1.** По форме режущего инструмента определить его характеристический образ:

1.  $\{M_3\}_z$ .
2.  $\{E\}_1$ .
3.  $\{M_3\}_1$ .

**Тест 4.2.** По форме воспроизводимой поверхности, виду характеристического образа инструмента и характеру движений определить класс получения воспроизводящих линий

Образующая:

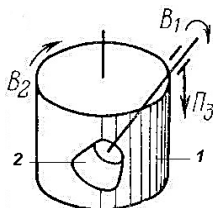
1. Копирование –  $E$ .
2. След –  $H^C$ .
3. Обкат –  $H^K$ .

Направляющая:

1. Копирование –  $E$ .
2. Обкат –  $H^K$ .
3. Обкат –  $H^K$ .

**Тест 4.3.** Установить класс воспроизведения поверхности:

1. След + след ( $H^K + H^C$ ).
2. Копирование + обкат ( $E + H^K$ ).
3. След + обкат ( $H^C + H^K$ ).



1 – заготовка; 2 – обратный резец типа зуборезного долбяка;  
 $\Phi_V(B_1B_2)$ ,  $\Phi_S(\Pi_3B_4)$

Рисунок 4. – Способ зуботочения цилиндрических зубчатых колес

По рисунку 5

**Тест 5.1.** По форме режущего инструмента определить его характеристический образ:

1.  $\{M_3\}_z$ .
2.  $\{E\}_1$ .
3.  $\{M_3\}_k$ .

**Тест 5.2.** По форме воспроизводимой поверхности, виду характеристического образа инструмента и характеру движений определить класс получения воспроизводящих линий:

Образующая:

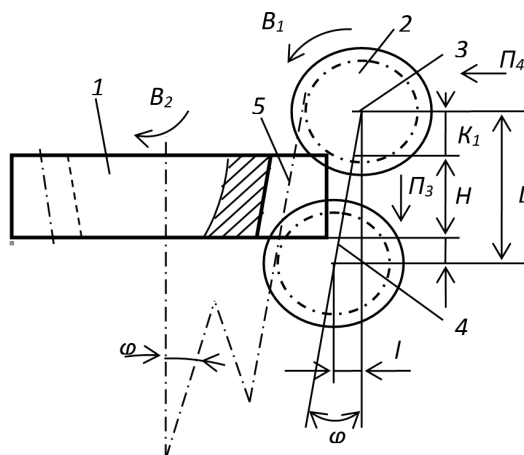
1. Копирование –  $E$ .
2. След –  $H^C$ .
3. Обкат –  $H^K$ .

Направляющая:

1. Касание –  $\Pi$ .
2. След –  $H^C$ .
3. Касание –  $\Pi$ .

**Тест 5.3.** Установить класс воспроизведения поверхности:

1. Обкат + касание ( $H^K + П$ ).
2. Копирование + обкат ( $E + H^K$ ).
3. След + обкат ( $H^C + H^K$ ).



1 – нарезаемое колесо; 2 – червячная фреза; 3 – ось фрезы;  
4 – эквидистанта; 5 – делительный конус

**Рисунок 5.** – Способ нарезания цилиндрических прямозубых зубчатых колес с наклонными зубьями по патенту 134 (BY)

По рисунку 6

**Тест 6.1.** По форме режущего инструмента определите его характеристический образ:

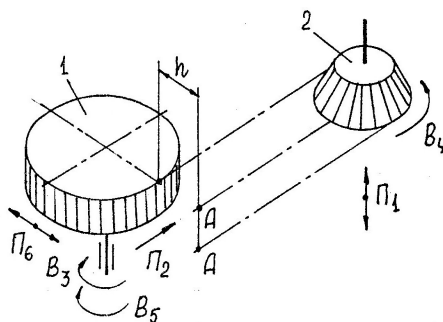
1.  $\{M_3\}_z$ . 2.  $\{E\}_1$ . 3.  $\{M_3\}_k$ .

**Тест 6.2.** По форме воспроизводимой поверхности, виду характеристического образа инструмента и характеру движений определите класс получения воспроизводящих линий:

- |                        |                    |
|------------------------|--------------------|
| Образующая:            | Направляющая:      |
| 1. Копирование – $E$ . | 1. Касание – $П$ . |
| 2. След – $H^C$ .      | 2. Обкат – $H^K$ . |
| 3. Обкат – $H^K$ .     | 3. Обкат – $H^K$ . |

**Тест 6.3.** Установите класс воспроизведения поверхности:

1. Обкат + касание ( $H^K + П$ ).
2. Копирование + обкат ( $E + H^K$ ).
3. След + обкат ( $H^C + H^K$ ).



1 – нарезаемая заготовка; 2 – долбяк

**Рисунок 6.** – Способ зубодолбления с касательным врезанием по патенту 475761 (SU)

По рисунку 7

**Тест 7.1.** По форме режущего инструмента определите его характеристический образ:

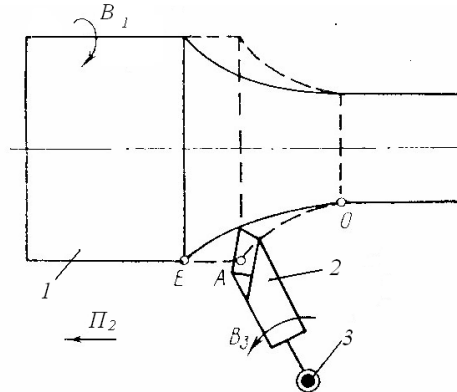
1.  $\{M_3\}_1$ . 2.  $\{E\}_1$ . 3.  $\{M_3\}_1$ .

**Тест 7.2.** По форме воспроизводимой поверхности, виду характеристического образа инструмента и характеру движений определите класс получения воспроизводящих линий:

- |                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| Образующая:            | Направляющая:        |
| 1. Копирование – $E$ . | 1. Касание – $\Pi$ . |
| 2. След – $H^C$ .      | 2. След – $H^C$ .    |
| 3. Обкат – $H^K$ .     | 3. Обкат – $H^K$ .   |

**Тест 7.3.** Установите класс воспроизведения поверхности:

1. Обкат + касание ( $H^K + \Pi$ ).
2. Копирование + обкат ( $E + H^K$ ).
3. След + след ( $H^C + H^C$ ).



1 – заготовка; 2 – резец;  $\Phi_v(B_3)$ ,  $\Phi_{s1}(B_1)$ ,  $\Phi_{s2}(\Pi_2)$

**Рисунок 7.** – Способ прерывистого точения по авторскому свидетельству 228463 (SU)

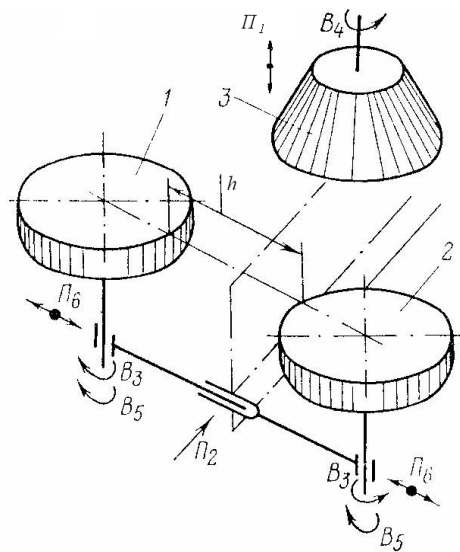
По рисунку 8

**Тест 8.1.** По форме режущего инструмента определит его характеристический образ:

1.  $\{M_3\}_z$ .
2.  $\{E\}_1$ .
3.  $\{M_3\}_K$ .

**Тест 8.2.** По форме воспроизводимой поверхности, виду характеристического образа инструмента и характеру движений определить класс получения воспроизводящих линий:

- |                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| Образующая:            | Направляющая:        |
| 1. Копирование – $E$ . | 1. Касание – $\Pi$ . |
| 2. След – $H^C$ .      | 2. Обкат – $H^K$ .   |
| 3. Обкат – $H^K$ .     | 3. Обкат – $H^K$ .   |



1, 2 – заготовки; 3 – зуборезный долбяк;  
 $\Phi_v(\uparrow \Pi_1)$ ;  $\Phi_s(B_4 B_5)$ ;  $B_p(\Pi_2 B_3)$ ;  $B_c(\uparrow \Pi_6)$

**Рисунок 8.** – Способ одновременной (параллельной) обработки двух зубчатых колес одним долбяком по авторскому свидетельству 574283 (SU)

**Тест 8.3.** Установите класс воспроизведения поверхности:

1. Обкат + касание ( $H^K + П$ ).
2. Копирование + обкат ( $E + H^K$ ).
3. След + обкат ( $H^C + H^K$ ).

По рисунку 9

**Тест 9.1.** По форме режущего инструмента определить его характеристический образ:

1.  $\{M_9\}_z$ .
2.  $\{E\}_1$ .
3.  $\{M_9\}_k$ .

**Тест 9.2.** По форме воспроизводимой поверхности, виду характеристического образа инструмента и характеру движений определить класс получения воспроизводящих линий:

Образующая:

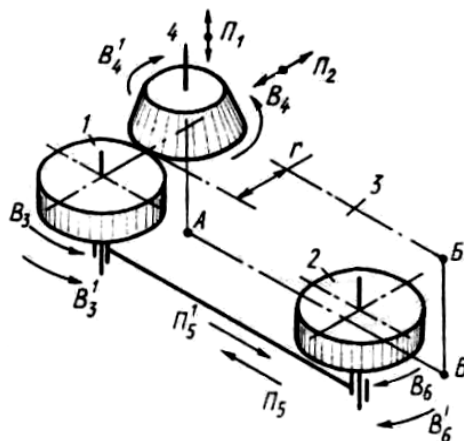
1. Копирование –  $E$ .
2. След –  $H^C$ .
3. Обкат –  $H^K$ .

Направляющая:

1. Касание –  $П$ .
2. Обкат –  $H^K$ .
3. Обкат –  $H^K$ .

**Тест 9.3.** Установите класс воспроизведения поверхности:

1. Обкат + касание ( $H^K + П$ ).
2. Копирование + обкат ( $E + H^K$ ).
3. След + обкат ( $H^C + H^K$ ).



1, 2 – нарезаемые заготовки; 3 – плоскость касательного врезания; 4 – зуборезный долбяк.

Заготовка 1:

$\Phi_v \uparrow (П_1); Vc \uparrow (П_2); П_3 (П_5); Vp (П_5 B_6); \Phi_s (B_4 B_6')$ .

Заготовка 2:

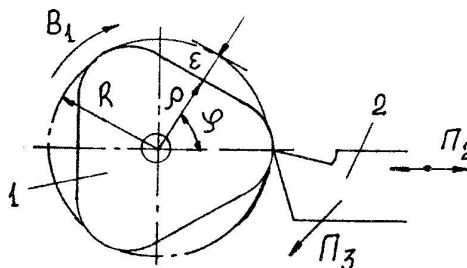
$\Phi_v \uparrow (П_1); Vc \uparrow (П_2); П_3 (П_5'); Vp (П_5' B_3'); \Phi_s (B_4' B_3)$

Рисунок 9. – Способ последовательного нарезания двух зубчатых колес одним долбяком по авторскому свидетельству 1641533 (SU)

По рисунку 10

**Тест 10.1.** По форме режущего инструмента определите его характеристический образ:

1.  $\{M_9\}_z$ .
2.  $\{E\}_1$ .
3.  $\{M_9\}_1$ .



1 – заготовка; 2 – резец;  $\Phi_v (B_1 \uparrow П_2); \Phi_s (П_3)$ .

Радиус-вектор профиля описывается выражением:  $\rho = R - \epsilon (1 - \cos n\phi)$ , где  $\rho$  – радиус-вектор образующей;  $R$  – радиус выступов;  $n$  – количество выступов;  $\phi$  – угловой параметр

Рисунок 10. – Способ точения поверхностей синусоидального профиля

**Тест 10.2.** По форме воспроизводимой поверхности, виду характеристического образа инструмента и характеру движений определить класс получения воспроизводящих:

Образующая:	Направляющая:
1. Копирование – $E$ .	1. Касание – $П$ .
2. След – $H^C$ .	2. След – $H^C$ .
3. Обкат – $H^K$ .	3. Обкат – $H^K$ .

**Тест 10.3.** Установить класс воспроизведения поверхности:

1. Обкат + касание ( $H^K + П$ ).
2. Копирование + обкат ( $E + H^K$ ).
3. След + след ( $H^C + H^C$ ).

По рисунку 11

**Тест 11.1.** По форме режущего инструмента определить его характеристический образ:

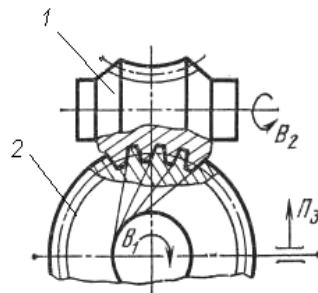
1.  $\{M_3\}_z$ . 2.  $\{E\}_1$ . 3.  $\{M_3\}_k$ .

**Тест 11.2.** По форме воспроизводимой поверхности, виду характеристического образа инструмента и характеру движений определить класс получения воспроизводящих линий:

- |                        |                    |
|------------------------|--------------------|
| 1. Копирование – $E$ . | 1. Обкат – $H^K$ . |
| 2. След – $H^C$ .      | 2. След – $H^C$ .  |
| 3. Обкат – $H^K$ .     | 3. Обкат – $H^K$ . |

**Тест 11.3.** Установите класс воспроизведения поверхности:

1. Обкат + касание ( $H^K + П$ ).
2. Копирование + обкат ( $E + H^K$ ).
3. Копирование + обкат ( $E + H^K$ ).



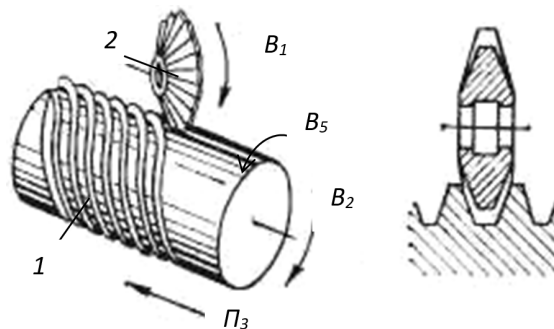
1 – нарезаемая заготовка; 2 – обкатной инструмент типа долбяка;  
 $\Phi_v(B_1B_2)$ ;  $Bp(П_3)$

Рисунок 11. – Способ нарезания глобоидного червяка

По рисунку 12

**Тест 12.1.** По форме режущего инструмента определить его характеристический образ:

1.  $\{M_3\}_z$ . 2.  $\{E\}_1$ . 3.  $\{M_3\}_k$ .



1 – заготовка; 2 – фасонная (профильная) фреза;  
 $\Phi_v(B_1)$ ,  $\Phi_v(B_2П_3)$ ,  $D(B_5)$

Рисунок 12. – Способ фрезерования многозаходной резьбы

**Тест 12.2.** По форме воспроизводимой поверхности, виду характеристического образа инструмента и характеру движений определите класс получения воспроизводящих линий:

- |                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| 1. Копирование – $E$ . | 1. Касание – $\Pi$ . |
| 2. След – $H^C$ .      | 2. След – $H^C$ .    |
| 3. Обкат – $H^K$ .     | 3. Обкат – $H^K$ .   |

**Тест 12.3.** Установить класс воспроизведения поверхности:

1. Обкат + касание ( $H^K + \Pi$ ).
2. Копирование + касание ( $E + \Pi$ ).
3. След + обкат ( $H^C + H^K$ ).

По рисунку 13

**Тест 13.1.** По форме режущего инструмента определить его характеристический образ:

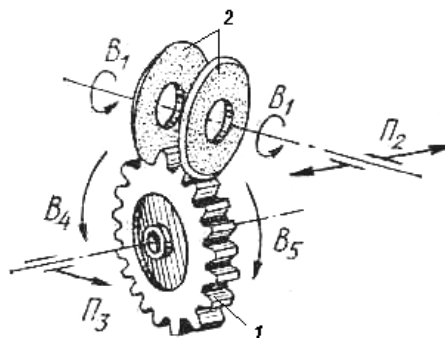
1.  $\{M_9\}_z$ .
2.  $\{E\}_1$ .
3.  $\{M_9\}_2$ .

**Тест 13.2.** По форме воспроизводимой поверхности, виду характеристического образа инструмента и характеру движений определить класс получения воспроизводящих линий:

- |                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| 1. Копирование – $E$ . | 1. Касание – $\Pi$ . |
| 2. След – $H^C$ .      | 2. След – $H^C$ .    |
| 3. Касание – $\Pi$ .   | 3. Обкат – $H^K$ .   |

**Тест 13.3.** Установите класс воспроизведения поверхности:

1. Касание + обкат ( $\Pi + H^K$ ).
2. Копирование + касание ( $E + \Pi$ ).
3. След + обкат ( $H^C + H^K$ ).



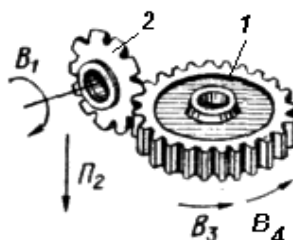
1 – шлифуемое колесо; 2 – тарельчатые шлифовальные круги;  
 $\Phi_v(B_1), \Phi_{s1}(\Pi_2), \Phi_{s2}(\Pi_3 B_4), D(B_5)$

**Рисунок 13.** – Способ шлифования цилиндрического зубчатого колеса двумя дисковыми кругами

По рисунку 14

**Тест 14.1.** По форме режущего инструмента определить его характеристический образ:

1.  $\{M_9\}_z$ .
2.  $\{E\}_1$ .
3.  $\{M_9\}_k$ .



1 – нарезаемая заготовка; 2 – модульная фреза;  
 $\Phi_v(B_1), \Phi_s(\Pi_2), D(B_3)$

**Рисунок 14.** – Способ зубофрезерования цилиндрических прямозубых зубчатых колес

**Тест 14.2.** По форме воспроизводимой поверхности, виду характеристического образа инструмента и характеру движений определить класс получения воспроизводящих линий:

- |                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| 1. Копирование – $E$ . | 1. Касание – $\Pi$ . |
| 2. След – $H^C$ .      | 2. След – $H^C$ .    |
| 3. Обкат – $H^K$ .     | 3. Обкат – $H^K$ .   |

**Тест 14.3.** Установить класс воспроизведения поверхности:

1. Обкат + касание ( $H^K + П$ ).
2. Копирование + касание ( $E + П$ ).
3. След + обкат ( $H^C + H^K$ ).

По рисунку 15

**Тест 15.1.** По форме режущего инструмента определить его характеристический образ:

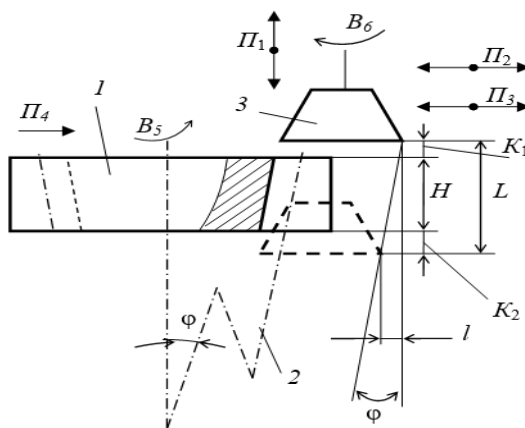
1.  $\{M_3\}_z$ . 2.  $\{E\}_1$ . 3.  $\{M_3\}_k$ .

**Тест 15.2.** По форме воспроизводимой поверхности, виду характеристического образа инструмента и характеру движений определите класс получения воспроизводящих линий:

- |                        |                    |
|------------------------|--------------------|
| 1. Копирование – $E$ . | 1. Касание – $П$ . |
| 2. След – $H^C$ .      | 2. След – $H^C$ .  |
| 3. След – $H^C$ .      | 3. Обкат – $H^K$ . |

**Тест 15.3.** Установите класс воспроизведения поверхности:

1. Обкат + касание ( $H^K + П$ ).
2. Копирование + обкат ( $E + H^K$ ).
3. След + обкат ( $H^C + H^K$ ).



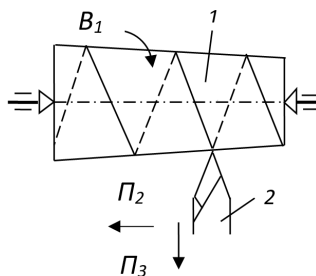
1 – нарезаемая заготовка; 2 – ось зуба; 3 – зуборезный долбяк;  $\phi$  – делительный конус;  $\Phi_v \uparrow (П_1 П_2)$ ;  $\Phi_s (B_5 B_6)$ ;  $B_p (П_4)$ ;  $B_c \uparrow (П_3)$

Рисунок 15. – Способ долбления цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями по патенту 3343 (ВУ)

По рисунку 16

**Тест 16.1.** По форме режущего инструмента определить его характеристический образ:

1.  $\{M_3\}_z$ . 2.  $\{E\}_1$ . 3.  $\{M_3\}_k$ .



1 – нарезаемая заготовка; 2 – резбонарезной резец;  $\Phi_v (B_1 П_2)$ ,  $\Phi_s (П_2 П_3)$

Рисунок 16. – Способ нарезания конической резьбы

**Тест 16.2.** По форме воспроизводимой поверхности, виду характеристического образа инструмента и характеру движений определить класс получения воспроизводящих линий:

- |                        |                    |
|------------------------|--------------------|
| 1. Копирование – $E$ . | 1. След – $H^C$ .  |
| 2. След – $H^C$ .      | 2. След – $H^C$ .  |
| 3. Обкат – $H^K$ .     | 3. Обкат – $H^K$ . |

**Тест 16.3.** Установите класс воспроизведения поверхности:

1. Обкат + касание ( $H^K + П$ ).
2. Копирование + обкат ( $E + H^K$ ).
3. Копирование + след ( $E + H^C$ ).

По рисунку 17

**Тест 21.1.** По форме режущего инструмента определите его характеристический образ:

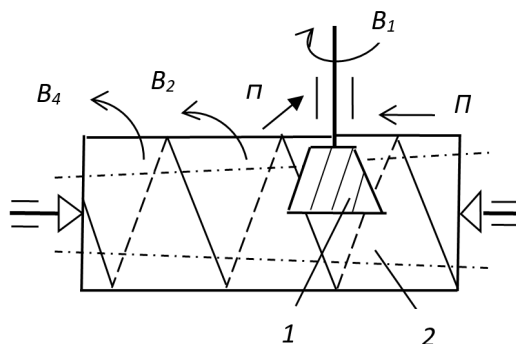
1.  $\{M_9\}_z$ .
2.  $\{E\}_1$ .
3.  $\{M_9\}_k$ .

**Тест 17.2.** По форме воспроизводимой поверхности, виду характеристического образа инструмента и характеру движений определить класс получения воспроизводящих линий:

- |                        |                    |
|------------------------|--------------------|
| 1. Копирование – $E$ . | 1. Касание – $П$ . |
| 2. След – $H^C$ .      | 2. След – $H^C$ .  |
| 3. Обкат – $H^K$ .     | 3. След – $H^C$ .  |

**Тест 17.3.** Установить класс воспроизведения поверхности:

1. Обкат + касание ( $H^K + П$ ).
2. Копирование + обкат ( $E + H^K$ ).
3. Обкат + след ( $H^K + H^C$ ).



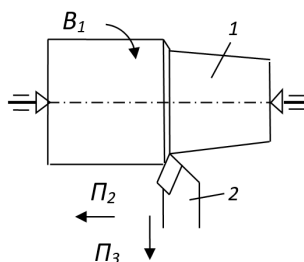
1 – обкатной инструмент; 2 – обрабатываемый червяк;  
 $\Phi_v(B_1B_2), \Phi_s(П_3B_4П_5)$

**Рисунок 17.** – Способ обработки двухшаговых цилиндрических червяков обкатным инструментом типа долбяка

По рисунку 18

**Тест 18.1.** По форме режущего инструмента определить его характеристический образ:

1.  $\{M_9\}_z$ .
2.  $\{E\}_1$ .
3.  $\{M_9\}_k$ .



1 – обрабатываемая заготовка; 2 – проходной резец;  
 $\Phi_v(B_1), \Phi_s(П_2П_3)$

**Рисунок 18.** – Способ точения конической поверхности

**Тест 18.2.** По форме воспроизводимой поверхности, виду характеристического образа инструмента и характеру движений определить класс получения воспроизводящих линий:

- |                        |                    |
|------------------------|--------------------|
| 1. Копирование – $E$ . | 1. Касание – $П$ . |
| 2. След – $H^C$ .      | 2. След – $H^C$ .  |
| 3. Обкат – $H^K$ .     | 3. Обкат – $H^K$ . |

**Тест 18.3.** Установить класс воспроизведения поверхности:

1. Обкат + касание ( $H^K + П$ ).
2. Копирование + обкат ( $E + H^K$ ).
3. След + след ( $H^C + H^C$ ).

По рисунку 19

**Тест 19.1.** По форме режущего инструмента определить характеристический образ:

1.  $\{M_3\}_z$ . 2.  $\{E\}_1$ . 3.  $\{M_3\}_k$ .

**Тест 19.2.** По форме воспроизводимой поверхности, виду характеристического образа инструмента и характеру движений определить класс получения воспроизводящих линий:

- |                     |                    |
|---------------------|--------------------|
| 1. Копирование – E. | 1. Касание – П.    |
| 2. След – $H^C$ .   | 2. След – $H^C$ .  |
| 3. След – $H^C$ .   | 3. Обкат – $H^K$ . |

**Тест 19.3.** Установите класс воспроизведения поверхности:

1. Обкат + касание ( $H^K + П$ ).  
 2. Копирование + обкат ( $E + H^K$ ).  
 3. След + след ( $H^C + H^C$ ).



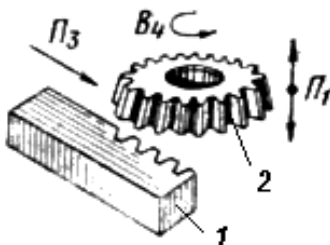
1 – нарезаемая заготовка; 2 – долбяк;  $\Phi_v \uparrow (П_1)$ ,  $B_p(П_2 B_3 B_4)$ ,  $\Phi_s(B_4 B_5)$ ,  $B_c \uparrow (П_6)$ .  
 а – общий вид; б – схема врезания долбяка по спирали

Рисунок 19. – Способ зубодобления с врезанием долбяка по спирали по патенту 1763112 (SU)

По рисунку 20

**Тест 20.1.** По форме режущего инструмента определите его характеристический образ:

1.  $\{M_3\}_z$ . 2.  $\{E\}_1$ . 3.  $\{M_3\}_k$ .



1 – нарезаемая рейка; 2 – долбяк;  $\Phi_v(П_1)$ ,  $\Phi_s(П_3 B_4)$ ,  $B_c \uparrow (П_2)$

Рисунок 20. – Способ нарезания зубьев рейки зуборезным долбяком (движение «отскока»  $П_2$ , перпендикулярное  $П_1$  долбяка от обрабатываемой рейки при его холостом ходе в движении  $П_1$ , не показано)

**Тест 20.2.** По форме воспроизводимой поверхности, виду характеристического образа инструмента и характеру движений определите метод получения воспроизводящих линий (образующей и направляющей) обрабатываемой поверхности:

- |                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| 1. Копирование – $E$ . | 1. Касание – $\Pi$ . |
| 2. След – $H^C$ .      | 2. След – $H^C$ .    |
| 3. След – $H^C$ .      | 3. Обкат – $H^K$ .   |

**Тест 20.3.** Установите класс воспроизведения поверхности:

1. Обкат + касание ( $H^K + \Pi$ ).
2. Копирование + обкат ( $E + H^K$ ).
3. След + обкат ( $H^C + H^K$ ).

**Заключение.** Выбранные для тестирования способы формообразующей обработке резанием выбраны для тестирования произвольно из аттракторов (коридоров) бифуркации – поля ветвящихся виртуальных путей эволюции способов формообразующей обработки резанием. Аналогично можно тестировать способы формообразующей обработки при использовании других видов обработки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Голембиевский А.И. Современная парадигма познания металлорежущих станков. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2021. – 224 с.
2. Голембиевский А.И. Системология способов формообразующей обработки в машиностроении. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2017. – 236 с.

Поступила 30.09.2025

### TESTS OF SHAPING PROCESSING METHODS CUTTING WHILE STUDYING THE DISCIPLINE METAL CUTTING MACHINES

A. GOLEMBIEVSKY

(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*It is shown that the method of shaping cutting is a virtual technical solution, according to the law of its functioning, a real technical solution is created through synthesis or functional design - the kinematic structure of a metal-cutting machine. At the same time, the method of forming processing and the kinematic structure of a metal-cutting machine synthesized on its basis are connected by a common creative or "inventive" idea. Illustrated tests have been developed in the methodology of cognition of the developing variety of methods of shaping cutting.*

**Keywords:** *the method of forming processing, the method of processing as a virtual technical solution, a variety of methods, an illustration of methods.*

УДК 621([91.01/02]:[793.1/71])

DOI 10.52928/2070-1616-2026-53-1-14-23

**ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ И РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ С РЕГУЛЯРНЫМ МИКРОРЕЛЬЕФОМ И ИЗНОСОСТОЙКИМ ПОКРЫТИЕМ**

*д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук, проф. В.А. КУКАРЕКО<sup>2</sup>,  
канд. техн. наук, доц. Р.С. ХМЕЛЬНИЦКИЙ<sup>1</sup>, А.В. КУШНЕРОВ<sup>2</sup>, В.С. АНИСИМОВ<sup>1</sup>,  
канд. техн. наук, доц. С.И. ДМИТРИЕВ<sup>3</sup>*

*(<sup>1</sup>Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой;*

*<sup>2</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск;*

*<sup>3</sup>Псковский государственный университет)*

*Целью работы является повышение надежности деталей машин и режущих инструментов, функционирующих в экстремальных условиях фрикционного взаимодействия с большими величинами давления и температуры. Для достижения поставленной цели решаются задачи разработки кинематических схем формообразования микрорельефа поверхности и технологических основ нанесения комбинированного газотермического и вакуумного ионно-плазменного покрытия. В качестве объектов исследований выбраны детали плунжерной пары и режущие инструменты. Используются экспериментальные методы исследований структуры, а также современные приборы и аппаратура для определения микротвердости и адгезии покрытий. Приведены результаты измерения твердости и микротвердости, рентгеновские дифрактограммы поверхностного слоя, зависимости акустической эмиссии и коэффициента трения газотермических, комбинированных и ионно-плазменных покрытий.*

**Ключевые слова:** *формообразование, микрорельеф, поверхность, газотермические, ионно-плазменные и комбинированные покрытия, микротвердость, адгезия.*

**Введение.** В современных промышленных технологиях широко используются износостойкие покрытия для повышения эксплуатационной надежности деталей машин и режущих инструментов, функционирующих в экстремальных условиях фрикционного взаимодействия при больших давлениях и температурах.

Одним из перспективных методов улучшения физико-механических свойств материалов является комбинированное воздействие на поверхности деталей и инструментов путем последовательного нанесения регулярного микрорельефа и покрытий методами газотермического напыления, а также вакуумного ионно-плазменного осаждения [1]. При этом используются различные способы лезвийной и абразивной обработки [2; 3], а также газотермического [4; 5] и вакуумного ионно-плазменного [6] нанесения покрытий из различных материалов [7]. Рекомендуется, в основном, традиционная «треугольная нарезка» поверхностей основы под покрытие токарной обработкой и шлифованием, использование в качестве упрочняющих материалов титановых сплавов, углеродистых инструментальных сталей, фаз внедрения (карбидов, боридов, нитридов), азотных и углекислых газовых сред.

Актуальным является исследование прогрессивных способов формообразования поверхностей основы с регулярным микрорельефом и сочетания нанесения различных упрочняющих покрытий.

В данной статье рассмотрены результаты исследований схем видов лезвийной обработки поверхностей с вращательными движениями заготовки и инструмента и относительного их перемещения в движении подачи, обеспечивающих получение «сетчатой» поверхности детали, газотермического нанесения покрытия из порошка ПГ-Ю-НХ16СР3 на поверхности деталей плунжерной пары и вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN на поверхности лезвий инструмента из стали 9ХС, твердых сплавов ВК10 и Т5К10.

**Основная часть. Методика и материалы исследований.** В качестве образцов для исследования использовались плунжерные пары «втулка–плунжер из стали 40Х (рисунок 1), на рельефные поверхности которых наносилось покрытие газотермическим методом при различных технологических условиях:

- образец I: напыление, оплавление в печи, шлифование;
- образец II: напыление, оплавление в печи, шлифование;
- образец III: напыление, газопламенное оплавление, шлифование;
- образец IV: напыление, без оплавления, шлифование.

Применялся порошок композиционный терморезирующий марки ПГ-Ю-НХ16СР3, ТУ14-22-76-95 различного фракционного состава. Покрытие из этого материала имеет следующие основные свойства: стойкость к удару, высокое сопротивление абразивному износу, фреттинг-коррозии, кавитационной эрозии, окислению на воздухе до 800 °С, коррозии в водных, щелочных средах и других промышленных агрессивных средах. Обработка резанием и шлифованием. Из порошка формируются износостойкие покрытия на деталях оборудования энергетического машиностроения (насосы, запорная арматура для нефтепромыслов, металлургического оборудования горячих цехов, штампового инструмента, экструдеров шинных заводов, деталей автомобильного, судового и железнодорожного транспорта, например, лопастей гребных винтов, деталей тепловозов, сцепок вагонов и пр.).

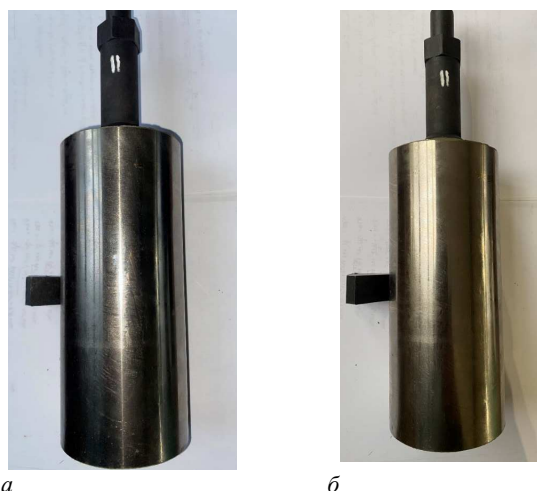


Рисунок 1. – Внешний вид плунжерных пар с покрытием ПГ-Ю-НХ16СР3 (а) и с покрытием ПГ-Ю-НХ16СР3+TiN (б)

Химический состав порошка ПГ-Ю-НХ16СР3: хром – 16%, бор – 2,7%, кремний – 3,2%, железо – <5%, углерод – 0,75%. Твердость 47...52 HRC. Температура плавления 1040 °С. Такой состав используется для детонационного и высокоскоростного напыления покрытий толщиной 20–63 мкм, для плазменного и газопламенного напыления покрытий толщиной 40–100 мкм, для наплавки покрытий толщиной 100–160 мкм.

Образцы с покрытием TiN формировались методом вакуумного ионно-плазменного осаждения на подложках из предварительно отожженной стали 9ХС (твердость 270 HV 10), а также твердых сплавов Т5К10 и ВК10 с твердостью  $\approx 1400$  HV 10. Нанесение покрытий проводилось на специализированной установке модели РVM-0,5FN. Режим нанесения: ток – 85 А, температура – 190 °С, давление –  $3 \cdot 10^{-3}$  МПа, время нанесения покрытия – 30 мин. Толщина покрытий составляет порядка  $\sim 2$  мкм. Внешний вид образцов из инструментальных материалов с покрытием TiN представлен на рисунке 2.

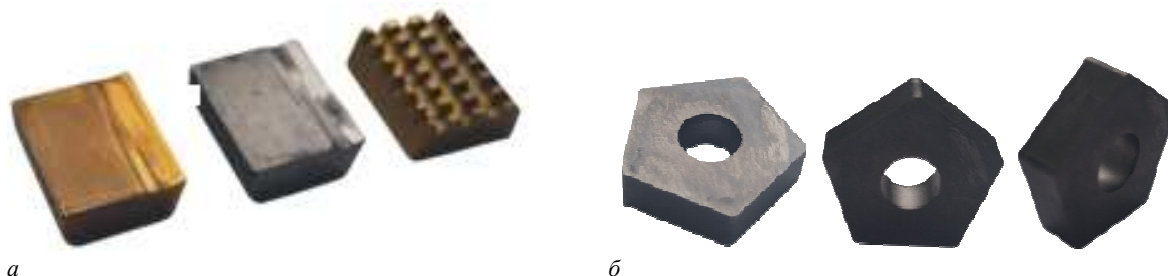


Рисунок 2. – Внешний вид твердосплавных пластин с покрытием на рельефных (а) и безрельфных (б) поверхностях

Рентгеноструктурный анализ фазового состава покрытий проводился на дифрактометре POWDIX 600 в монохроматизированном  $\text{CoK}\alpha$  излучении при напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА.

Микротвердость покрытий измерялась на твердомере Nano Hardness Tester (NHT2) фирмы CSM Instruments с применением алмазного индентора Берковича. Нагрузка на индентор составляла 5 г.

Для определения нагрузки полного отслаивания (Lc3) покрытий TiN от подложки проводились испытания методом скретч-тестирования на трибометре MFT-5000. К поверхности образца с покрытием подводился индентор Роквелла (алмазный наконечник с радиусом при вершине 20 мкм и углом 120°). Далее индентор перемещался по испытываемой поверхности и одновременно прикладывалась постепенно увеличивающаяся нагрузка в пределах от 1 до 50 Н для подложки стали 9ХС и от 5 до 200 Н для сплавов Т5К10 и ВК10. Нагрузка полного отслаивания (Lc3) покрытия от подложки определялась по резкому увеличению значений коэффициента трения и анализу микроструктуры царапины.

*Формирование микрорельефа поверхности основы.* Создание рельефа поверхностей основы обеспечивается скоростной обработкой лезвийным инструментом, работающим по схемам фрезерования с касательным движением инструмента и частотой его вращения до 10000 мин<sup>-1</sup> (таблица 1). Устанавливается соотношение частот вращения инструмента и заготовки более 100 при фрезеровании и порядка 0,5÷0,6 при токарной обработке.

При торцовом фрезеровании (таблица 1, п. 1.1) фреза совершает вращательное главное движение резания  $D_r$ , а заготовка – движение подачи  $D_s$ , направленное перпендикулярно оси вращательного главного движения (таблица 1, п. 2.1). При этом траектория резания имеет вид циклоиды (таблица 1, пп. 3.1 и 4.1). При плунжерном фрезеровании (таблица 1, п. 1.2) фреза совершает главное вращательное движение  $D_r$  и движение подачи  $D_s$  вдоль оси вращательного главного движения (таблица 1, п. 2.2), заготовка неподвижна. Вид траектории резания – винтовая линия (таблица 1, пп. 3.2, 4.2).

При обработке цилиндрической или конической поверхностей деталей (таблица 1, п. 1.3) реализуется схема резания с главным вращательным движением резания  $D_r$ , сообщаемым инструменту 1, поступательным (вдоль оси главного вращательного движения) движением подачи  $D_{s1}$ , также сообщаемым инструменту, и круговым движением подачи  $D_{s2}$ , сообщаемым заготовке 2 (таблица 1, п. 2.3). По существу, реализуется схема осевой обработки (зенкерования) или плунжерного фрезерования. Траектория резания – винтовая линия. При этом за счет двух вращательных и поступательного движений, применения многолезвийного режущего инструмента обеспечиваются касательное движение режущей кромки, увеличение его линейной скорости, и, как следствие, повышение производительности и качества обработки.

При обработке неполных сферических поверхностей деталей (таблица 1, пп. 1.4, 1.5) реализуются схемы плунжерного фрезерования, при которых одно из движений подачи  $D_{s2}$  направлено под углом или перпендикулярно к оси главного вращательного движения  $D_r$ . Результирующая скорость резания равна скорости касательного движения. За счет высокой скорости вращательного движения  $D_r$  (порядка 10–20 м/с) и выбора соответствующих значений углов наклона режущей кромки в плане обеспечивается как режим резания, так и режим выглаживания сферической поверхности с параметрами шероховатости сопоставимыми со шлифованными поверхностями.

Выглаживание поверхности обеспечивается уменьшением значений углов в плане и заднего угла, которые могут принимать нулевые значения, и увеличением значений угла наклона режущей кромки лезвия, а также за счет существенного увеличения скорости касательного движения. Таким вращающимся инструментом (фрезой-зенкером) можно последовательно обрабатывать сферические, цилиндрические или конические поверхности детали по схеме, представленной в таблице 1, п. 1.6. Траектории резания – винтовая линия, накрученная на окружность с изменяющимся радиусом и циклоида, накрученная на коническую поверхность.

При обработке плоских поверхностей деталей, например, уступов, полостей и т.п. (таблица 1, пп. 1.7, 1.8) реализуется схема резания с главным вращательным движением  $D_r$  и двумя поступательными движениями подачи  $D_{s1}$  и  $D_{s2}$ , обеспечивающими врезание фрезы по касательной к обрабатываемой поверхности или поверхности резания с линейной скоростью результирующего движения резания.

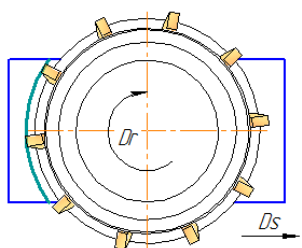
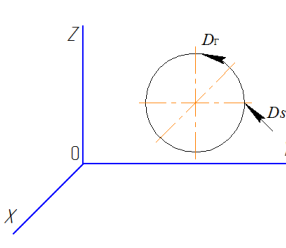
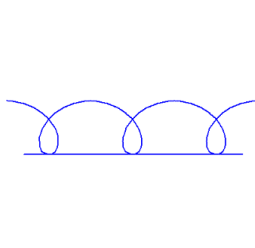
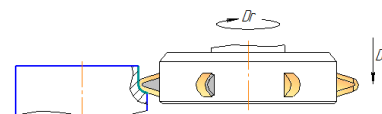
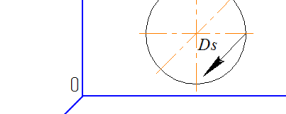
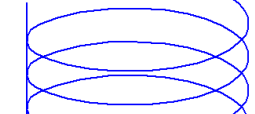
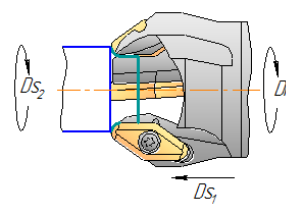
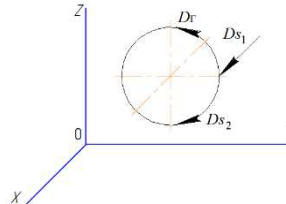
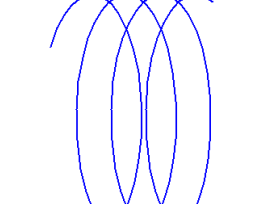
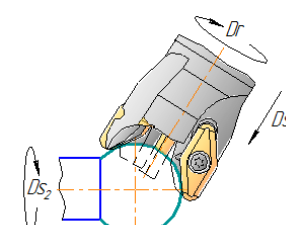
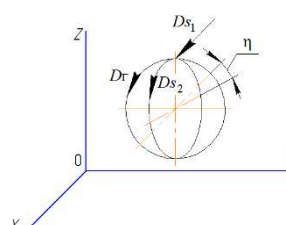
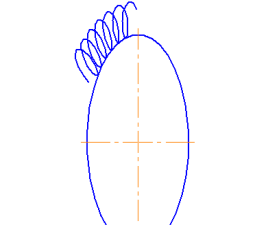
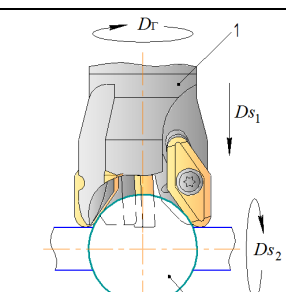
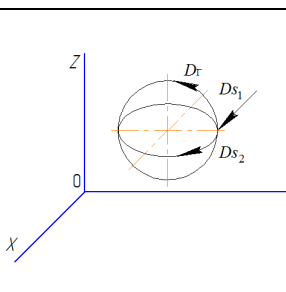
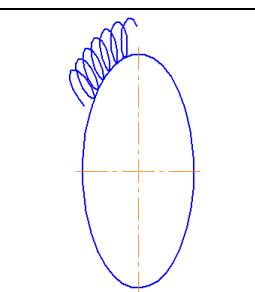
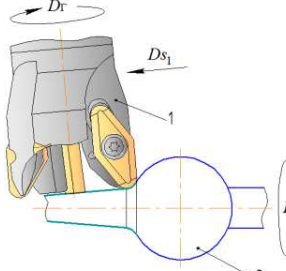
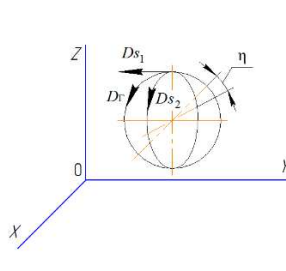
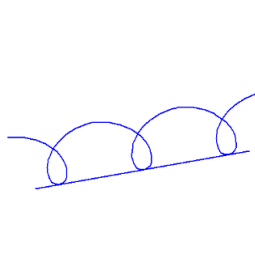
Реализация трехэлементных кинематических схем с движением резания по касательной к обрабатываемой поверхности осуществляется или двумя поступательными движениями подачи  $D_{s1}$  и  $D_{s2}$  (таблица 1, п. 1.10), или одним поступательным  $D_{s1}$  и одним вращательным  $D_{s2}$  (таблица 1, п. 1.9) движениями подачи. При этом формируются как плоская, так и цилиндрическая поверхности детали высокого качества.

Каждая из рассмотренных схем обработки может быть условно изображена трехэлементными кинематическими схемами резания, представленными в таблице 1, столбце 2. В таблице 1, столбце 2, в отличие от кинематических схем профессора Г.И. Грановского и в развитие обобщенной кинематической схемы с пятиэлементными движениями резания, уточнен тип режущего инструмента, который, в частности, является охватывающим, и соответственно, траектория вращательного движения подачи изображена внутри траектории главного вращательного движения в виде окружностей (таблица 1, п. 2.3), а в случае расположения оси главного вращательного движения под углом (таблица 1, п. 2.4) или перпендикулярно (таблица 1, п. 2.5) направлению вращательного движения подачи – в виде эллипса.

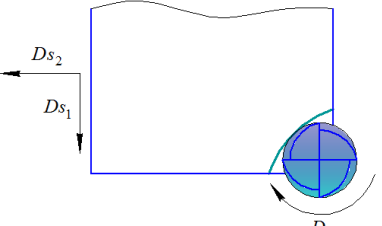
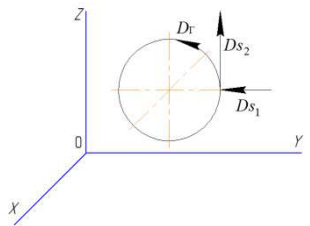
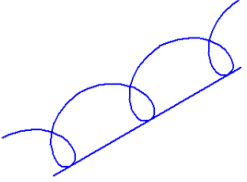
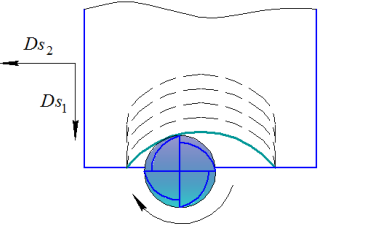
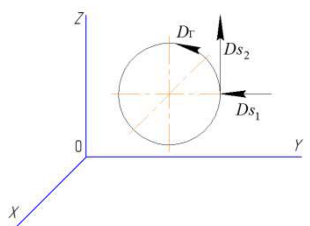
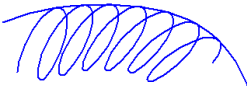
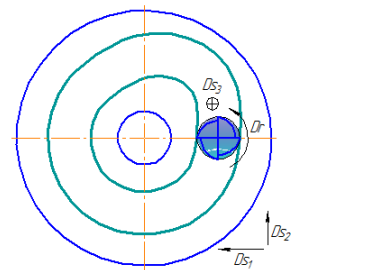
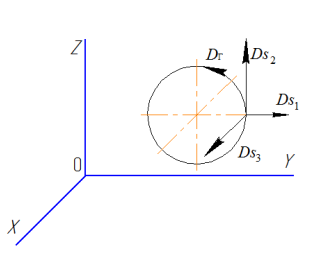
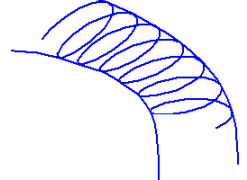
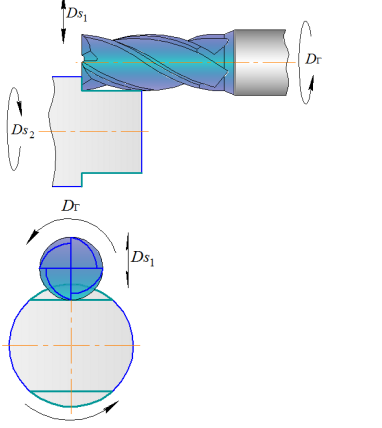
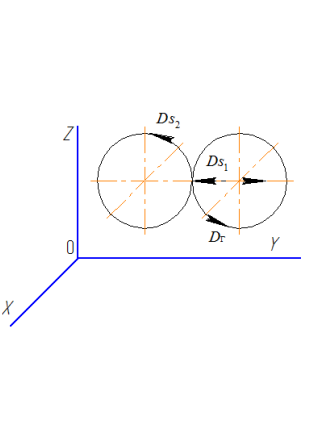
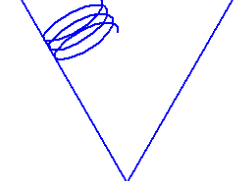
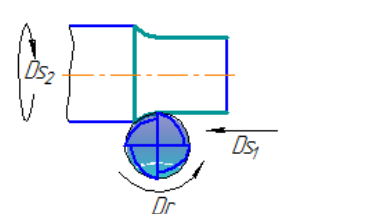
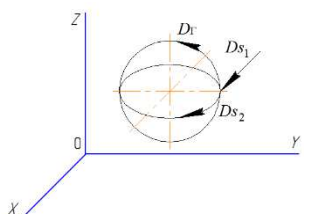
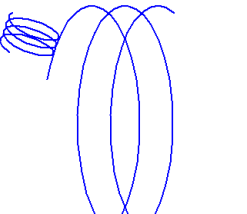
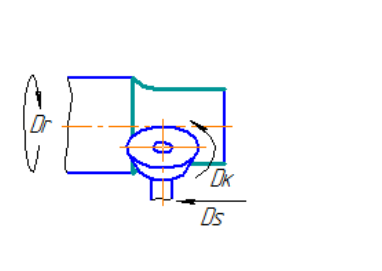
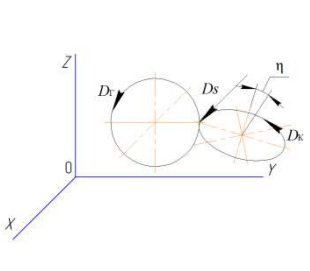
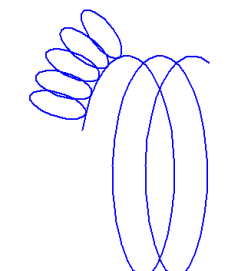
В результате сложного движения резания можно получить рельеф в виде «сетки» на цилиндрических, конических, сферических и плоских криволинейных поверхностях (рисунок 3, а, б). При этом решаются задачи формирования поверхностей под газотермические (рисунок 3, в) и ионно-плазменные (рисунок 3, г) покрытия. При формировании рельефа поверхностей лезвий режущего инструмента учитывается форма его естественного износа (рисунок 3, д). Определены режимы обработки и оборудование, на котором осуществляется подготовка поверхностей.

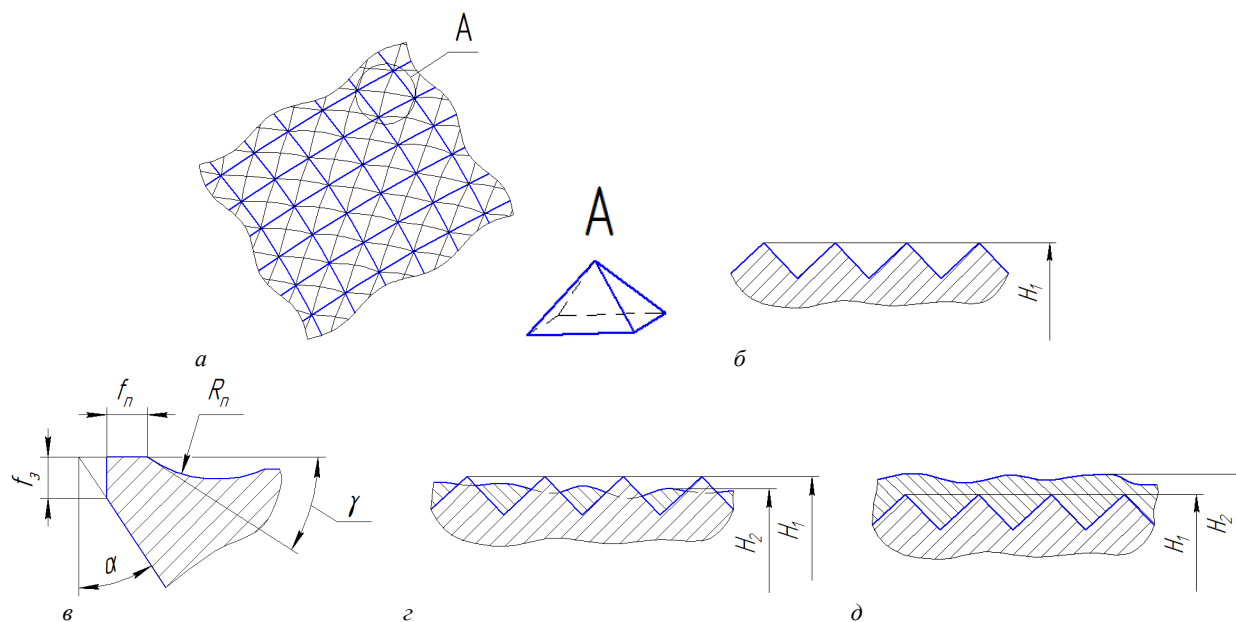
Величина сторон основания и высоты получаемого «пирамидального» рельефа поверхности (рисунок 3, а) зависят от соотношения частот вращения инструмента и заготовки и скорости их относительного движения подачи. В случае токарной обработки это соотношение частот вращения инструмента и заготовки находится в пределах  $0,5 \div 0,6$ , а при фрезеровании – достигает  $100 \div 500$ , что обеспечивает высоту неровностей в пределах  $H_1 = 0,63 \div 6,3$  мкм (рисунок 3, б) [8; 9]. Нанесение газотермического покрытия перекрывает рельеф высотой  $H_1$ , что обеспечивает его высокую адгезию с основой, а последующая обработка покрытия приводит к высоте неровностей  $H_2$  (рисунок 3, в). Нанесение вакуумного ионно-плазменного покрытия обеспечивает «сглаживание» вершин рельефа высотой  $H_1$  и заполнение впадин рельефа, что позволяет снизить высоту неровностей до значений  $H_2$ . При нанесении покрытия на поверхности лезвия инструмента по форме, представленной на рисунке 3, д, повышает их износостойкость.

Таблица 1. – Разновидности схем обработки поверхностей

№	Схема обработки	Кинематическая схема резания	Вид траектории резания	Наименование траектории резания
	1	2	3	4
1				Циклоида
2				Винтовая
3				Винтовая, накрутая на цилиндр с неизменным или изменяющимся диаметром
4				Винтовая, накрутая на окружность с изменяющимся радиусом
5				Винтовая линия, накрутая на окружность с изменяющимся радиусом
6				Циклоида, накрутая на коническую поверхность

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5
7				<p>Циклоида по заданному направлению</p>
8				<p>Циклоида по криволинейному контуру</p>
9				<p>Циклоида, касающаяся двух криволинейных поверхностей</p>
10				<p>Циклоида, навернутая на изменяющуюся по длине хорду окружности</p>
11				<p>Циклоида, навернутая на винтовую линию</p>
12				<p>Окружность, навернутая на винтовую линию</p>



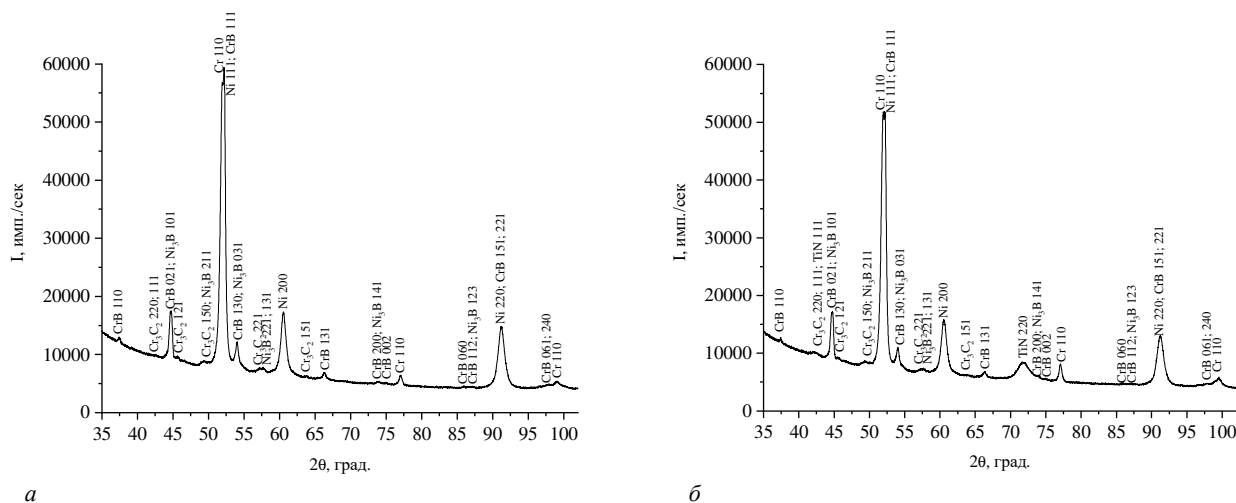
**а** – «сетчатая»; **б** – «треугольная нарезка»; **в** – с «толстым» покрытием; **г** – с «тонким» покрытием; **д** – профиль лезвия режущего инструмента;  $H_1$  – высота исходных неровностей;  $H_2$  – высота неровностей покрытия

**Рисунок 3.** – Вид поверхности с микронеровностями

*Исследование структуры и свойств покрытий.* В результате газотермического напыления покрытий получены образцы со следующей твердостью: I – 426 HV<sub>0,1</sub>; II – 444 HV<sub>0,1</sub>; III – 378 HV<sub>0,1</sub>; IV – 223 HV<sub>0,1</sub>. На образцы I и IV ионно-плазменным методом в вакууме наносилось покрытие TiN. Результаты исследований фазового состава и микротвердости образцов представлены на рисунке 4 и в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, комбинированное покрытие, содержит фазу TiN с ГЦК решеткой (параметр  $a = 4,3200 \text{ \AA}$ ) и включения титана, что в 3 раза увеличивает микротвердость образцов по сравнению с монопкрытием ПГ-Ю-НХ16СР3.

Характерные дифрактограммы от нанесенных на различные подложки покрытий TiN представлены на рисунке 5. На дифрактограммах, полученных от покрытий, наряду с дифракционными линиями от подложек:  $\alpha$ -Fe, Fe<sub>3</sub>C (9ХС, рисунок 5, а); WC, TiC, Co (Т5К10, рисунок 5, б); WC, Co (ВК10, рисунок 5, в) регистрируются линии от нитрида титана TiN с ГЦК решеткой типа NaCl и титана Ti с ГПУ решеткой. Параметр кристаллической решетки фазы TiN составляет  $a = 0,4240 \text{ нм}$ . Присутствие на дифрактограммах линий от фазы Ti связано с наличием капельной фракции в распыляемом при формировании покрытия титане. Твердость покрытий TiN составляет  $H \approx 29 \text{ ГПа}$ .



**Рисунок 4.** – Дифрактограммы образцов с покрытием ПГ-Ю-НХ16СР3 (а) и с комбинированным покрытием ПГ-Ю-НХ16СР3+TiN (б)

Таблица 2. – Фазовый состав и микротвердость образцов

Образец	HV 0,025	Фаза	PDF №	Кристаллографическая группа	Параметры кристаллической решетки
ПГ-Ю-НХ16СР3	500	Ni	4-850	cubic, Fm-3m	$a = 3,5238 \text{ \AA}$
		Cr	6-694	cubic, Im-3m	$a = 2,8839 \text{ \AA}$
		CrB	32-277	orthorhombic, Cmcm	$a = 2,9663 \text{ \AA}; b = 7,8666 \text{ \AA}; c = 2,9322 \text{ \AA}$
		Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	35-804	orthorhombic, Pnam	$a = 5,5273 \text{ \AA}; b = 11,4883 \text{ \AA}; c = 2,8286 \text{ \AA}$
		Ni <sub>3</sub> B	48-1223	orthorhombic, Pnma	$a = 5,2112 \text{ \AA}; b = 6,6200 \text{ \AA}; c = 4,3955 \text{ \AA}$
ПГ-Ю-НХ16СР3 + TiN	1600	Ni	4-850	cubic, Fm-3m	$a = 3,5238 \text{ \AA}$
		Cr	6-694	cubic, Im-3m	$a = 2,8839 \text{ \AA}$
		CrB	32-277	orthorhombic, Cmcm	$a = 2,9663 \text{ \AA}; b = 7,8666 \text{ \AA}; c = 2,9322 \text{ \AA}$
		Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	35-804	orthorhombic, Pnam	$a = 5,5273 \text{ \AA}; b = 11,4883 \text{ \AA}; c = 2,8286 \text{ \AA}$
		Ni <sub>3</sub> B	48-1223	orthorhombic, Pnma	$a = 5,2112 \text{ \AA}; b = 6,6200 \text{ \AA}; c = 4,3955 \text{ \AA}$
		TiN	87-631	cubic, Fm-3m	$a = 4,3200 \text{ \AA}$

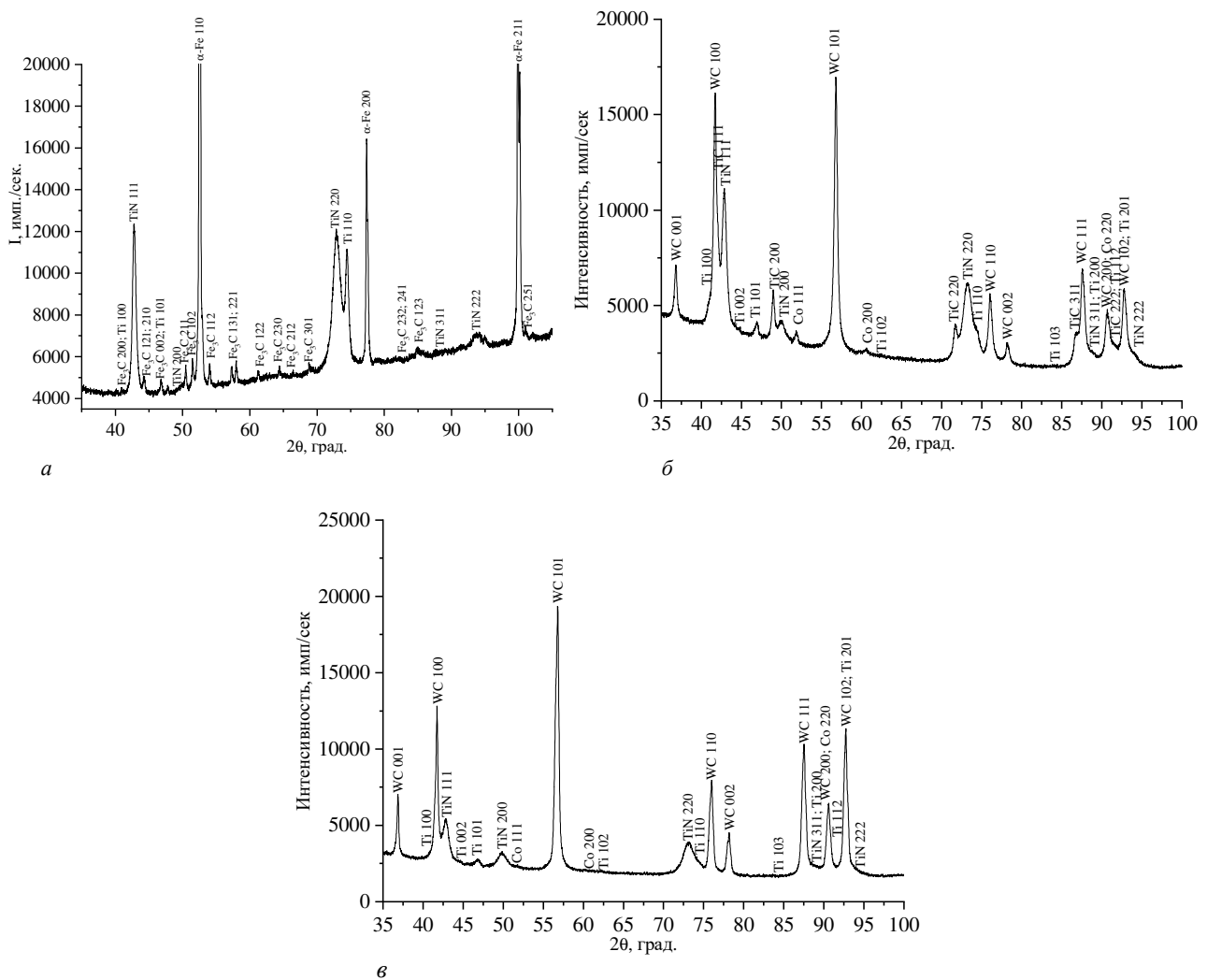
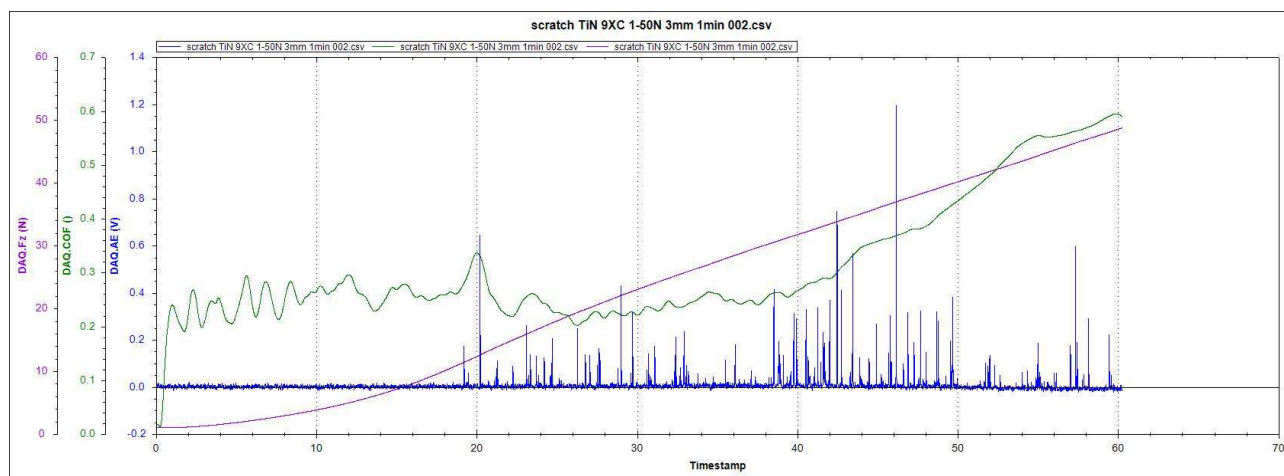


Рисунок 5. – Характерные фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoKa) поверхностного слоя вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN, осажденного на сталь 9ХС (а), твердые сплавы Т5К10 (б) и ВК10 (в)

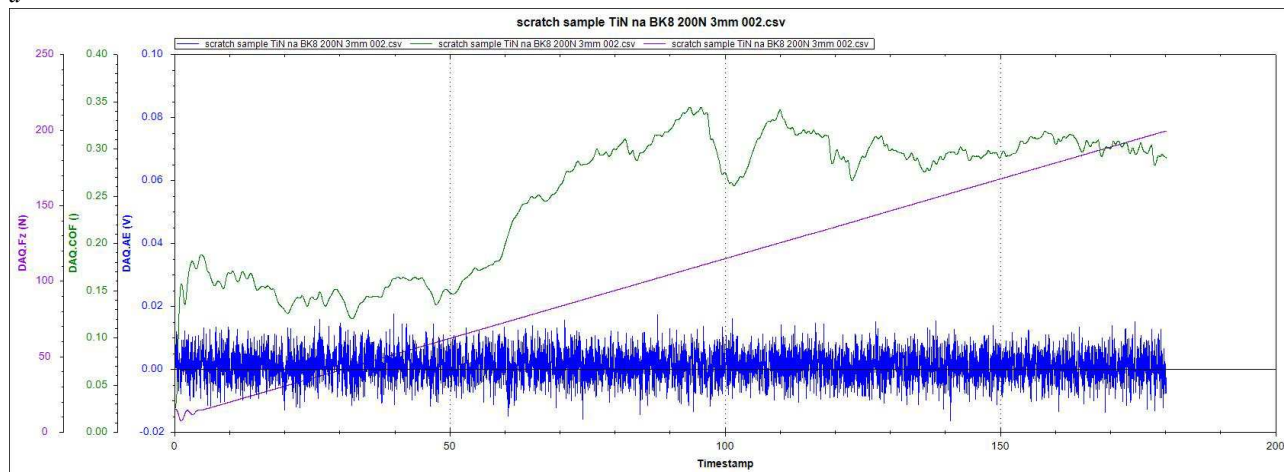
На рисунке 6 представлены результаты проведения скретч-тестирования для покрытий TiN в виде графиков зависимости приложенной нагрузки на индентор, коэффициента трения и акустической эмиссии от про-

должительности испытаний. Значения нагрузки отслаивания  $L_c3$  покрытий TiN, нанесенных на различные подложки, представлены в таблице 3.

Согласно данным таблицы 3,  $L_c3$  для TiN-покрытий на твердых сплавах в 2,3–3,3 раз выше, чем для покрытий на подложке из стали 9ХС. Такое различие может быть обусловлено отсутствием при испытаниях пластической деформации подложки из твердых сплавов (Т5К10 и ВК10) по сравнению со сталью 9ХС, что снижает вероятность разрушения покрытия. В случае стали 9ХС более низкие значения  $L_c3$  могут объясняться ее сравнительно низкой прочностью, приводящей к пластической деформации подложки в процессе испытаний [10]. Согласно работе [11], отслаивание покрытия от подложки обусловлено накоплением дислокаций и последующим образованием микротрещин. Кроме того, как показано в [12], возникновение микротрещин может быть связано с несовместностью упругой деформации высокопрочного поверхностного слоя и пластической деформации более мягкой подложки при индентировании. Этот эффект усиливается при значительной разнице в твердости между покрытием и подложкой. При этом повышение твердости подложки способствует снижению скорости образования микротрещин, что улучшает адгезионную прочность системы [12].



а



б

Рисунок 6. – Зависимость акустической эмиссии (DAQ.AE), коэффициента трения (DAQ.COF), нагрузки на индентор (DAQ.Fz) от времени испытаний (Timestamp) для вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN, осадженного на сталь 9ХС (а) и твердый сплав ВК10 (б)

Таблица 3. – Значения нагрузки полного отслаивания  $L_c3$  покрытий TiN, нанесенных на различные подложки

Подложка	$L_c3$ , Н
9ХС (отжиг)	30
Т5К10	100
ВК10	70

Покрyтия TiN, нанесенные на твердые сплавы T5K10 (TiC-Co) и BK10 (WC-Co), имеют разную нагрузку отслаивания  $L_{c3T5K10} \approx 100$  Н и  $L_{c3BK10} \approx 70$  Н, что объясняется различиями в их химическом составе и структуре. В частности, основным фактором, влияющим на лучшее сцепление TiN с T5K10, является химическое сродство TiN и карбида титана (TiC). Указанные в таблице 2 фазы имеют идентичные кристаллические решетки типа NaCl с близкими значениями параметра решетки ( $a_{TiN} = 0,4242$  нм,  $a_{TiC} = 0,4327$ ). Благодаря этому TiN может формировать когерентные границы с TiC, тогда как в случае контакта покрытия TiN с WC из-за разной кристаллической структуры сопрягающихся решеток возникает несоответствие, приводящее к появлению дефектов кристаллической решетки на межфазной границе и снижению нагрузки отслаивания.

#### Заклyчение.

1. Разработаны кинематические схемы формирования микрорельефа поверхности основы под покрытие, отличающиеся вращательными движениями заготовки и инструментов и относительным движением подачи, а также установлены диапазоны соотношений частот вращения инструмента и заготовки в пределах  $0,5 \div 0,6$  при токарной обработке и  $100 \div 500$  при фрезеровании в процессах резания и выглаживания, что обеспечивает получение «сетчатой» поверхности с высотой неровностей  $Ra = 0,63 \div 6,3$  мкм, повышающей адгезию покрытия с основой. Для лезвия инструмента рекомендуется форма его естественного износа, что при нанесении покрытия обеспечивает повышение износостойкости режущего инструмента.

2. Исследованы фазовый состав и твердость газотермического покрытия из порошка ПГ-Ю-НХ16СР3. Установлено повышение твердости покрытия до 2 раз по сравнению с основой.

3. Показано, что дополнительное ионно-плазменное осаждение покрытия TiN обеспечивает повышение микротвердости поверхности в 3 раза по сравнению с монопокрытием ПГ-Ю-НХ16СР3.

4. Установлено, что вакуумные покрытия содержат фазу TiN с ГЦК решеткой (параметр  $a = 0,4240$  нм) и включения титана. Твердость покрытия TiN составила  $\sim 29$  ГПа. Показано, что максимальное значение  $L_{c3}$ , составляющее 100 Н, достигается для покрытия TiN, сформированного на подложке из твердого сплава T5K10. Для сплава BK10 нагрузка полного отслаивания покрытия TiN составила 70 Н, для стали 9ХС – 30 Н. Высокие значения  $L_{c3}$  для покрытий TiN, осажденных на твердых сплавах, связаны с высокой прочностью подложки и структурной совместимостью TiN с карбидом титана TiC, содержащимся в сплаве T5K10.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Попок Н.Н., Анисимов В.С. Технологические основы ионно-плазменной обработки материалов и изделий: учеб.-метод. пособие. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2025. – 104 с.
2. Исследование зависимости прочности сцепления покрытий от различных способов подготовки поверхностей деталей под покрытие напылением / В.А. Соколова, В.А. Марков, Г.К. Парфенопуло и др. // Тр. МАиП ПСиМ. – 2018. – № 1. – С. 104–105.
3. Инженерия поверхностей деталей нанесением регулярного микрорельефа и износостойкого покрытия / Н.Н. Попок, Я.С. Сачивко, Р.С. Хмельницкий и др. // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: в 3 кн. / МНТК, ФТИ НАН Беларуси. – Минск, 2018. – Кн. 2: Технология и оборудование механической и физико-технической обработки. – С. 212–217.
4. Спиридонов Н.В., Кобяков О.С., Куприянов И.Л. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / под ред. В.Н. Чачина. – Минск: Выш. шк., 1988. – 155 с.
5. Восстановление деталей машин: Справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов и др.; под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
6. Емельянов В.А., Мрочек Ж.А., Иванов В.А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий. – Минск: Интеграл, 1998. – 284 с.
7. Белоцерковский М.А., Григорчик А.Н., Попок Н.Н. Структурно-фазовое состояние и износостойкость гиперзвуковых газотермических покрытий из проволочных высокохромистых сталей // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. В 3 кн. / редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) и др. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2014. – Кн. 2: Технология и оборудование механической и физико-технической обработки. – С. 117–122.
8. Попок Н.Н. Шероховатость поверхности детали при обработке ротационным инструментом с прерывистой режущей кромкой // Машиностроение. – 1990. – Вып. 15. – С. 18–22.
9. Технологический регламент комбинированного упрочнения деталей машин и режущих инструментов / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов и др. // Высокие технологии в машиностроении: материалы XIX Всерос. науч.-техн. конф. / отв. ред. Р.Г. Гришин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2022. – С. 63–68.
10. Stallard J., Poulat S., Teer D.G. The study of the adhesion of a TiN coating on steel and titanium alloy substrates using a multi-mode scratch tester // Tribology International. – 2006. – Vol. 39. – P. 159–266.
11. Кукареко В.А., Кушнеров А.В., Попок Н.Н. Влияние отжига на структурно-фазовое состояние и физико-механические свойства вакуумно-дуговых покрытий TiN, нанесенных на сталь 9ХС // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2024. – Т. 60, № 4. – С. 344–352. DOI: 10.29235/1561-2430-2024-60-4-344-352
12. Износостойкость модифицированных азотом высоколегированных сталей в условиях трения без смазочного материала / В.А. Кукареко, В.В. Можаровский, А.В. Кушнеров и др. // Трение и износ. – 2024. – Т. 45, № 6. – С. 473–485. DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-6-473-485

Поступила 13.01.2026

**FORMING THE SURFACES OF PARTS AND CUTTING TOOLS  
WITH REGULAR MICRORELIEF AND A WEAR-RESISTANT COATING**

**N. POPOK<sup>1</sup>, V. KUKAREKO<sup>2</sup>, R. KHMELNITSKY<sup>1</sup>,  
A. KUSHNEROV<sup>2</sup>, V. ANISIMOV<sup>1</sup>, S. DMITRIEV<sup>3</sup>**

*(<sup>1</sup>Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk;*

*<sup>2</sup>The Joint Institute of Mechanical Engineering  
of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk;*

*<sup>3</sup>Pskov State University)*

*The purpose of the work is to increase the reliability of machine parts and cutting tools that operate under extreme conditions of frictional interaction with high pressure and temperature. To achieve this goal, the tasks of developing kinematic schemes for shaping the micro-nano relief of the base surface and the technological principles of applying combined gas-thermal and vacuum ion-plasma coatings are addressed. The research objects include plunger pair parts and cutting tools. Experimental research methods, modern instruments, and equipment are used to determine the microhardness and adhesion of the coating. The results of hardness and microhardness measurements, surface layer diffraction patterns, and acoustic emission and friction coefficient dependencies for gas-thermal, combined, and ion-plasma coatings are presented.*

**Keywords:** *shaping, microrelief, surface, gas-thermal, ion-plasma, and combined coatings, microhardness, adhesion.*

## ТРАНСПОРТ

УДК 656

DOI 10.52928/2070-1616-2026-53-1-24-27

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗМЕЩЕНИЮ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ  
ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

ДУ СИЧЖОУ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Выполнен анализ действующих «Методических рекомендаций по определению мест размещения зарядных станций...» в сопоставлении с научными результатами и передовыми подходами. На основе анализа разработаны конкретные рекомендации по размещению зарядных станций для электромобилей и предложения по совершенствованию документа для повышения его практической эффективности.*

**Ключевые слова:** электромобили, инфраструктура, зарядные станции, устойчивое развитие.

**Введение.** Развитие электротранспорта перестало быть частью имиджа и стало вопросом экономической необходимости [1; 2]. Развитие электротранспорта обусловлено экологическими факторами (нулевые выбросы, снижение шума), экономической целесообразностью (энергобезопасность, выравнивание энергобаланса за счет ночной зарядки) и неизбежностью технологического изменения мирового автопрома [3–7].

**Основная часть.** Для создания нормативно-технической основы планирования зарядной инфраструктуры в Беларуси разработаны «Методические рекомендации по определению мест размещения зарядных станций, разработке схем размещения зарядных станций»<sup>1</sup> (далее – Рекомендации). Они определяют классификацию станций; принципы их локации в городе и на трассах; закрепляют методику оценки определения мест размещения зарядных станций; оказывают методологическую помощь местным исполнительным и распорядительным органам при разработке схем размещения зарядных станций, а также порядок их документального оформления, что способствует упрощению подготовки документов для строительства зарядных станций для электромобилей.

В Рекомендациях (п. 2.1) отмечается глобальная тенденция запрета продаж авто с ДВС к 2025–2040 гг., что действительно стимулирует рост спроса на электромобили, делая их использование экономически выгодным в долгосрочной перспективе. Однако процесс перехода неоднороден. Главные сдерживающие факторы покупки электромобиля – Range Anxiety и отсутствие предсказуемой зарядки. Необходимость рекомендаций заключается в определении соотношения причины и следствия: унификация (без единого стандарта (как в данных Рекомендациях) сеть превратится в набор несовместимых станций, что отпугнет пользователей) и упрощение процедур (документ снимает бюрократические преграды (отмена госэкспертизы, помощь исполкомам), что ускоряет темпы строительства сети, необходимые для опережающего роста парка электромобилей).

Учитывая высокую мощность (>150 кВт) и капиталоемкость быстрых зарядных станций, Рекомендации должны минимизировать инвестиционные риски. Интеграция поведенческой модели «Charge-or-Skip» позволит переориентировать планирование с наличия технических мощностей на готовность пользователя совершить остановку, обеспечив экономическую эффективность инфраструктуры. Это превращает дотационную инфраструктуру в окупаемый бизнес.

Поскольку городское пространство ограничено [8; 9], рекомендации регулируют конфликт интересов между пешеходами, автомобилями с ДВС и электромобилями. Рекомендации гарантируют, что зарядка не заблокирует тротуары и обеспечит доступ к инфраструктуре для жителей «спальных районов», у которых нет частных домов, делая, таким образом, электромобильность доступной не только для элиты общества.

Основной метод планирования в Рекомендациях – статический: размещение станций там, где уже есть люди и электричество. Такой подход создает системные риски. Сформулируем недостатки подобного планирования:

- унификация (водителей электромобилей нельзя рассматривать как однородную группу);
- техноцентричность: основной упор сделан на технические параметры (мощность, типы коннекторов) и физическое расположение (расстояние до объектов);

<sup>1</sup> Методические рекомендации по определению мест размещения зарядных станций, разработке схем размещения зарядных станций: утв. постановлением М-ва архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 24 марта 2022 г. № 38. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2022. – 5 с.

- статичность: планирование опирается на «места притяжения» и текущий трафик без учета поведенческой реакции водителей (выбор «пропустить зарядку» или «ждать в очереди»);
- отсутствие сегментации: рекомендации «быстрые на трассах, медленные во дворах» верны, но являются слишком общими.

Для совершенствования размещения зарядных станций в городах предлагаются следующие положения и допущения.

На основании разработанной авторской модели и равновесного распределения транспортных потоков возможно включить в рекомендации предложения с учетом интеграции научных подходов и поведенческих моделей. Это исключит технократический подход (классификация станций по мощности, базовые градостроительные отступы и нормативная ширина проездов) и внедрит человекоцентричную парадигму.

Фундаментальное изменение заключается в переходе от статической модели планирования («где есть свободное место и мощность») к динамической поведенческой модели. В основу рекомендаций заложен принцип, что эффективность размещения определяется не только плотностью населения, но и минимизацией «дисполезности» (disutility) процесса зарядки для конкретных типов пользователей.

Добавить в пункт 1.3 (Общие принципы) новый абзац: «При планировании сети электрочарядных станций (ЭЗС) рекомендуется применять дифференцированный подход к пользователям, учитывая не только технические параметры электромобилей, но и поведенческие сценарии водителей. Ключевым критерием эффективности размещения ЭЗС является минимизация “стоимости прерывания пути”, включающая время отклонения от маршрута, время ожидания в очереди и время самой сессии зарядки».

Дополнить раздел 2 новым пунктом 2.4:

«2.4. Учет сегментации потребителей. При выборе локации рекомендуется ориентироваться на четыре базовых поведенческих профиля водителей:

1. Пользователи, зависимые от публичной сети (класс 4): Приоритет – плотность покрытия в жилых районах и предсказуемость доступа.
2. Имеющие домашнюю зарядку (класс 3): Основные клиенты скоростных трассовых комплексов. Приоритет – сверхвысокая мощность (>175 кВт).
3. Искатели эффективности (класс 2): Приоритет – ЭЗС непосредственно на маршруте следования с гарантированным отсутствием очередей.
4. Избегающие зарядки (класс 1): Требуют размещения ЭЗС исключительно в местах с возможностью продуктивного использования времени (торговые центры, качественный сервис), компенсирующего неудобства остановки».

В таблице 2 (стр. 3 исходного документа) в разделе «Рекомендуемые параметры места размещения» предлагается усилить требования, исходя из того, что для транзитного транспорта (особенно для «Искателей эффективности» и «Хейтеров») критично время. *Текущая редакция:* «наличие нескольких объектов придорожного сервиса...», *предлагаемая редакция:* «Интеграция ЭЗС в объекты сервиса, позволяющие удовлетворить сопутствующие потребности (питание, отдых, санитарные нужды) без дополнительного перемещения транспортного средства. Минимизация времени заезда (время съезда с основной трассы до коннектора не должно превышать 3–5 минут). Обеспечение избыточного количества коннекторов для исключения очередей, так как время ожидания воспринимается водителями на 60% негативнее, чем время в пути».

В таблице 4, в строке «Пользователи/цель», добавить: «Для «Зависимых от публичной сети» (жители многоквартирных домов без паркингов) приоритетом является надежность и пешеходная доступность от места жительства, даже в ущерб мощности станции».

Также необходимо обновить материал для различных зон таблиц 2 и 4 на основе эмпирических данных исходного документа:

- автомагистрали: приоритет отдается локациям, где зарядка встраивается в естественные остановки. Мощность более 150 кВт становится стандартом не сама по себе, а как способ увеличить пропускную способность узла (снизить риск очередей для «искателей эффективности»);

- городская среда: вводится разделение на «транзитные хабы» (для быстрой подзарядки в течение дня) и «ночные порты» (медленные станции Mode 3 во дворах). Для транзитных хабов ключевым критерием становится визуализация доступности в реальном времени, так как неопределенность подавляет спрос у класса «искатели эффективности».

В пункте 4.2 (Быстрые зарядные станции) необходимо сместить акцент с «мест притяжения» на «места с высокой оборачиваемостью».

Добавить рекомендацию: «Для привлечения сегмента «искателей эффективности» (самый массовый сегмент, ~ 39% водителей) приоритет следует отдавать локациям, не требующим значительного отклонения от основных транспортных магистралей города (On-route charging). Важна визуализация доступности портов в режиме реального времени, так как риск очереди является главным фактором отказа от зарядки для данной группы».

В пункт 7.1 (Обоснование) добавить: «Обоснование размещения ЭЗС должно включать прогноз загрузки, основанный не только на плотности населения, но и на моделировании транспортных потоков». Рекомендуется использование математических моделей равновесного распределения потоков, учитывающих:

- гетерогенность спроса (различную чувствительность групп водителей к цене времени);
- вероятностный характер выбора (учет вероятности отказа от зарядки «Charge-or-Skip» при наличии очереди);
- влияние времени ожидания как функции от загруженности станции (нелинейный рост издержек при высоком спросе).

В пункт 8.7 (Общая пояснительная записка) добавить требование: «При разработке Схемы для крупных городских агломераций рекомендуется проводить сценарное моделирование (что если?), оценивая влияние открытия новых ЭЗС на перераспределение потоков «активных» (нуждающихся в зарядке) водителей, чтобы избежать подавления трафика соседних станций и возникновения локальных заторов на популярных точках».

Таким образом, вместо усредненного образа водителя электромобиля документ вводит обязательный учет гетерогенности (разнородности) спроса. При разработке Схем размещения (Глава 2 Рекомендаций) вводится требование ориентироваться на четыре поведенческих класса («персоны»), выявленных на основе анализа латентных классов.

Предлагается методология оценки локаций: «стоимость прерывания». Следует внести понятие «стоимости прерывания пути». Рекомендуется учитывать нелинейную зависимость привлекательности станции от трех параметров:

- время отклонения от маршрута: каждая минута, потраченная на съезд с трассы, воспринимается водителем негативно. Можно ввести коэффициенты штрафов для локаций, требующих сложного маневрирования;
- вероятность очереди: время ожидания воспринимается водителями на 60% болезненнее, чем время самой зарядки. Предлагается рекомендация по расчету коэффициента загрузки при проектировании узлов;
- полезность простоя: следует регламентировать обязательную привязку быстрых ЭЗС (Mode 4) к объектам, удовлетворяющим «сопутствующие потребности» (питание, шоппинг, отдых), что снижает воспринимаемую стоимость времени зарядки.

Следует дополнить Раздел 8 («Порядок разработки Схемы») и внедрить многоступенчатую процедуру оценки нагрузки на сеть, основанную на равновесном распределении транспортных потоков:

- этап А (Поведенческая фильтрация): предлагается исключить из расчетов «пассивную» часть потока (водителей с высоким уровнем заряда  $>0,6$ ), которые гарантированно пропустят станцию, чтобы избежать завышения прогнозируемого спроса;
- этап Б (Алгоритм Франка–Вольфа): для крупных городских агломераций рекомендуется использование транспортных моделей, где функция затрат на дугах сети включает не только время в пути, но и специфические издержки на зарядку (поиск, ожидание, обслуживание) для каждого класса водителей.

Это позволит избежать ошибок планирования, когда мощные станции ставятся в «удобных» для энергетиков местах, но остаются пустыми, поскольку водители психологически не готовы тратить 15 минут на съезд к ним.

**Заключение.** Предлагается трансформировать рекомендации из набора градостроительных ограничений в руководство по созданию продукта, востребованного пользователями. Главный посыл обновленных рекомендаций: «ЭЗС должна конкурировать не с другой ЭЗС, а с желанием водителя проехать мимо». Это позволит инвесторам минимизировать риск установки невостребованных станций за счет учета фактора «дисполезности отклонения от маршрута»; городским властям – предотвратить локальные заторы и очереди на ЭЗС за счет сбалансированного распределения спроса между «искателями эффективности» (транзитные хабы) и «зависимыми от публичной сети» (жилые зоны). Сделать заключение кратким резюме: «Реализация предложений обеспечит переход от административного размещения к экономическому моделированию, повысит ROI проектов и социальную эффективность сети. Обновленные Рекомендации превращают процесс планирования зарядной сети из административно-технической процедуры в стратегическое инвестиционное проектирование. Предложения предлагают научно обоснованный мост между абстрактным «развитием электротранспорта» и конкретными, математически выверенными решениями на карте города.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Устойчивые транспортные системы городов: учеб. / Д.В. Капский, А.О. Лобашов, И.Н. Пугачев и др. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. – 128 с.
2. Ду С., Капский Д.В. Исследование расположения городских станций зарядки электромобилей на основе теории очередей // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 25-летию Ин-та транспорта / Тюмень (11–12 апр. 2024 г.) – Тюмень: ТИУ, 2024. – С. 203–205.
3. Устойчивая городская мобильность: теория и практика развития / А.О. Лобашов, Е.Н. Кот, Д.В. Капский и др. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 236 с.
4. Планирование устойчивой городской мобильности / И.Н. Пугачев, А.О. Лобашов, С.С. Семченков и др. – Хабаровск: Дальневост. гос. ун-т путей сообщения, 2023. – 147 с.

5. Пугачев И.Н., Капский Д.В. Разработка планов устойчивой городской мобильности и цифровая трансформация в области организации дорожного движения, путь к дальнейшему развитию городов и страны в целом // Мир транспорта и технологических машин. – 2023. – № 3-2(82). – С. 92–99. DOI 10.33979/2073-7432-2023-3-2(82)-92-99
6. Ду С., Лобашов А.О., Капский Д.В. Определение рациональных параметров сети зарядных станций электромобилей // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2024. – № 2(50). – С. 78–85. DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-78-85
7. Ду С., Капский Д.В. Исследование по выбору места и планировке станций зарядки электромобилей // Современные вызовы транспортной отрасли: новые возможности: материалы межвуз. науч.-практ. конф. транспорт. Вузов / Санкт-Петербург (20–21 февр. 2025 г.). – М.: Дашков и К, 2025. – С. 86–88.
8. Капский Д.В., Филиппова Н.А. Формирование устойчивых транспортных систем в условиях изменения климата // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023): материалы мультиконф. В 4 т. / Волгоград (11–15 сент. 2023 г.). – Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т, 2023. – Т. 4. – С. 276–281.
9. Капский Д.В., Богданович С.В. План устойчивой городской логистики симбиотических агломераций и развитие транспортных систем // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XII МНПК, посвящ. 160-летию Белорус. ж. д. В 2 ч. / Гомель (24–25 нояб. 2022 г.). – Гомель: БелГУТ, 2022. – С. 111–113.

Поступила 22.12.2025

## RECOMMENDATIONS FOR THE LOCATION OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS

*DU XIZHOU*

*(Belarusian National Technical University, Minsk)*

*This paper analyzes the current “Methodological Recommendations for Determining the Locations of Charging Stations...” and compares them with scientific findings and best practices. Based on this analysis, specific recommendations for the location of electric vehicle charging stations and proposals for improving the document to enhance its practical effectiveness have been developed.*

**Keywords:** *electric vehicles, infrastructure, charging stations, sustainable development.*

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА МОТОРНОГО ТОПЛИВА

канд. техн. наук, доц. Р.А. АНДРЕЕВА, канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН,  
канд. техн. наук, доц. Т.В. ВИГЕРИНА  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Рассмотрены альтернативные виды моторных топлив и проведен их сравнительный анализ по энергетической эффективности, оцениваемой энергетическим балансом. Анализ существующих технологий производства топлива показал, что в любом государстве их производят с учетом национальных ресурсов и интересов с учетом наличия в значительных объемах воспроизводимого сырья. В настоящее время в большинстве случаев используются нефтяное и газовое топлива, но возрастающие требования к экологичности мотивируются через ужесточение норм выбросов в окружающую среду и приоритетное финансирование «зеленых» проектов как со стороны государства, так и частных инвесторов. Поэтому в работе рассмотрены, обобщены и структурированы способы производства моторных топлив – биоэтанола, биодизеля, водорода и аммиака, приведено используемое сырье, способы переработки и отходы переработки для каждого из рассматриваемых вариантов топлива.

**Ключевые слова:** моторное топливо, двигатель внутреннего сгорания, альтернативные топлива, биоэтанол, биодизель, аммиак, «зеленые» проекты.

**Введение.** Автомобили в настоящее время стали повседневной потребностью общества. Долгие годы в качестве моторного топлива использовали нефтяной бензин (керосин). Сжигание углеводородов в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) сопровождается выбросами в атмосферу ряда газообразных соединений, негативно влияющих на экологию и приводящих к ухудшению климатических показателей. В силу этого требования к качеству топлива постоянно усиливаются, вводятся жесткие нормативы по содержанию в топливе ряда элементов (серы, азота и др.). Производители топлива, в свою очередь, постоянно совершенствуют технологические процессы его производства. Однако сжигание углеводородного сырья всегда сопровождается выбросом в атмосферу большого количества оксидов углерода, что связано с глобальной нарастающей проблемой – планетарным изменением климата, потеплением, таянием льдов, подъемом уровня Мирового океана и исчезновением в будущем не только отдельных городов, но и государств.

Поскольку парк автомобилей неизбежно увеличивается, то назрела необходимость поиска видов топлив, альтернативных бензину, и изменения, при необходимости, конструкции двигателей.

**Основная часть.** Характеристика как применяемого топлива, так и востребованного в будущем (по прогнозам специалистов) приведена в таблице 1. Энергетическая эффективность оценивается энергетическим балансом, который определяется соотношением количества энергии, высвобождаемой при его сжигании и затрачиваемой на его производство.

Таблица 1. – Автомобильные топлива и их сравнительная характеристика

Показатели	Топливо				
	$NH_3$	$H_2$	Бензин нефтяной	Спирт технический (биоэтанол)	Метиловый эфир рапсового масла (биодизель)
Теплота сгорания, кДж/кг	19000–22500	120000	44400	30000	37400
Энергоемкость производства топлива, кДж/кг	29000–4000*	57600–144000	4000–7600	27000	47750
Энергетический баланс (э.б.)	0,56–0,65	0,83–2,1	5,84–11,1	1,1–36	0,78–2,5

\*Энергоемкость производства аммиака приведено только по затратам тепловой энергии (без учета затрат электроэнергии).

В Беларуси сегодня помимо традиционных автомобилей, работающих на нефтяных топливах, наметилась тенденция к популярности электромобилей.

В странах Латинской Америки, США, ЕС и др. уже десятки лет используют топлива, произведенные из растительного и животного сырья этих стран (либо его отходов). В качестве такого сырья применяют зерновые культуры (кукуруза, соя), сахарный тростник, а также жирно- и маслосодержащие продукты. В богатых древесной страной популярны смеси, полученные из отходов ее переработки (щепа, кора, ветки, опилки и др.). Это обусловлено тем, что древесные субстраты содержат ферментативно или гидролизно осаживаемые компоненты – целлюлозу и крахмал, из которых можно производить технический спирт [1–4]. Перспективно использование жидких продуктов пиролиза (термодеструкции при дефиците или полном отсутствии кислорода) древесных хвойных пород. Например, смесь из 70% живичного скипидара, 25% спирта (метанола) и 5% ацетона (фракций сухой перегонки смолистой древесины сосны) рассматривается как замена бензина марки А-80. При

перегонке возможно использование всех отходов древесины: сучьев, пней, коры и др. [7]. Топливо, произведенное из растительного сырья (преимущественно в составе биомассы – углеводов), получило название биоэтанол (биобутанол и др.) [5; 6], а из жиросодержащего субстрата – биодизель.

Поиски сырья и технологии производства топлива в любом государстве индивидуальны и производятся с учетом национальных ресурсов и интересов. Учитывают присутствие в значительных объемах воспроизводимого сырья (например, лесов, водных и земельных ресурсов), обеспеченность пищевыми и энергетическими ресурсами населения страны и наличие экологических проблем.

В состав любого топлива (производного с использованием солнечной энергии или ископаемого углеродсодержащего топливного субстрата) входят такие элементы, как *C*, *H*, *O*, *N* и в некоторых случаях *S* (таблица 2). Сгорание этих элементов (за исключением *O*) сопровождается образованием оксидов. Теплотворная способность топлив растет с ростом содержания углерода и водорода. Если сжигание водорода сопровождается образованием воды, то сгорание углерода дает, непременно, оксиды углерода.

Таблица 2. – Состав и теплотворность топлив

Органический субстрат	% масс. от сухого органического вещества			Теплотворность, МДж/кг
	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>O</i>	
Дрова	50	6	44	18,9
Этиловый спирт	52	13	35–50	25–30
Каменный уголь	76–95	3,5–6,3	15–17	20,9
Нефть	83–85	11–14	0,5–2	43–44
Газойль	86,3	13,4	0,1	46,9
Бензин	85,1	14,9	–	44,4

Только аммиак ( $NH_3$ ) и водород ( $H_2$ ) при сгорании в ДВС образуют минимальное количество оксидов углерода и серы (см. таблицы 1, 2). В силу этого практически исчезают такие бесполезные остатки горения топлива, как сажа (*C*), *CO* и *CO\_2* и др. Отсутствие серы снимает и другие экологические проблемы, связанные с наличием в продуктах сгорания кислотных газов, провоцирующих смог и кислотные дожди.

В публикуемых материалах о новых видах моторного топлива все чаще упоминается аммиак. Намечается, что аммиак будет применен как корабельное топливо, являясь углероднейтральным субстратом. Его легко и безопасно перевозить и хранить в жидком виде, минимально загрязняя воздух, почву и воду. Предполагается, что он будет производиться с использованием «зеленого водорода» (электролиз воды). Эту технологию продвигает ряд стран – Норвегия, Финляндия, Германия, Корея, Малайзия и морского общества Регистра Ллойда. В 2023 г. сообщалось о планах ввести в эксплуатацию первое судно на аммиаке (Норвегия). Аналогичные задачи решают в США и Японии. Кроме того, аммиак «зеленый» планируется использовать также как автомобильное топливо (Китай) [7; 8] при изменении модификации двигателя.

Помимо прямого использования аммиака в качестве топлива, ведутся исследования и практические работы по его применению как субстрата для производства водорода и азота (побочный продукт). Для этого используют отходы нефтепереработки, а именно, стадии гидроочистки продуктов вторичной переработки, например, газойля. Обусловлено это тем, что азотсодержащие соединения в исходной нефти содержатся в пределах от 0,02 до 0,4% масс., достигая в отдельных случаях до 0,8–1,5% масс и даже 10–12% масс.

При первичной переработке нефти азотсодержащие соединения концентрируются в высококипящих фракциях нефтепродуктов, являясь составной частью смол и асфальтенов. Во вторичной переработке также предусмотрена гидроочистка ( $H_2$ ) продуктов, при этом образуется смесь газов – углеводородов, водорода, сероводорода, аммиака и др. После отделения  $H_2$  из смеси на рециклинг технологического процесса гидроочистки и отпаривания смесь чаще всего сжигают на «факеле» или используют как сырьевую смесь, содержащую  $H_2S$ , для производства серной кислоты или коллоидной серы.

В настоящее время отрабатывают инновационную технологию выделения  $NH_3$  из газов гидроочистки нефтепродуктов и последующего его разложения в процессе крекинга в специальном трубчатом реакторе на катализаторе. Кроме того, установлено, что разложение  $NH_3$  (его диссоциация) возможно прямо в ДВС [12]:



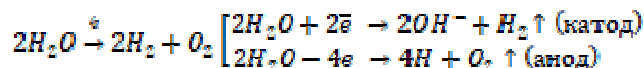
Компания Air Liquide планировала построить пилотную установку крекинга аммиака в бельгийском порту Антверпан в 2024 г. Исследователи университета Принстона и Райса предложили технологию выделения  $H_2$  из аммиака с помощью обычных светодиодов (2022 г.). Создание неэнергоемких технологий производства  $H_2$  из  $NH_3$  позволит обеспечить синтез водородного топлива практически во временных рамках добычи и переработки нефти.

Основными научными исследованиями и коммерческими проектами в настоящее время стали варианты производства водорода – энергоносителя будущего, в т.ч. для автомобильного транспорта. Одновременно

существуют три направления производства: «коричневого»  $H_2$  (сырье – водяной пар и твердое углеродное топливо); «голубого»  $H_2$  (сырье – водяной пар и природный углеводородный газ и его каталитическая конверсия) и «зеленого»  $H_2$  (сырье – вода и ее электролиз). Как видно, основное сырье во всех случаях – вода, а в качестве восстановителей ионов водорода воды служат углеводные субстраты («коричневый» и «голубой»  $H_2$ ) или электроотрицательные электроды электролизеров. Приблизительно до 60–70% от общего объема производства осуществляется по технологии «голубого» водорода, особенно в странах с достаточно высокими запасами природного газа (метан), тесно увязанной с процессами нефтепереработки, где требуются значительные объемы водорода для гидроочистки нефтяных топлив.

В 20-х годах XXI в. в связи с ужесточением требований в охране окружающей среды, а также дефицитом в некоторых странах природного газа начинаются исследования и реализация проектов по производству «зеленого» водорода. Кроме того, с ростом числа атомных электростанций значительно удешевляется энергия, используемая в этом процессе.

В России был заявлен амбициозный проект строительства установки «зеленого»  $H_2$  на Сахалине – 100 тыс. т/год («Росатом») с целью экспорта энергоносителя в Китай и др. страны Азии. Однако лидером этого направления стал Китай, в планах которого строительство 600 заводов, из которых в 2025 г. уже введены в эксплуатацию 150. В 2025 г. Китай произвел 36,5 млн т водорода, причем более половины производства использовало энергию возобновляемых источников. Индийская нефтегазовая компания Bharat Petroleum открыла производство «зеленого водорода» мощностью 5 МВт на НПЗ Бина (Bina), производительностью 2,14 т/сут. Компания планирует построить установки до 10 ГВт на возобновляемых источниках энергии до 2040 г. Для реализации проекта по производству «зеленого водорода» необходимы вода высокого качества, достаточно дешевая электроэнергия и эффективные электролизеры. Реакция электролиза:

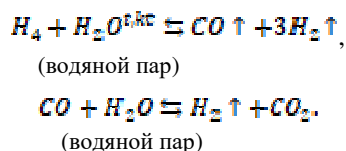


Полученную газовую смесь надо разделить на водород и кислород, поскольку гремучий газ чрезвычайно взрывоопасен.

Электроды чаще выполнены из инертного металла, таких как платина или иридий. Повышает эффективность процесса избыточная энергия в виде перенапряжения и добавки электролита или электрокатализатора.

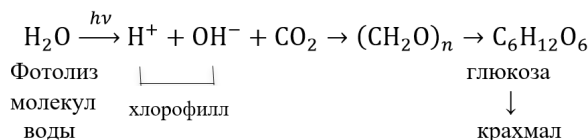
В 2025 г. компания «Tesla» Илона Маска, производящая автомобили, заявила о разработке нового типа водородного двигателя на воде – «водяного двигателя», без раскрытия деталей химического и физического процесса, упоминая, что в основе его лежит реакция «обратного электролиза». Можно предположить, что производимый электролизом из воды водород вновь объединяется в двигателе с кислородом; иными словами, движущей силой становится «взрыв» смеси. При этом вновь образуется вода (пар) и энергия, а электролиз можно будет реализовывать с помощью солнечной энергии от солнечной батареи. Практическое применение водорода будет возможно как топлива (прямым сжиганием) либо как источника потока электронов. Разделение молекул водорода на поток электронов и протонов происходит с помощью тонкой полимерной мембраны (PEM). Повысить эффективность электролиза возможно также при использовании сверхкритической воды (SWE), температуре выше 375 °С и давлении более 22,1 МПа [7; 8].

В государствах с большими запасами природного газа применяется, в основном, технология паровой конверсии метана, о которой упоминалось ранее. Около 25–40 % исходного газа расходуется как топливо процесса. Основные уравнения процесса паровой конверсии  $CH_4$ :



Конечным продуктом является смесь паров воды и газов. Затем идут последовательно стадии очистки (в основном от  $CO_2$ ) и осушки газа водорода, который используется на НПЗ для гидроочистки нефтепродуктов.

Исторически сложилось так, что паровой конверсии подвергали дешевый и доступный углеродсодержащий субстрат – отход древесины (Германия). Целевой продукт процесса – «водяной» газ (смесь  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ , водяной пар), который использовался как топливо. Позже древесные отходы стали рассматриваться как источник возобновляемого в процессе фотосинтеза углеродсодержащего сырья – клетчатки, целлюлозы, крахмала. Уравнение фотобiosинтеза в хлоропластах растений:





Таким образом, под воздействием солнечной энергии идет процесс распада молекул воды (фотолиз) с образованием ионов водорода, которые в хлоропластах растений благодаря ферментам (биокатализаторам) соединяются с углекислым газом атмосферы, образуя первичные органические углеродосодержащие соединения.

Крахмал, целлюлоза и клетчатка растений могут служить сырьем для получения другого горючего топливного ресурса – технического спирта. Для этого древесное сырье гидролизуют (чаще  $H_2SO_4$ ) с получением в итоге сахаросодержащего водного субстрата. На нем осуществляется синтез микробной дрожжевой биомассы (ферментация) и спиртов как продуктов их жизнедеятельности. Поэтому еще в СССР в 1930–70 гг. действовала гидролизная промышленность (более 40 заводов, в т.ч. в Бобруйске), которая производила технический спирт и фурфурол, широко применяемые в химической и нефтеперерабатывающей промышленности. С 2000 г. гидролизный спирт стали использовать (10% об.) в виде добавки к моторному топливу в СНГ.

Спирты как альтернативу бензину применяли в мире с начала 90-х годов XX в. В Бразилии около 7 млн автомобилей ездили на биоэтаноле и около 9 млн использовали смесь спирта с бензином (газохол). Г. Форд создал специально для спиртосодержащего моторного топлива двигатель, который мог работать на смеси бензина и этанола в любых соотношениях.

Помимо технических спиртов в качестве моторного топлива стали рассматривать растительные жиры и масла (и их эфиры), а также масложировые отходы производства. Связано это с тем, что растительные жиры дают растения неприхотливые к климатическим и почвенным условиям. Они обладают высокой теплотворной способностью (см. таблицу 1) за счет большой доли *C* и *H* (более 80–90% в сухом органическом компоненте массы). Американские ученые предложили получать масла из микроводорослей, способных расти в искусственных условиях в фотореакторах. В результате фотобиосинтеза было получено топливо, которое предполагалось использовать в двигателях самолетов. Для улучшения качества масел как моторного топлива их подвергают гидроочистке и трансэтерификации (повышению испаряемости). Соответственно, новые виды топлива получили названия с приставкой био-: биодизель, биокеросин. Германия создала свой стандарт для всех автопроизводителей Европы (Din 51606) – биокеросин, чаще биодизель, который смешивают (до 20% об.) с нефтепродуктами. В США и Европе используют смесь с 10% об. добавкой указанного вещества.

В Белоруссии на ПО «Азот» (Гродно) на основе рапсового масла производят метиловый эфир рапсового масла (МЭРМЕМ 14.214.2003). Технология производства простая: смешиваются масло, метанол и серная кислота (катализатор). После смешения и отстаивания смесь разделяется на 3 слоя: биодизель (МЭРМ), мыло (глицерат натрия) и глицерин. В 2019 г. объем производства составил 417 тыс. т, а в 2023 – 578 тыс. т. Установлено, что рапсовое масло уникально по составу, обеспечивая пищевую полезность на уровне оливкового масла. Эти высокие пищевые качества обеспечивают значительный экспортный спрос на него (80–98% от объемов идет на экспорт, например, в Китай и ряд государств Европы). После отжима масла из семян рапса остается плотный остаток – шрот, белковый кормовой продукт, а растительная масса (солома) может быть использована для производства гидролизного спирта. Организация безотходности такого производства обеспечивает его высокую рентабельность.

Обобщенным показателем эффективности производства топлива является энергетический баланс (см. таблицу 1), повышению которого способствует снижение энергоемкости производства топлива. Оценка показателя носит скорее оценочный характер, чем точно обоснованный. В частности, по аммиаку, водороду и биодизелю есть энергетические резервы производства и возможность достижения значения энергетического баланса меньше единицы.

Варианты схем производства моторного топлива – биоэтанола, биодизеля, водорода и аммиака, используемое сырье, способы переработки и отходы переработки для каждого из вариантов топлива, – см. рисунок.

В настоящий момент одним из дешевых энергоносителей является электрический ток от атомных станций. Кроме того, безотходность производства также благоприятно влияет на экономические показатели.

**Заключение.** В Беларуси отсутствуют промышленно значимые запасы качественного углеродосодержащего топлива (нефти, топливного газа, угля и пр.), но есть лес (древесина), качественная вода подземных источников и атомная энергетика. Эти обстоятельства побуждают обратить внимание на те виды моторного топлива, которые могут быть произведены с учетом имеющихся в достаточном количестве сырья и энергии. Очевидно, что еще долгое время будет использоваться нефтяное и газовое топливо, но развитие современного, экологически безопасного производства моторного топлива будет мотивироваться через ужесточение норм выбросов в окружающую среду и приоритетное финансирование «зеленых» проектов как со стороны государства, так и частных инвесторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности производства и использования рапсового биотоплива на автотракторной технике / А.П. Уханов, В.А. Рачкин, М.А. Уханов и др. // Нива Поволжья. – 2008. – № 1 – С. 36–42.
2. Анализ способов применения биологических видов топлива в дизельных двигателях / С.Н. Борычев, А.В. Шемякин, В.В. Терентьев и др. // Вестник РГАТУ. – 2017. – № 3(35). – С. 84–88.

3. Данковцев В.Т., Лукьянченко В.В. Анализ влияния характеристик альтернативных видов топлива и смеси на рабочий процесс дизелей // Вестник СибАДИ. – 2009. – № 12. – С. 16–22.
4. Уханов А.П., Уханов Д.А., Шеменов Д.С. Дизельное смешевое топливо. – Пенза: ИО ПГСХА, 2012. – 147 с.
5. Биодиты – альтернативный вид моторного топлива для тракторных дизелей / А.П. Уханов, В.А. Рачкин, Д.А. Уханов и др. // Нива Поволжья. – 2009. – № 2(11). – С. 71–76.
6. Гарабаджиу А.В., Козлов Г.В., Галынкин В.А. Технологии «зеленого» топлива [Электронный ресурс] // Экспертный Союз. – 2019. – № 28. – URL: <http://unionexpert.su/tehnologii-zelenogo-topliva/> (дата доступа 01.12.2025).
7. Мысакова А.Г., Крюков А.А. «Зеленый» бензин: реальность или миф? // Вестник ЧелГУ. – 2024. – № 6(488). – С. 253–264. DOI: 10.47475/1994-2796-2024-488-6-253-264
8. Белов В.Б. Реализация национальной водородной стратегии Германии – основные итоги 2022 г. Ч. 2 // Научно-аналитический вестник Института Европы РАН. – 2023. – № 2(32). – С. 83–99.

Поступила 08.01.2026

## PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF MOTOR FUEL PRODUCTION

**R. ANDREEVA, A. DUDAN, T. VIGERNINA**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*This paper examines alternative motor fuels and conducts a comparative analysis of their energy efficiency, assessed using an energy balance. An analysis of existing fuel production technologies revealed that, in any country, their production is tailored to national resources and interests, taking into account the availability of significant quantities of renewable raw materials. Currently, oil and gas fuels are used in most cases, but increasing environmental requirements are driven by stricter emission standards and the prioritization of "green" projects by both governments and private investors. Therefore, this paper examines, summarizes, and structures the production methods for motor fuels—bioethanol, biodiesel, hydrogen, and ammonia—and provides the feedstocks used, processing methods, and processing waste for each of the fuel options under consideration.*

**Keywords:** motor fuel, internal combustion engine, alternative fuels, bioethanol, biodiesel, ammonia, "green" projects.

## ВЫСОКОАВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ И АВТОНОМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА: ПЕРСПЕКТИВЫ, ПРОБЛЕМЫ И ВОПРОСЫ ОТВЕТСТВЕННОСТИ

*д-р техн. наук, доц. С.А. РЫНКЕВИЧ*

*(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой;  
Белорусско-Российский университет, Могилев)*

*Приведена характеристика высокоавтоматизированного транспортного средства (ВАТС). Рассмотрена классификация уровней автономности ВАТС. Отмечено, что путь к появлению беспилотных автомобилей был долгим и тернистым, требующим десятилетий научных изысканий и череды революционных технологических прорывов. Представлены примеры широкого распространения беспилотных автомобилей в ряде стран. Описаны электрические автономные транспортные средства с трансформируемым интерьером и основные типы таких электромобилей. Отмечено, что в ВАТС идея передачи управления водителю подразумевает координацию действий между автоматикой и человеком, особенно когда система не справляется с безопасным вождением или когда необходимо человеческое вмешательство. Проанализированы ключевые аспекты данного подхода. Выделены проблемы, связанные с массовым внедрением ВАТС. Подчеркнуто, что неопределенность правового статуса и высокие эксплуатационные риски могут замедлить массовое производство автономного транспорта. Пока неясно, как именно будут регулироваться автономные машины, и есть немало рисков при их использовании. Развертывание полностью автоматизированных транспортных средств, соответствующих пятому уровню автономности и не требующих вмешательства человека, порождает не только комплекс юридических вопросов, но и значительные угрозы в области кибербезопасности.*

**Ключевые слова:** транспортное средство, высокоавтоматизированный транспорт, автоматизированное управление, дорожное движение, транспортная безопасность.

**Введение.** Высокоавтоматизированное транспортное средство – это автомобиль, который оснащен системами автоматизации, позволяющими ему выполнять значительную часть функций управления без непосредственного вмешательства водителя. Эти технологии могут включать в себя как частичное, так и полное автоматическое управление<sup>1</sup>. Обеспечение безопасной и своевременной передачи управления водителю в высокоавтоматизированных транспортных средствах – проблема, требующая решения для успешного внедрения этой технологии.

ВАТС оборудованы различными датчиками, такими как камеры, радары и лидары, которые помогают им воспринимать окружающую среду и принимать решения. Алгоритмы обработки данных используются для анализа информации, полученной от датчиков в реальном времени, о движении и взаимодействии с другими участниками дорожного движения.

**Основная часть.** В 2014 г. Общество автомобильных инженеров (SAE) опубликовало работу, представляющую собой стандарт, который устанавливает таксономию и определения терминов, относящихся к автоматизированным системам управления движением дорожных транспортных средств. Данный документ подробно рассматривает ряд ключевых аспектов, включая введение системы классификации уровней автоматизации. SAE J3016<sup>2</sup> делит эти уровни на шесть категорий, описание которых приводится далее.

Уровень 0 (Непосредственное управление). Водитель полностью контролирует управление автомобилем без помощи систем автоматизации. Здесь система помогает человеку управлять автомобилем (круиз-контроль, автоматическая парковка).

Уровень 1 (Помощь водителю). Системы могут управлять одной функцией, такой как управление рулевым колесом или ускорением/торможением, но водитель должен оставаться вовлеченным и готовым перейти к управлению.

Уровень 2 (Управление частично автоматизированное). Системы могут одновременно управлять рулевым управлением и ускорением/торможением, но водитель должен постоянно следить за дорогой и быть готовым взять управление. Этот уровень предполагает частичную автономность, когда автомобиль берет на себя часть задач по управлению (навигация, рулевое управление, маневрирование, торможение, разгоны), но водитель по-прежнему остается активным участником процесса.

Уровень 3 (Самостоятельное управление при определенных условиях). Автомобиль способен самостоятельно перемещаться, когда для этого созданы подходящие условия, без необходимости вмешательства водителя.

<sup>1</sup> ГОСТ Р 70249-2022. Системы искусственного интеллекта на автомобильном транспорте. Высокоавтоматизированные транспортные средства. Термины и определения. – М.: Рос. и-т стандартизации, 2022. – 11 с.

<sup>2</sup> SAE J3016. Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems. – Warrendale: Society of Automotive Engineers, 2014. – 41 p.

Однако в этом случае требуется, чтобы водитель был готов взять управление в любой момент по запросу системы. Система автопилота активна, но водитель сохраняет контроль и может перехватить управление в любой момент.

Уровень 4 («Продвинутое» автопилотирование). Автомобиль может управлять собой в заранее определенных условиях (например, в городских условиях или на автомагистрали) без необходимости вмешательства водителя. Т.е. транспортное средство способно к самостоятельному управлению в рамках четко очерченного операционного дизайна. Наличие водителя в транспортном средстве является обязательным, при этом его непосредственное управление может отсутствовать. Эксплуатация автомобиля разрешена исключительно в специально оборудованных для данного типа передвижения участках.

Уровень 5 (Полное управление). Автомобиль способен управлять собой в любых условиях и не требует вмешательства водителя. Уровень 5 предполагает отсутствие рулевого колеса и педалей. Термин «беспилотный автомобиль» подразумевает транспортное средство, где водитель не контролирует движение, но остается в салоне. Однако сегодня такие машины не используются в реальных условиях, т.к. законодательство и технологии требуют обязательного присутствия водителя.

Работа<sup>3</sup> представляет собой значительный вклад в стандартизацию терминологии и классификации, что напрямую влияет на безопасность интеграции автоматизированных систем управления движением в общую дорожную сеть и улучшает координацию между всеми участниками. Путь к созданию беспилотных автомобилей проложен благодаря многолетним научным открытиям и технологическим достижениям. От зарождения идеи в середине прошлого века до сегодняшних автономных прототипов этот прогресс стал реальностью благодаря развитию датчиков, искусственного интеллекта и вычислительных мощностей.

Европа уверенно движется вперед, внедряя беспилотные автомобили. Россия не отстает, делая ставку на инновации в этой перспективной области. Ярким подтверждением тому служит «Яндекс.Такси»: уже сегодня на дорогах работают 50 самоуправляемых машин. С 2020 по 2022 гг. они проехали более миллиона километров, причем львиная доля этого пути пришлось на столичные магистрали. А к 2023 г., успешно завершив испытания, компания планирует увеличить свой автономный автопарк до тысячи машин.

В конце 2023 г. на трассе М-11 Москва–Санкт-Петербург стартовал новый этап в логистике: беспилотные грузоперевозки стали реальностью. На линию вышли новейшие магистральные тягачи КАМАЗ-5490, на 70% собранные из российских комплектующих. Эти грузовые автомобили оснащены продвинутой системой автопилота (уровень 4 по классификации SAE), использующей искусственные нейронные сети для управления. Для беспилотных грузовых автомобилей предусмотрена отдельная полоса движения. Ожидается, что благодаря круглосуточной работе и возможности совершать больше рейсов в день скорость доставки увеличится на 12%. Руководители федерального проекта «Беспилотные логистические коридоры» рассчитывают на 10% сократить расходы на перевозку, поскольку беспилотники смогут работать без перерывов, как это требуется водителям, и исключат затраты на их оплату.

Процесс внедрения ВАТС имеет огромные возможности и перспективы, поскольку устраняет человеческий фактор, являющийся причиной большинства ДТП (70%). Значительный потенциал и масштабность упомянутых и аналогичных проектов в сфере автономного транспорта не могут быть полностью реализованы, поскольку прогресс в области беспилотных автомобилей упирается в неразвитость законодательной базы.

В качестве примера высокоавтоматизированного транспорта рассмотрим концепт Volvo 360c как революционный электромобиль с возможностью автономного управления и трансформируемым интерьером. Он соответствует уровню 4 автономности. Так, Volvo 360c спроектирован с использованием технологии автономного вождения, что позволяет ему самостоятельно управлять движением во многих ситуациях без необходимости вмешательства водителя. Концепт включает в себя множество датчиков и камер, которые обеспечивают высокий уровень безопасности и позволяют автомобилю адаптироваться к изменяющимся дорожным условиям.

Volvo 360c является полностью электрическим, что снижает выбросы углерода и способствует более чистой окружающей среде. Преимущества этого концепта:

- энергоэффективность: важным аспектом разработки является эффективное расходование энергии, что напрямую способствует увеличению дистанции, которую автомобиль может преодолеть без подзарядки;
- трансформируемый интерьер; гибкость пространства: салон Volvo 360c отличается исключительной адаптивностью, позволяя менять его конфигурацию под различные нужды – будь то комфортное путешествие, рабочая обстановка или зона отдыха;
- современный комфорт и технологии: внутри автомобиля пассажиров ждут передовые технологии, включая мультимедийные и коммуникационные системы, призванные сделать каждую поездку максимально приятной и продуктивной;

---

<sup>3</sup> SAE J3016. Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems. – Warrendale: Society of Automotive Engineers, 2014. – 41 p.

– многообразие конфигураций: интерьер легко трансформируется, предлагая различные варианты обустройства – от спального места до рабочего кабинета или зоны для общения, в зависимости от текущих запросов пассажиров;

– интеграция с городской инфраструктурой; эффективное взаимодействие: Volvo 360c способен «общаться» с такими городскими системами, как управление движением и зарядные станции, что значительно повышает эффективность его перемещения. Перспектива «умных» городов: разработка концепта учитывает будущие потребности «умных» городов, где автономный транспорт будет играть центральную роль;

– пользовательский опыт; индивидуальный подход: пассажиры могут адаптировать салон и функции автомобиля под свои нужды, делая каждую поездку уникальной. Простота управления: современные интерфейсы и технологии обеспечивают легкое и комфортное взаимодействие с автомобилем.

На рисунке 1 представлены электрические автономные транспортные средства с трансформируемым интерьером.



*а* – городской кроссовер на электротяге; *б* – вариант изменения интерьера салона;  
*в* – концепт Volvo 360c; *г* – электрический беспилотный минивэн CM1e, KHP

**Рисунок 1. – Автономные транспортные средства с трансформируемым интерьером**

Электромобили с трансформируемым интерьером представляют собой инновационное решение, которое позволяет адаптировать пространство внутри автомобиля в зависимости от потребностей пассажиров. Основные типы таких электромобилей приведены на рисунке 2.

1. Модульные электромобили. Эти автомобили имеют сменные модули, которые могут быть настроены для различных нужд, таких как пассажирские перевозки, грузоперевозки или мобильные офисы.

2. Автомобили для совместного использования. Эти электромобили проектируются для совместного использования и могут менять свой интерьер для разных групп пассажиров. Например, сиденья могут быть переоборудованы для комфортной поездки нескольких человек или для работы. Так, концепты от таких компаний, как Toyota и Nissan, фокусируются на гибкости интерьера для повышения комфорта пассажиров.

3. Автономные электромобили. Это электромобили с уровнем автономности, которые могут трансформировать интерьер в зависимости от сценария использования. Например, в режиме автономного вождения могут разложиться сиденья для отдыха или работы. Пример: концепты, такие как Volvo 360c, предлагают автономные решения с гибким пространством для различных видов деятельности.

4. Электрические минивэны и кроссоверы. Эти автомобили имеют просторные интерьеры, которые можно адаптировать для перевозки пассажиров или грузов. Сиденья могут убираться или складываться для увеличения пространства.

5. Специальные электромобили. Это автомобили, предназначенные для конкретных задач, таких как мобильные офисы или автомобили для отдыха, могут иметь трансформируемый интерьер для повышения комфорта и функциональности. Например, такие концепты, такие как Rivian R1T, могут быть настроены для кемпинга или других активностей.



Рисунок 2. – Типы электромобилей

Когда речь идет о машинах с высокой степенью автоматизации, важно понимать, что передача управления обратно человеку-водителю – это не просто кнопка. Это процесс, требующий четкого взаимодействия между машиной и человеком. Особенно это важно, когда автоматика сталкивается с трудностями в безопасном вождении или когда водителю нужно взять руль на себя. Вот основные моменты, касающиеся этого:

1. Степень автоматизации и управление.

*Уровни автономии.* В зависимости от того, насколько автомобиль способен управлять самостоятельно (от частичной до полной), меняются и способы передачи контроля. Например, на более низких уровнях автоматизации (втором и третьем) водитель должен быть готов в любой момент «перехватить» управление. На более высоком уровне (четвертом) система может самостоятельно справляться с вождением в определенных условиях.

2. Сигналы для водителя.

*Оповещения о необходимости вмешательства.* Автомобили с высоким уровнем автоматизации оснащены комплексом систем, которые уведомляют водителя о том, что ему нужно взять управление. Эти уведомления могут быть визуальными, звуковыми или тактильными.

*Ситуационные подсказки.* Передача управления может зависеть от текущей ситуации, например, при ухудшении дорожных условий или возникновении технических проблем.

3. Взаимодействие человека и машины.

*Интуитивное управление и своевременное информирование.* Ключевым аспектом является создание простых и понятных интерфейсов, обеспечивающих легкий и быстрый переход управления к водителю. Это может быть реализовано посредством физических кнопок, сенсорных панелей или голосового управления.

Система также должна эффективно информировать водителя, предоставляя актуальные данные о состоянии автомобиля и окружающей среде, что способствует принятию обоснованных решений.

4. Обучение и подготовка водителей.

*Навыки взаимодействия с автоматикой.* Водители должны быть обучены правилам взаимодействия с высокоавтоматизированными системами, включая понимание того, когда и как следует брать на себя управление.

*Практические тренировки.* Использование симуляторов для отработки различных сценариев поможет водителям лучше реагировать в реальных дорожных ситуациях.

## 5. Обеспечение безопасности и надежности.

*Гарантирование высокого уровня защищенности и безотказности функционирования.*

*Поддержание стабильности и защищенности системы, а также обеспечение устойчивости и защищенности всех процессов.*

## 6. Правовые и психологические вопросы.

*Определение ответственности.* Необходимо четко установить, кто несет ответственность в случае аварии или происшествия, когда управление было передано водителю.

*Психологическая готовность водителя.* Важно изучить, как водители воспринимают процесс передачи управления и как это влияет на их способность быстро и эффективно вмешаться.

Несмотря на очевидные плюсы, широкое распространение автомобилей с автопилотом сталкивается с серьезными препятствиями. Во-первых, это может повлечь за собой сокращение штата в транспортных организациях и уменьшение нагрузки на сотрудников дорожной полиции, занимающихся расследованием аварий. Во-вторых, остро стоит вопрос определения виновного в случае ДТП, вызванного сбоем системы. Неясно, кто будет нести ответственность: владельцы автомобилей (или юридические лица на этапе тестирования) за программные недочеты? Такая правовая неопределенность и высокие риски эксплуатации могут замедлить массовое производство и внедрение ВАС. Ответственность водителя будет ограничиваться случаями, когда он не смог вовремя перехватить управление в критической ситуации или, наоборот, необоснованно вмешался в работу автопилота, который мог бы предотвратить аварию.

Согласно общепринятым нормам, как обычные, так и высокоавтоматизированные транспортные средства признаются источниками повышенной опасности. В большинстве случаев владелец такого транспортного средства несет ответственность за причиненный им вред. Однако эта ответственность может быть снята, если будет установлено, что вред возник по причине непреодолимых обстоятельств или умышленных действий потерпевшего.

На рисунке 3 отражены существенные факторы, препятствующие формированию устойчивой уверенности в безопасности ВАС.



Рисунок 3. – Аспекты проблемы формирования надежной уверенности в безопасности ВАС

В 2018 г. в Аризоне произошла трагическая авария, унесшая жизнь женщины. Она погибла, переходя дорогу вне установленного пешеходного перехода, примерно в ста метрах от него, ведя за собой велосипед. Система автономного вождения автомобиля, принадлежащего Uber, зафиксировала объект за 5,6 с до столкновения, но первоначально идентифицировала его как другое транспортное средство, а затем как велосипед, а не как пе-

шехода. Лишь за 1,2 с до удара система предупредила водителя-испытателя о критической ситуации и передала управление. Аварийное торможение было активировано за 0,2 с до столкновения, когда избежать его уже было невозможно. Водитель в момент происшествия отвлеклась на просмотр телепередачи, что способствовало трагическому исходу. Расследование, длившееся полтора года, установило вину всех сторон: водителя-испытателя за невнимательность, погибшей за нарушение правил перехода дороги в темное время суток, компании Uber за недоработки в алгоритмах распознавания объектов и задержку реакции системы, а также власти Аризоны за недостаточное регулирование тестирования беспилотных автомобилей на дорогах. Ответственность за возмещение ущерба возложена на водителя-испытателя и Uber, с которой ранее были сняты уголовные обвинения.

Внедрение полностью автономных транспортных средств (пятый уровень по классификации SAE), исключаящее потребность в человеческом управлении, сопряжено не только с юридическими вызовами, но и с существенными рисками для кибербезопасности. Потенциальные кибератаки могут поставить под угрозу функционирование целых городских агломераций и их транспортной инфраструктуры, делая их уязвимыми объектами.

**Заключение.** Высокоавтоматизированные транспортные средства представляют собой значительный шаг в развитии автомобильной индустрии, предлагая новые уровни безопасности, удобства и эффективности. Методология передачи управления в ВАС акцентирует внимание на формировании надежного и понятного интерфейса взаимодействия между человеком и машиной. Это важно для обеспечения безопасности и эффективности вождения, а также для подготовки человека (водителей, пассажиров, пешеходов) к новым условиям автономного вождения.

В то же время неясность правового статуса и высокие эксплуатационные риски могут замедлить массовое производство автономного транспорта. Развертывание полностью автоматизированных транспортных средств, соответствующих пятому уровню автономности и не требующих вмешательства человека, порождает не только комплекс юридических вопросов, но и значительные угрозы в области кибербезопасности.

Поступила 17.12.2025

## HIGHLY AUTOMATED AND AUTONOMOUS VEHICLES: PROSPECTS, CHALLENGES AND LIABILITY ISSUES

S. RYNKEVICH

*(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk;  
Belarusian-Russian University, Mogilev)*

*This article describes highly automated vehicles (HAV). Classifications of HAV autonomy levels are considered. It is noted that the path to the emergence of driverless cars was long and arduous, requiring decades of scientific research and a series of revolutionary technological breakthroughs. From the first ideas in the middle of the last century to modern prototypes, autonomous transport has become a reality thanks to the improvement of sensors, the development of artificial intelligence technologies, and computing power. Examples of the widespread use of driverless vehicles in several countries are considered. Electric autonomous vehicles with a transformable interior are described, and the main types of such electric vehicles are examined. It is noted that in HAV, the idea of transferring control to the driver implies coordination between the automation and the human, especially when the system cannot cope with safe driving or when human intervention is necessary. Key aspects of this approach are analyzed. The challenges associated with the widespread implementation of HAV are highlighted. It is noted that the unclear legal status and high operational risks could slow the mass production of autonomous vehicles. It is still unclear how autonomous vehicles will be regulated, and their use poses numerous risks. The deployment of fully automated vehicles, which correspond to Level 5 autonomy and require no human intervention, raises not only a host of legal issues but also significant cybersecurity threats.*

**Keywords:** *hydromechanical transmission, mechanical transmission, mobile machine, gear engagement, profile modification, dry friction damper.*

УДК 631.3.004.67

DOI 10.52928/2070-1616-2026-53-1-40-45

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕМОНТНОГО ЦИКЛА АВТОМОБИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ****д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ, канд. техн. наук, доц. Т.В. ВИГЕРИНА,  
Л.С. МИРЗАТАЕВ****(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)**

*Анализ существующей системы технического обслуживания и ремонта автомобилей не подтвердил ее высокую эффективность. Предложена структура ремонтного цикла автомобильных агрегатов с ограничением числа трудоемких ремонтов и возвращения среднего ремонта в систему технического обслуживания и ремонта автомобилей. При этом обосновано использование комплекта заменяемых деталей, подготовленного авторемонтным предприятием. Определено назначение среднего ремонта агрегатов, обеспечивающего более полное использование долговечности составных частей агрегатов. Приведены требования к техническому уровню авторемонтных предприятий из расчета обеспечения геометрических параметров восстановленных деталей, не уступающих по соответствующим параметрам новым деталям.*

**Ключевые слова:** ремонт автомобилей, виды ремонта, ремонтное производство, ремонтный комплект деталей.

**Введение.** Автомобильный парк Республики Беларусь насчитывает около 5 млн автотранспортных средств. Затраты на его содержание в исправном состоянии и безаварийная работа в течение всего срока службы на порядок превышают затраты на создание парка этих автомобилей, поэтому обоснование периодичности и объема ремонтных работ имеет важное значение.

Рекламная политика и действия производителей автомобилей, требующие загрузки своего производства с получением максимального дохода и наибольшей прибыли, нацелена на то, чтобы спустя сравнительно небольшой срок службы произведенный автомобиль был утилизирован или продан в «третьи» страны, а вместо него был выпущен и продан новый экземпляр. Но только состоятельным владельцам позволительно сбывать автомобиль с незначительно израсходованным ресурсом и приобрести новую машину. Посреднический бизнес заинтересован в сбыте запасных частей, а обслуживающий бизнес – в использовании их при ремонте автомобилей. В качестве запасных частей производителям техники выгодно поставлять дорогие детали, изготовленные, как правило, с отступлением от требований технической документации, которые нежелательно использовать при сборке нового изделия. В результате этого произошел развал ремонтного производства с исключением капитального ремонта полнокомплектных автомобилей из их жизненного цикла и сокращением объемов ремонта агрегатов на специализированных предприятиях.

Долговечность автомобилей в последнее время существенно повысилась за счет использования новых материалов и более совершенных процессов и оборудования. Владельцы техники экономически заинтересованы в продлении срока службы автомобилей ремонтными воздействиями с восстановлением деталей при полном использовании их остаточной долговечности.

Многолетняя научная и производственная деятельность в технической эксплуатации автомобилей определила виды, содержание, периодичность и объем ремонтных работ, включенных в систему содержания парка автомобилей в исправном состоянии в течение всего срока их службы. Ремонтный цикл из этих работ включает<sup>1</sup>:

- текущий ремонт (ТР);
- ремонт малой трудоемкости, выполняемый совместно с техническим обслуживанием (ТО) автомобилей;
- регламентированный ремонт (РР);
- планово-предупредительный ремонт (ППР);
- капитальный ремонт (КР);
- восстановительный ремонт (ВР).

Вид и объем ремонта определяются количеством и видом деталей, достигших после определенной нагрузки предельного состояния или близкого к нему, а также степенью восстановления ресурса автомобиля. Из приведенного цикла исключен средний ремонт (действующий на предприятиях России и в армейских условиях), а некоторые виды ремонта введены искусственно.

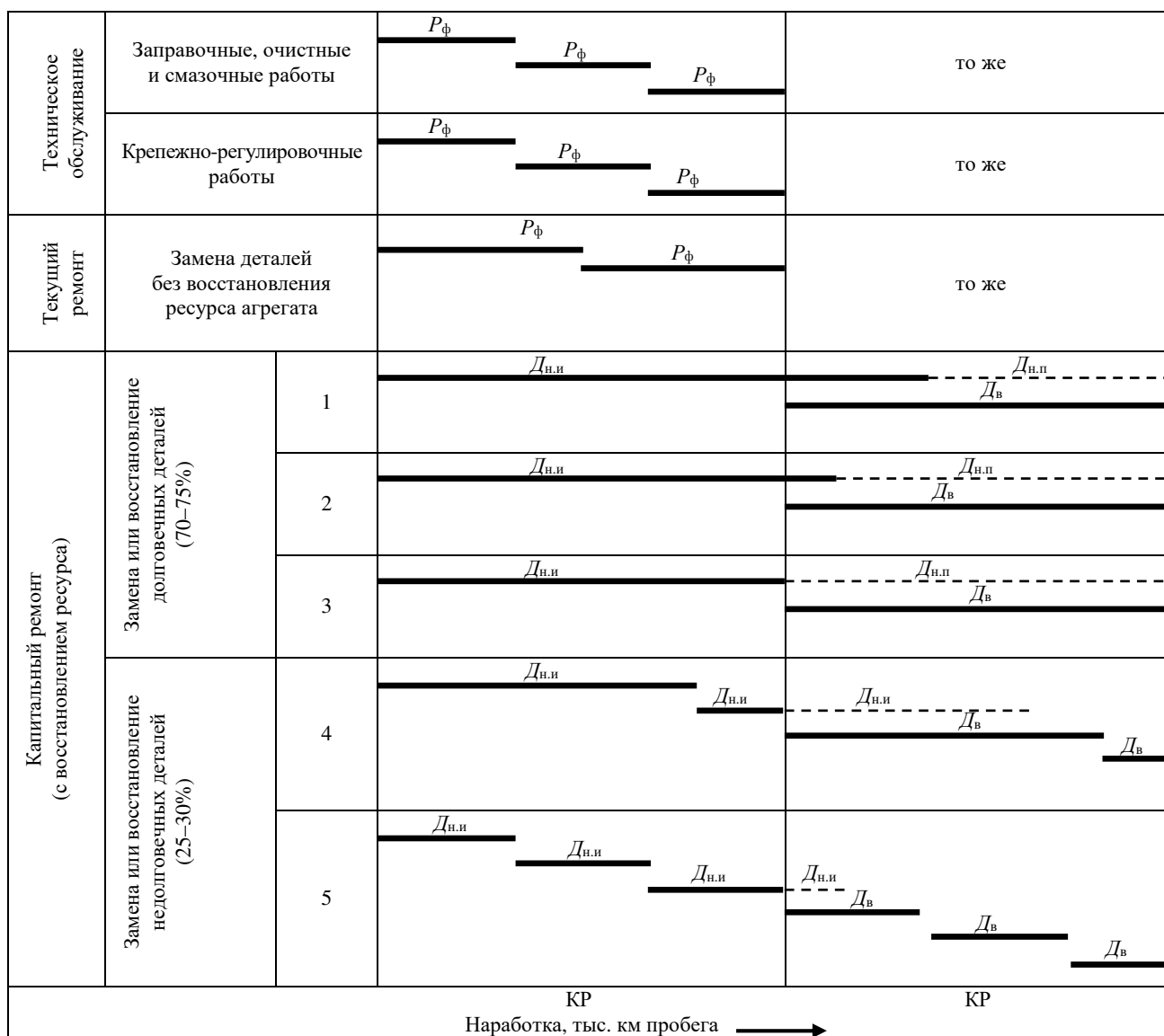
---

<sup>1</sup> ТКП 248-2010 (02190). Техническое обслуживание и ремонт автомобильных транспортных средств. Нормы и правила проведения – Минск: М-во транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь; Белорус. науч.-исслед. ин-т транспорта «Транстехника», 2012. – 42 с.

Таким образом, оптимальное решение, определяющее место, время, содержание и объем ремонтных работ в течение всего срока службы агрегатов как стратегия ремонта частей автомобилей, требует в настоящее время уточнения.

**Цель работы:** на примере самых сложных автомобильных агрегатов (двигателей) обосновать их оптимальный ремонтный цикл, составляющий основу стратегии ремонта, и определить требования к техническому уровню авторемонтного производства.

**Основная часть.** Нормативная надежность автомобиля закладывается при его проектировании и изготовлении, а поддерживается в эксплуатационной части его жизненного цикла ТО и ремонтом, как показано на рисунке.



$P_φ$  – наработка агрегата;  $D_{н.и}$  и  $D_{н.п}$  – долговечность новой детали, обусловленная износостойкостью и прочностью, соответственно;  $D_в$  – долговечность восстановленной детали; КР – капитальный ремонт; 1–5 – группы деталей по долговечности

**Рисунок. – Обоснование необходимости технического обслуживания, текущего и капитального ремонтов в системе содержания автомобилей в исправном состоянии [1]**

Несмотря на стремление создать автомобильные агрегаты из деталей, достигающих предельного состояния одновременно, это по ряду причин не удастся, в т.ч. вследствие использования техники в различных эксплуатационных условиях.

ТО продлевает время пребывания автомобиля в работоспособном состоянии за счет выполнения заправочных, очистных, смазочных и крепежно-регулировочных работ. Ремонтные работы предусматри-

вают замену (восстановление) составных частей изделий с сопутствующими работами (очисткой, разборкой, определением технического состояния деталей и их восстановлением, сборкой, окрашиванием, обкаткой и испытаниями).

Если предельного состояния достигают одна или реже несколько неосновных деталей агрегата, то выполняют его текущий ремонт, который не восстанавливает ресурс этого агрегата. Ремонт малой трудоемкости, выполняемый совместно с техническим обслуживанием, является текущим ремонтом и его не следовало выделять в отдельный вид ремонта. Планировать периодичность и объем текущего ремонта не представляется возможным.

Если предельного состояния достигли и основные (в т.ч. корпусные) детали, то необходим капитальный ремонт агрегата, который выполняют специализированные ремонтные предприятия при наличии необходимых условий, в соответствии с СТБ-928<sup>2</sup>, СТБ-929<sup>3</sup> и СТБ-930<sup>4</sup>. Этот вид ремонта обеспечивает послеремонтную наработку, не уступающую наработке новых изделий, а в ряде случаев и превосходящую ее. При этом предполагается восстановление деталей (включая базовые) всеми освоенными способами, установленными технической документацией. Восстановление деталей является основным источником экономической эффективности ремонта. Однако капитальный ремонт полнокомплектных автомобилей, согласно нормативным документам, не является обязательным техническим воздействием. При исчерпании ресурса по пробегу автомобиль может быть списан. Для автомобилей категории  $M_3$  белорусского производства допускается проведение не более одного капитального ремонта. Капитальный ремонт полнокомплектных автомобилей предполагает снятие их на длительный срок из перевозочного процесса, что связано с большими экономическими потерями. Например, для грузовых автомобилей моделей МАЗ, КамАЗ и ЗИЛ предусмотрен только капитальный ремонт агрегатов.

На договорных условиях автомобиль может пройти и восстановительный ремонт, если он по своему техническому состоянию из-за аварии или значительного износа не подлежит капитальному ремонту. Восстановительный ремонт автомобилей с восстановлением деталей, включая базовые, проводят также специализированные ремонтные предприятия. Послеремонтная наработка автомобилей должна составлять не менее 80% ресурса, установленного для капитально отремонтированных автомобилей. Таким образом, восстановительный ремонт по сути является капитальным ремонтом.

Регламентированный ремонт подразумевает обязательную замену деталей и узлов, влияющих на безопасность дорожного движения, топливную экономичность и состояние окружающей среды, независимо от технического состояния автомобилей. Значения наработки заменяемых изделий установлены ТКП 248-2010<sup>5</sup>. Этому виду ремонта подлежат транспортные средства категории  $M_3$  белорусского производства, перевозящие пассажиров в регулярном сообщении, и транспортные средства, используемые в экстремальных условиях (например, в шахтах). РР выполняют на специализированных предприятиях при пробеге не более 2/3 нормативного ресурса, но не реже одного раза в 6 лет.

Планово-предупредительный ремонт выполняют в плановом порядке с установленной периодичностью и в объеме, определяемом по результатам диагностирования, исходя из высоких требований к надежности автомобилей, перевозящих пассажиров и опасные грузы и работающих за рубежом или в экстремальных условиях. Например, допускается применение ППР для автомобилей категории  $M_3$ , регулярно перевозящих пассажиров на городских и пригородных маршрутах. ППР обеспечивает исправное состояние автобусов в течение всего срока их службы. Периодичность ППР составляет 80 тыс. км пробега, начиная с пробега 160 тыс. км с начала эксплуатации.

Следует отметить, что последние два вида ремонта не получили широкого применения; они могут быть отнесены к другим видам системы ремонта автомобилей.

Одна из прогрессивных тенденций в практике ремонта – применение агрегатного метода ремонта автомобилей в условиях автотранспортных предприятий. Метод предполагает наличие обменного фонда капитально отремонтированных агрегатов, которыми оперативно заменяют отказавшие агрегаты. Снятые агрегаты направляют на ремонтные предприятия, которыми по возвращению и пополняют обменный фонд. При этом простой автомобиля существенно снижаются, а ремонтным предприятиям, которые превращается в агрегаторе-монтные, обеспечивается загрузка.

---

<sup>2</sup> СТБ 928-2004, ВУ. Автомобили, их составные части, сдаваемые в капитальный ремонт. Общие технические требования и правила приемки. – Минск: Госстандарт, 2004. – 10 с.

<sup>3</sup> СТБ 929-2004, ВУ. Автомобили, их составные части, выпускаемые из капитального ремонта. Общие технические требования. – Минск: Госстандарт, 2009. – 23 с.

<sup>4</sup> СТБ 930-2004. Автомобили, их составные части, сдаваемые в капитальный ремонт и выпускаемые из капитального ремонта. Комплектность. – Минск: Госстандарт, 2004. – 10 с.

<sup>5</sup> ТКП 248-2010 (02190). Техническое обслуживание и ремонт автомобильных транспортных средств. Нормы и правила проведения – Минск: М-во транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь; Белорус. науч.-исслед. ин-т транспорта «Транстехника», 2012. – 42 с.

С некоторых пор нормативные документы Беларуси исключили средний ремонт из системы содержания парка автомобилей в исправном состоянии. Потребность в среднем ремонте, выполняемом на эксплуатационном предприятии и восстанавливающем частично ресурс агрегата, возникает тогда, когда ограниченная номенклатура деталей требует замены новыми или восстановленными изделиями.

Средние ресурсы деталей двигателей в долях ресурса их базовых деталей (блоков цилиндров), определенные опытным путем, приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Относительные средние ресурсы деталей двигателей

Названия деталей	Средние ресурсы в долях ресурса базовой детали
Блок цилиндров	1,00
Головка цилиндров	1,00
Поршневой палец	0,90–1,00
Распределительный вал	0,84–1,00
Шатун	0,60–0,65
Гильза цилиндра	0,66–0,91
Коленчатый вал	0,62–0,69
Клапаны	0,61–0,92
Поршень	0,57–0,65
Вкладыши шатунные	0,44–0,52
Кольца маслосъемные	0,43–0,48
Кольца компрессионные	0,41–0,45
Вкладыши коренные	0,38–0,48

Большая долговечность базовых (корпусных) деталей, превышающая даже амортизационную наработку самого агрегата, обусловлена отсутствием в них трущихся элементов, большой статической прочностью и жесткостью. Долговечность трущихся деталей значительно ниже долговечности корпусных деталей, что обуславливает их замену при использовании агрегата. Ряд недолговечных деталей (вкладыши коленчатого вала, поршневые кольца, поршни, уплотнения и др.) требуют более частой замены. Эти сведения позволяют обосновать номенклатуру деталей, заменяемых при различной наработке двигателей, и определить вид ремонта. При текущем ремонте заменяют наиболее изнашиваемые недолговечные детали, которыми являются поршневые кольца и вкладыши коренные и шатунные коленчатого вала. Средний ремонт агрегата предполагает замену деталей, ресурс которых составляет примерно половину от ресурса базовой детали.

Технико-экономический критерий выбора способа восстановления детали традиционно учитывает соотношение стоимости восстановленной детали, цены одноименной новой детали и их долговечностей [2]:

$$C_v \leq k_d C_n,$$

где  $C_v$  – стоимость восстановленной детали;  $C_n$  – цена новой детали;  $k_d = D_v/D_n$  – коэффициент долговечности;  $D_v$  и  $D_n$  – долговечность восстановленной и новой деталей.

Однако приведенное выражение должно быть дополнено ограничением кратности наработки восстановленных деталей межремонтному пробегу агрегата за счет использования технических решений, уравнивающих наработку деталей повышением их износостойкости. Современное состояние науки и практики позволяет обеспечить приведенное ограничение. Действительно, нанесение покрытий при восстановлении трущихся поверхностей деталей с насыщением их материала необходимыми легирующими элементами подобно химико-термической обработке поверхностных слоев связано с образованием материала нового химического, структурного и фазового состава, отличного от материала основы. Насыщение поверхностных слоев, например, углеродом, азотом, бором или их сочетаниями с последующими закалкой и отпуском, приводит к образованию упрочняющей фазы [3]. Но необходимо предварительно согласовать состав исходного материала покрытий с требуемым фазовым составом образуемого покрытия. Физико-техническая обработка в виде лазерной и электронно-лучевой обработки способствует формированию такого материала. Образуется гетерогенная структура материала (типа Г. Шарпи), состоящая из твердых зерен карбидов, нитридов или других соединений, равномерно распределенных в упругопластической стальной матрице. При этом поверхностные слои трущихся материалов должны обладать меньшей прочностью, чем нижележащие слои (правило положительного градиента) и не наклепываться при трении. Упрочнение трущихся поверхностей с нанесением приработочных покрытий обеспечивает наработку до предельного состояния, превышающую соответствующую наработку деталей, изготовленных на автомобильных заводах.

Исходя из соотношения стоимости ремонта и послеремонтной наработки агрегатов с использованием новых и восстановленных деталей предлагается ремонтный цикл в двух видах с использованием среднего ремонта агрегата:

– без капитального ремонта агрегата

$$BЭ - TP \dots TP - CP - TP \dots TP - Cp;$$

– с капитальным ремонтом агрегата

ВЭ – ТР ... ТР – СР – ТР ... ТР – КР – ТР ... ТР – СР – ТР ... ТР – Сп,

где ВЭ – ввод в эксплуатацию; ТР – текущий ремонт по результатам диагностирования при ТО; СР – средний ремонт; КР – капитальный ремонт; Сп – списание.

Капитальный ремонт агрегатов исключают из ремонтного цикла в том случае, когда он охватывает ряд лет, в течение которых автомобили данной марки морально устаревают. Предложенный ремонтный цикл предполагает ограничение числа восстановлений деталей и соответственно трудоемких ремонтов. Восстановительное покрытие на отдельную поверхность детали наносится один раз.

Средний ремонт агрегатов, частично восстанавливающий ресурс агрегата, следует вернуть в систему ТО и ремонта. Для этого предлагается использовать специально подготовленный в условиях авторемонтного предприятия ремонтный комплект заменяемых деталей (таблица 2). Часть деталей комплекта составляют приобретенные запасные части, вторую его часть изготавливают на ремонтном предприятии, а оставшуюся часть – восстанавливают.

Таблица 2. – Состав ремонтного комплекта деталей бензинового двухрядного восьмицилиндрового двигателя

Деталь (количество в комплекте)	Источник комплектования
Гильза цилиндра (8)	Растачивание и хонингование под ремонтный размер. Изготовление из отливки обработкой резанием
Прокладка гильзы цилиндра (24)	Изготовление штамповкой
Прокладка крышки распределительных шестерен (1)	
Стопорное кольцо (16)	
Прокладка головки цилиндров (1)	Приобретение
Комплект поршневых колец (1)	
Комплект вкладышей шатуна (1)	
Комплект вкладышей коренных подшипников (1)	
Набивка сальника (2)	Шлифование юбки, восстановление канавок под кольца, развертывание отверстия под поршневой палец. Изготовление из отливки обработкой резанием с нанесением прирабочного покрытия
Поршень (8)	
Поршневой палец (8)	Хромирование или термопластическая раздача, шлифование
Шатун в сборе (8)	Железнение поверхности в нижней головке, хонингование, замена втулки верней головки, растачивание
Коленчатый вал (1)	Шлифование и полирование шеек под ремонтные размеры. Напыление или наплавка шеек, их шлифование под номинальный размер и полирование
Выпускной клапан (8)	Железнение стержня, наплавка фаски, шлифование
Уплотнительная прокладка заднего сальника (2)	Изготовление детали из «сырой» резины вулканизацией в прессформе
Маслоотражательный колпачок впускного клапана (8)	
Уплотнительная прокладка клапанной крышки (1)	
Задняя прокладка впускной трубы (1)	
Боковая прокладка впускной трубы (2)	
Передняя прокладка впускной трубы (1)	

Состав ремонтного комплекта для других агрегатов и систем автомобилей назначают на базе сопоставления долговечности их элементов и стремления уравнивать между собой значения этих показателей.

Практическое использование предложенного ремонтного цикла агрегатов позволяет более полно использовать остаточную долговечность деталей с достижением нормативной послеремонтной наработки агрегатов при уменьшении стоимости ремонта.

Послеремонтная наработка отремонтированных агрегатов определяется техническим уровнем авторемонтного предприятия. Наибольшее влияние на эту наработку оказывают начальные зазоры в трущихся соединениях, определяемые размерами соответствующих деталей, а наименьшее – параметры формы и расположения рабочих поверхностей. Наблюдается непрерывное уменьшение ресурса агрегатов при отклонении в худшую сторону параметров от их нормативных значений. Утверждения, приводимые в ряде исследований о том, что существуют оптимальные значения структурных параметров, превышающие значения параметров, установленных заводами-изготовителями, не подтверждаются практикой.

Таким образом, геометрические параметры восстановленных деталей не должны уступать соответствующим параметрам новых деталей, установленных заводами-изготовителями. Технический уровень участков восстановления деталей после реконструкции или технического перевооружения должен обеспечить неукоснительное выполнение нормативных значений геометрических параметров восстанавливаемых деталей в пределах

требований завода-изготовителя. Авторемонтное предприятие такого технического уровня способно вместе с восстановлением деталей и изготавливать детали (гильзы цилиндров, седла клапанов, поршни, коленчатые и распределительные валы, маховики, венцы маховиков и др.) для поставки их в виде запасных частей на рынок.

**Заключение.** Обоснована структура ремонтного цикла автомобильных агрегатов с ограничением числа трудоемких ремонтов и нанесения покрытий. Требуется возвращение среднего ремонта в систему ТО и ремонта с использованием комплекта деталей, подготовленного авторемонтным предприятием. Средний ремонт призван наиболее полно реализовать долговечность составных частей агрегата с достижением максимальной экономической эффективности ремонта.

Технический уровень авторемонтных предприятий должен быть доведен до уровня автомобилестроения использованием современных средств и процессов ремонта из расчета обеспечения геометрических параметров восстановленных деталей, не уступающих соответствующим параметрам новых деталей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технология авторемонтного производства / А.И. Асриянц, Ф.П. Верещак, А.М. Кац и др.; под ред. К.Т. Кошкина. – М.: Транспорт, 1969. – 568 с.
2. Шадричев В.А. Основы технологии автостроения и ремонт автомобилей. – Л.: Машиностроение (Ленинград. отделение), 1976. – 560 с.
3. Иванов В.П., Кастрюк А.П. Влияние качества ремонта двигателей на их долговечность // Вестник государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2012. – № 3. – С. 30–34.

Поступила 02.01.2026

#### IMPROVEMENT OF THE REPAIR CYCLE OF AUTOMOBILE UNITS

V. IVANOV, T. VIGERINA, L. MIRZATAYEV  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*Analysis of the existing system of technical maintenance and repair of automobiles did not confirm its high efficiency. The structure of the repair cycle of automobile units is proposed with a limitation of the number of labor-intensive repairs and the return of average repairs to the system of technical maintenance and repair of automobiles using a set of replaceable parts prepared by the auto repair enterprise. The purpose of average repair of units is determined, ensuring a more complete use of the durability of the component parts of the units. Requirements are given for the technical level of auto repair enterprises based on ensuring the geometric parameters of the restored parts, not inferior to the corresponding parameters of new parts.*

**Keywords:** *car repair, types of repair, repair production, repair kit of parts.*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АГРЕГАТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОБСЛЕДОВАНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

*д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ, В.А. ЗЕНЬКОВ*

*(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

*Рассмотрено определение технического состояния наиболее сложного автомобильного агрегата (двигателя) по результатам наблюдения за износом кулачков распределительного вала, который находится в поле зрения диагноста без разборки агрегата. Этот показатель является, с одной стороны, и структурным, и диагностическими параметром, с другой – обладает тесной корреляционной связью с наработкой агрегата. Подчеркнута важность восстановления кулачков распределительного вала путем нанесения покрытия на всю рабочую поверхность с последующим копирным шлифованием профиля, обеспечивающим геометрические параметры, установленные заводом-изготовителем. Эта особенность влияет в эксплуатации на мощность, развиваемую двигателем, и расход топлива.*

**Ключевые слова:** диагностирование, агрегат, автомобильный двигатель, параметр, статистическое распределение.

**Введение.** Диагностирование технического объекта заключается в безразборном определении его технического состояния путем измерения диагностических параметров и сопоставления их значений с допустимыми или предельными с целью поиска неисправностей, установления остаточного ресурса и объема ремонтных работ. Техническое состояние агрегата непосредственно характеризуют изменяющиеся при его использовании структурные параметры (размеры элементов деталей, зазоры или натяги в соединениях деталей и др.), однако определить их без разборки агрегата, как правило, не представляется возможным. В практике для целей диагностирования применяют диагностические параметры (температуру, расход и давление сред, значения перемещений деталей, амплитуду и частоту вибраций стенок корпусных деталей и др.), которые функционально связаны со структурными параметрами, но характеризуют техническое состояние объекта косвенно. Связи между структурными и диагностическими параметрами оценивают значимостью соответствующих коэффициентов корреляции. Некоторые диагностические параметры, например, виброакустические, также измерить затруднительно, а их интерпретация требует высокой квалификации диагноста.

Все детали и соединения агрегата работают и изнашиваются одновременно, но с различной интенсивностью, что позволяет по результатам наблюдения за параметрами отдельных деталей или соединений принимать решения о техническом состоянии всего агрегата. Так, выявлена тесная корреляционная связь между износами отдельных деталей агрегатов и изменениями зазоров в основных соединениях [1]. Проведение диагностирования по результатам исследования параметров отдельных основных деталей агрегата вызвано необходимостью уменьшить трудоемкость и сложность работ и повысить объективность прогноза.

**Цель работы:** уменьшение трудоемкости диагностирования автомобильных агрегатов на примере двигателей с повышением достоверности прогноза.

**Оборудование, приборы и методы.** В качестве объекта исследования рассматривались наиболее сложные автомобильные агрегаты – бензиновые и дизельные двигатели, по результатам обследования кулачков распределительных валов.

Диаметры опорных шеек распределительных валов, цилиндрической части кулачков и разность их размеров ( $A - B$ ) определяли с помощью микрометра МР 25–50<sup>1</sup>. Несоосность опорных шеек измеряли на индикаторном стенде 1К4–025. Средства измерений выбирали по методу безошибочности контроля [2], сопоставляя между собой номинальные размеры элементов деталей, их допуски и погрешности измерений. Допускаемые погрешности измерений при приемочном контроле элементов деталей с линейными размерами до 500 мм устанавливает ГОСТ 8.051-81<sup>2</sup>. Эти погрешности приняты равными 20–35% от допуска на соответствующие размеры детали. Минимальное число измерений  $n_{\min}$  (объем выборки) определяли по формуле<sup>3</sup>

$$n_{\min} = \frac{\sigma^2 t_{\beta}^2}{\varepsilon^2},$$

где  $\sigma^2$  – статистическая оценка дисперсии случайной величины;  $t_{\beta}$  – табличный (табулированный коэффициент, зависящий от заданной (доверительной) вероятности  $\beta$ , принятой 95%;  $\varepsilon$  – доверительный интервал значений, который покрывает неизвестный параметр.

<sup>1</sup> ГОСТ 4381-87. Микрометры рычажные. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 15 с

<sup>2</sup> ГОСТ 8.051-81. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 12 с.

<sup>3</sup> ГОСТ 17510-79. Надежность в технике. Система сбора и обработки информации. Планирование наблюдений. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 25 с.

Расчет объемов исследовательских выборок приведен в таблице 1. Сведения об измерениях элементов деталей изображались в виде эмпирических полигонов распределений, к каждому из которых подбирался один из наиболее подходящих теоретических законов распределения из числа: нормального, Вейбулла, показательного, Релея и гамма-распределения [1]. Соответствие теоретических распределений данным экспериментов определяли с помощью критерия Пирсона  $\chi^2$ .

Таблица 1. – Сведения для определения объемов выборок распределительных валов для исследования их технического состояния

Параметры	Двигатель ЗМЗ-53				Двигатель Д-240			
	$\varepsilon$	$\sigma^2$	Объем выборки		$\varepsilon$	$\sigma^2$	Объем выборки	
			$n_{min}$	принятый			$n_{min}$	принятый
Диаметр опорных шеек	0,01	0,00125	48	84	0,01	0,00054	21	62
Несоосность опорных шеек	0,01	0,00057	21	164	–	–	–	–
Диаметр цилиндрической части кулачков	0,01	0,00166	64	65	0,01	0,00045	17	62
Разность размеров А и В кулачков	0,01	0,00141	54	86	0,01	0,00138	53	80

Мощность  $N$ , развиваемую двигателем, рассчитывали с использованием показаний силомера и тахометра обкаточно-тормозного стенда КИ-2139Б по формуле

$$N = 10^{-3} Pn, \text{ л.с.}, \tag{1}$$

где  $P$  – реактивное усилие на статоре электромашины, фиксируемое силомером стенда на плече длиной 0,7162 м, кгс;  $n$  – частота вращения коленчатого вала, мин<sup>-1</sup>.

Обкаточно-тормозной стенд оснащен устройством для измерения удельного эффективного расхода топлива  $g$ , который определяли как

$$g = m / Nt, \text{ г/эф. л.с.}\cdot\text{ч}, \tag{2}$$

где  $m$  – масса порции расходуемого топлива, г;  $t$  – время сжигания порции топлива, ч.

**Основная часть.** Для некоторых деталей, в частности, находящихся в поле зрения без разборки агрегатов, структурные параметры совпадают с диагностическими. В этом случае техническое состояние агрегата может быть оценено по результатам обследования этих деталей. К таким деталям относят распределительные валы двигателей.

Распределительный вал – сравнительно долговечная деталь автомобильного двигателя. Она не бывает источником рекламационных отказов в гарантийный период эксплуатации, ее не заменяют в эксплуатации, а восстанавливают при капитальном ремонте двигателя. Доля годных распределительных валов при поступлении двигателей в капитальный ремонт составляет около 50%. Техническое состояние этой детали существенно влияет на технико-экономические показатели двигателя – мощность и расход топлива.

Результаты статистического анализа технического состояния распределительных валов приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Результаты статистического анализа технического состояния распределительных валов двигателей

Параметры	Двигатель ЗМЗ-53				Двигатель Д-240			
	Законы распределения параметров в дифференциальном и интегральном выражениях, доли годных деталей	Критерий $\chi^2$		Законы распределения параметров в дифференциальном и интегральном выражениях, доли годных деталей	Критерий $\chi^2$			
		расчетный	табличный		расчетный	табличный		
1	2	3	4	5	6	7		
Износ $\Delta x$ опорных шеек	Вейбулла (рисунок 1, а) $f(\Delta x) := 25,936 \exp \left[ - \left( \frac{\Delta x}{0,063} \right)^{1,634} \right] \left( \frac{\Delta x}{0,063} \right)^0$ $F(\Delta x) := 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\Delta x}{0,063} \right)^{1,634} \right];$ $F(0,03) = 0,258$	1,128	3,84	Вейбулла (рисунок 1, б) $f(\Delta x) := 39,351 \exp \left[ - \left( \frac{\Delta x}{0,042} \right)^{1,653} \right] \left( \frac{\Delta x}{0,042} \right)^0$ $F(\Delta x) := 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\Delta x}{0,042} \right)^{1,653} \right];$ $F(0,03) = 0,436$	0,102	3,84		
Несоосность $\Delta a$ опорных шеек	Вейбулла (рисунок 2) $f(\Delta a) := 38,667 \exp \left[ - \left( \frac{\Delta a}{0,054} \right)^{2,088} \right] \left( \frac{\Delta a}{0,054} \right)^1$ $F(\Delta a) := 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\Delta a}{0,054} \right)^{2,088} \right];$ $F(0,02) = 0,118$	8,410	12,60	–	–	–		

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7
Отклонение $\Delta x$ цилиндрической части кулачков от номинального значения	Вейбулла (рисунок 3, а) $f(\Delta x) := 6,568 \exp \left[ - \left( \frac{\Delta x}{0,285} \right)^{1,674} \right] \left( \frac{\Delta x}{0,285} \right)^{0,4}$ $F(\Delta x) := 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\Delta x}{0,285} \right)^{1,674} \right];$ $F(0,30) = 0,664$	3,139	7,81	показательный (рисунок 3, б) $f(\Delta x) := 8,290 e^{-8,290 \Delta x}$ $F(\Delta x) := 1 - e^{-8,290 \Delta x};$ $F(0,40) = 0,964$	1,23	5,99
Разность размеров (А – В) выпускных кулачков	Вейбулла (рисунок 4, а) $f(A-B) := 5,093 \exp \left[ - \left( \frac{A-B}{0,352} \right)^{1,793} \right] \left( \frac{A-B}{0,352} \right)^{0,793}$ $F(A-B) := 1 - \exp \left[ - \left( \frac{A-B}{0,352} \right)^{1,793} \right];$ $F(0,30) = 0,528$	3,056	9,49	Вейбулла (рисунок 4 б) $f(A-B) := 2,463 \exp \left[ - \left( \frac{A-B}{0,705} \right)^{1,737} \right] \left( \frac{A-B}{0,705} \right)^{0,737}$ $F(A-B) := 1 - \exp \left[ - \left( \frac{A-B}{0,705} \right)^{1,737} \right]$ $F(0,50) = 0,423$	6,172	7,83
Разность размеров (А – В) впускных кулачков	Вейбулла (рисунок 5) $f(A-B) := 4,039 \exp \left[ - \left( \frac{A-B}{0,303} \right)^{1,224} \right] \left( \frac{A-B}{0,303} \right)^{0,224}$ $F(A-B) := 1 - \exp \left[ - \left( \frac{A-B}{0,303} \right)^{1,224} \right];$ $F(0,30) = 0,628$	2,160	5,99			

Наблюдается более равномерный и меньший по значению износ опорных шеек, связанный линейной зависимостью с зазором в соединении шейки–втулка (рисунок 1) по сравнению с износом шеек коленчатых валов [3]. Радиальное биение поверхности средней опорной шейки вала относительно поверхностей крайних шеек показано на рисунке 2. Шейки и кулачки распределительных валов дизельных двигателей шлифуют реже, чем одноименные элементы бензиновых двигателей.

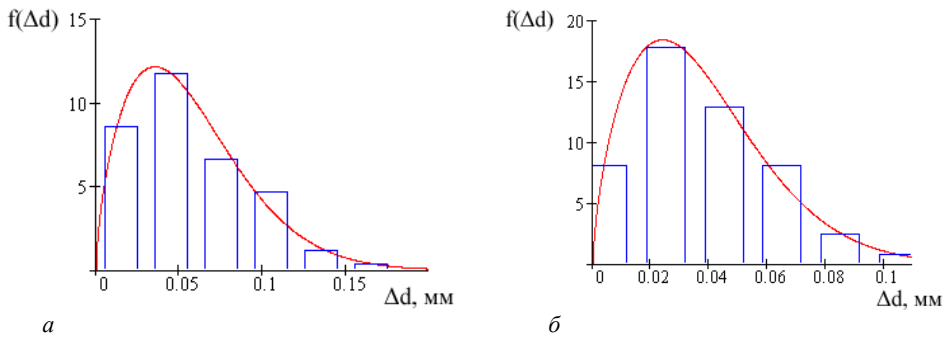


Рисунок 1. – Полигон и плотность вероятности распределения  $f(\Delta d)$  распределительных валов двигателей ЗМЗ-53 (а) и Д-240 (б) по максимальному износу  $\Delta d$  опорных шеек

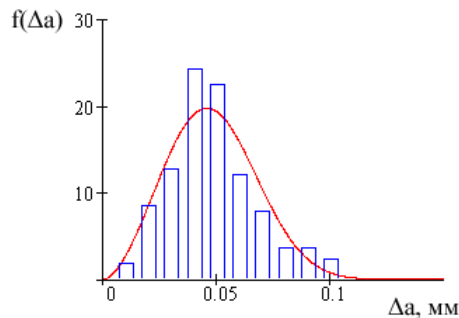
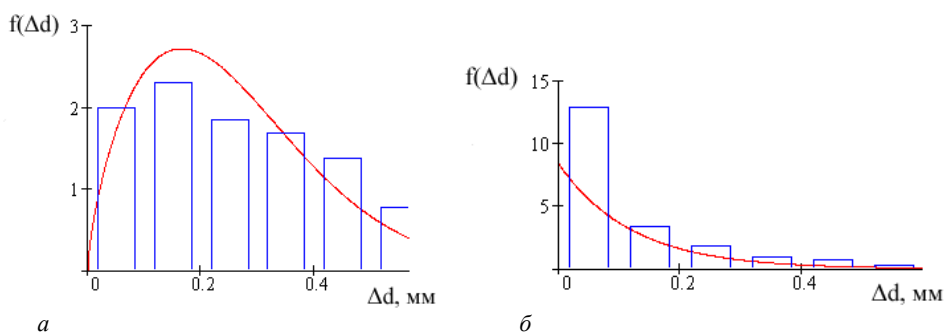
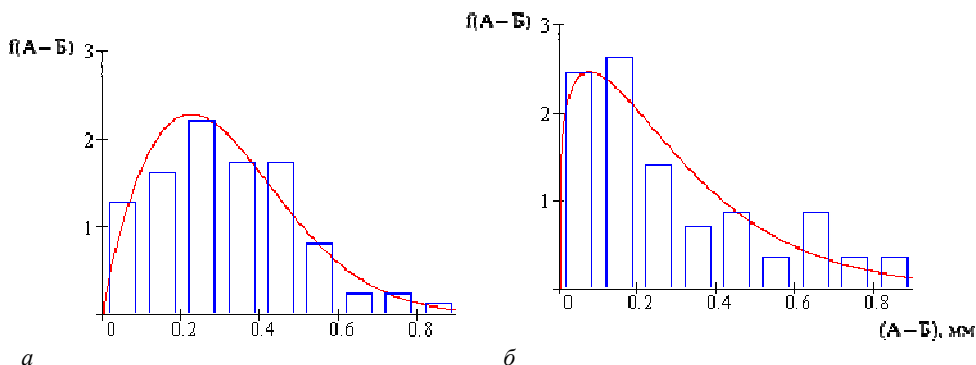


Рисунок 2. – Полигон и плотность вероятности распределения  $f(\Delta a)$  распределительных валов двигателей ЗМЗ-53 по отклонению от соосности  $\Delta a$  средней опорной шейки относительно крайних опорных шеек

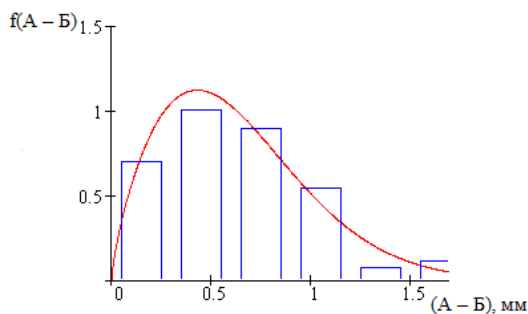
Диаметр цилиндрической части кулачков и разность размеров  $(A - B) = h$  у двигателя с расположением распределительного вала в головке цилиндров легко определить без разборки двигателя (здесь  $A$  – наибольший размер кулачка,  $B$  – диаметр цилиндрической части кулачка,  $h$  – высота подъема клапана). У двигателей с расположением распределительного вала в блоке цилиндров размер  $(A - B)$  определяют измерением длины перемещения толкателя  $h$  с помощью индикаторного прибора. Значимой разницы между износами впускных и выпускных кулачков нет. Кулачки практически не изнашиваются по цилиндрической части, где трение незначительно по причине того, что при закрытом клапане усилие от сжатой клапанной пружины на кулачок не передается. Изменение размеров указанных элементов обусловлено копирным шлифованием кулачков при восстановлении валов (рисунке 3). Наблюдается значительный износ вершин кулачков (до 0,75 мм для двигателей ЗМЗ-53, рисунок 4; и до 1,0 мм для двигателей Д-240, рисунок 5). Это явление объясняется тем, что при работе двигателя на вершину кулачка, имеющую минимальный радиус кривизны профиля, приходится максимальное радиальное усилие до отказа сжатой пружины клапана, а условия смазывания в этом случае самые неблагоприятные.



**Рисунок 3. – Полигон и плотность вероятности распределения  $f(\Delta d)$  распределительных валов двигателей ЗМЗ-53 (а) и Д-240 (б) по отклонению  $\Delta d$  диаметра цилиндрической части кулачков от номинального значения**



**Рисунок 4. – Полигон и плотность вероятности распределения  $f(A - B)$  распределительных валов двигателей ЗМЗ-53 по разности размеров  $(A - B)$  выпускных (а) и впускных (б) кулачков**



**Рисунок 5. – Полигон и плотность вероятности распределения  $f(A - B)$  распределительных валов двигателей Д-240 по разности размеров «А – В» кулачков**

Таким образом, вершины кулачков распределительного вала – наиболее изнашиваемые элементы детали, а параметр  $(A - B)$  из всех параметров вала, одновременно являясь как диагностическим, так и структурным параметром, – самый изменчивый. Если считать, что в течение срока службы агрегата уменьшение параметра  $(A - B)$  пропорционально наработке агрегата до предельного состояния, то по значению этого уменьшения легко вычисляются остаточный ресурс агрегата и значение наработки, при которых двигатель необходимо направить в капитальный ремонт или списать.

При изучении технического состояния двигателя УМЗ-451М был проведен следующий эксперимент. На двигатель последовательно установили распределительные валы: новый и вал с кулачками, которые были подвергнуты копирному шлифованию на станке 3М433 с получением размеров цилиндрической части кулачков на 1 мм меньше номинальных. При этом были выдержаны нормативная разница размеров кулачков  $(A - B)$  и их профилей, тем самым и высота подъема клапанов. При работе двигателей под нагрузкой на обкаточно-тормозном стенде КИ-2139Б для каждого случая измерялись развиваемая двигателем мощность (формула (1)) и удельный расход топлива (формула (2)) при частоте вращения коленчатого вала  $2500 \text{ мин}^{-1}$ . При новой детали и детали со шлифованными кулачками показания силомера стенда составляли 23 и 19,5 кгс, соответственно, т.е. двигатель развивал в каждом случае мощность 57,5 и 47,5 л.с., а время сжигания навески топлива массой 300 г составляло 72 и 70 с, т.е. удельный эффективный расход топлива равнялся 261 и 324 г/эф. л.с.ч. Таким образом, уменьшение развиваемой максимальной мощности двигателем при использовании вала со шлифованными кулачками составило 17%, а увеличение удельного расхода топлива – 24%. Результат объясняется недопустимым уменьшением параметра «время–сечение» подъема клапанов [4]. Полученные данные подчеркивают сохранение технико-экономических показателей работы двигателя в эксплуатации за счет восстановления кулачков распределительного вала нанесением покрытия на всю поверхность кулачков, например, газопорошковым напылением, а не просто обработкой их эквидистантным шлифованием, как это делается на большинстве предприятий.

**Заключение.** Обоснована возможность определения технического состояния агрегата по результатам наблюдения за изменением параметров отдельных, наиболее изнашиваемых, деталей, которые находятся в поле зрения диагноста без разборки агрегата. Эти параметры, с одной стороны, должны являться одновременно как структурными, так и диагностическими, с другой – обладать тесной корреляционной связью с наработкой агрегата. Установлена важность восстановления кулачков распределительного вала путем нанесения покрытия на всю рабочую поверхность с последующим копирным шлифованием, обеспечивающим геометрические параметры, установленные заводом-изготовителем. Это существенно влияет в эксплуатации на мощность, развиваемую двигателем, и на расход топлива.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гурвич И.Б., Сыркин П.Э. Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей. – М.: Транспорт, 1984. – 141 с.
2. Точность и производственный контроль в машиностроении: Справочник / И.И. Болонкина, А.К. Кутай, Б.М. Сорочкин и др.; под общ. ред. А.К. Кутая, Б.М. Сорочкина. – Л.: Машиностроение, 1983. – 368 с.
3. Кастрюк А.П. Техническое состояние деталей ремонтного фонда двигателей // Инновационные технологии в машиностроении: материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 35-летию машиностроит. фак. ПГУ / Новополоцк (19–20 окт. 2011 г.) / Полоц. гос. ун-т; под общ. ред. А.И. Гордиенко, В.К. Шелега. – Новополоцк, 2011. – С. 39–42.
4. Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов: учеб. – Челябинск: Изд. ЮжУрГУ. – 2005. – 403 с.

Поступила 05.01.2026

#### DETERMINING THE TECHNICAL CONDITION OF UNITS BASED ON THE RESULTS OF INSPECTION OF INDIVIDUAL PARTS

V. IVANOV, V. ZENKOV  
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

*This paper examines the determination of the technical condition of the most complex automotive unit (engine) based on the results of monitoring camshaft cam wear, which is visible to the diagnostician without disassembling the unit or where removal of the camshaft is possible with minimal effort. This parameter, on the one hand, serves both structural and diagnostic purposes, and, on the other, is closely correlated with the unit's operating life. The importance of restoring the camshaft cams by applying a coating over the entire working surface followed by copy grinding, ensuring the geometric parameters specified by the manufacturer, is also established. This feature affects the engine's power output and fuel consumption during operation.*

**Keywords:** diagnostics, unit, automotive engine, parameter, statistical distribution.

УДК 620.184.4(623.43.038)

DOI 10.52928/2070-1616-2026-53-1-51-55

**ТЕХНОЛОГИИ ЗАВАРКИ ДЕФЕКТОВ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ЧУГУНА****канд. техн. наук, доц. В.А. ФРУЦКИЙ, канд. техн. наук, доц. О.П. ШТЕМПЕЛЬ,  
И.И. ПИЛИПЁНОК****(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)**

Представлена комплексная методика восстановления корпусных деталей двигателей внутреннего сгорания (ДВС), учитывающая особенности их эксплуатационного разрушения. Разработана классификация дефектов по зонам локализации, предложена дифференцированная технология ремонта для различных типов повреждений. Экспериментально подтверждена эффективность комбинированного подхода, сочетающего механическую обработку, термодиффузионное насыщение и контролируемую сварку, обеспечивающего восстановление эксплуатационных характеристик до 92–95% от первоначальных значений.

Также рассмотрены современные методы ремонта чугунных корпусных деталей ДВС. Проведен сравнительный анализ различных технологий заварки, включая газовую, дуговую и холодную сварку. Предложена оптимизированная методика ремонта с предварительным подогревом и последующей термообработкой, обеспечивающая прочность соединения до 95% от исходного материала.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, корпусные детали, ремонт-восстановление, дефектоскопия, термомеханическая обработка, ресурсосберегающие технологии.

**Введение.** Чугунные корпусные детали двигателей (блоки цилиндров, головки блоков, картеры) в процессе эксплуатации подвергаются комплексному воздействию термических, механических и коррозионных нагрузок. Статистика отказов показывает, что до 65% повреждений составляют трещины различной природы:

- термические трещины (35–40%);
- усталостные разрушения (25–30%);
- коррозионно-механические повреждения (15–20%).

Актуальность совершенствования методов ремонта обусловлена тремя ключевыми факторами:

- экономическим – стоимость восстановления в 2,5–3 раза ниже замены детали;
- экологическим – сокращение металлоотходов на 25–30%;
- технологическим – дефицит качественных заготовок на рынке.

**Цель работы:** разработка технологии ремонта блока цилиндров, головки блока цилиндров, картеров двигателей, выполненных из литейного чугуна. В рамках этого: разработка технологии восстановления исходных технико-эксплуатационных характеристик различных зон корпуса блока цилиндров.

**Анализ исследований.** Специфика ремонта чугунных деталей связана с особенностями материала.

К ним относятся:

- 1) неоднородность химического состава;
- 2) низкая пластичность;
- 3) склонность к образованию горячих трещин.

При этом нельзя забывать и о основных проблемах при заварке чугунных изделий:

- образование хрупких фаз в зоне термического влияния;
- высокие остаточные напряжения;
- непредсказуемое поведение графитовых включений.

Проанализируем основные применяемые методы заварки повреждений [1]:

1. Горячая сварка с подогревом.

Режимы термической обработки:

- предварительный подогрев: в диапазоне температур 600–650 °С (оптимально 620±10 °С) [2]. При скорости нагрева 100–150 °С/ч наблюдается равномерность прогрева ±15 °С по объему детали при сложной пространственной конфигурации.

После проведения основных технологических операций, связанных со сваркой, рекомендуется [3] постепенное охлаждение всего изделия со скоростью менее 30 °С/ч до 300 °С при охлаждении в песке до полного охлаждения за 18–24 ч. При процессе применяются электроды из графитизированного чугуна (ЦЧ-4) либо на медно-никелевой основе (ОЗЧ-3).

При такой технологии отмечается минимизация термических напряжений при коэффициенте термических деформаций 0,05–0,08 мм/м и вероятности коробления менее 3%.

При этом механические характеристики:

- предел прочности: 290–320 МПа (85–95% от основного металла);
- относительное удлинение: 1,8–2,5%;
- ударная вязкость: 35–45 Дж/см<sup>2</sup>.

В зонах сварки и термического влияния (ЗТВ) наблюдается равномерное распределение графита по объему, отсутствует Видманштеттова структура, а размер зерна в ЗТВ в пределах 25–40 мкм, что хорошо коррелирует со структурой основного материала.

Могут возникнуть следующие дефекты:

- сквозные трещины длиной >50 мм;
- повреждения в зонах высоких нагрузок;
- дефекты в местах крепления ответственных узлов.

2. Холодная сварка – второй по применяемости технологический прием. В качестве доноров используют никелевые (типа ОЗЧ-2), ферроникелевые (типа МНЧ-1) и медно-никелевые (типа МНЧ-3) электроды, имеющие как высокую стоимость, так и некоторые особенности [4]:

- не требует предварительного подогрева;
- прочность соединения 70–80%;
- возможность выполнения ремонта без демонтажа;
- позволяют работать с тонкостенными и термочувствительными деталями;
- снижает риск деформации и термических напряжений.

Прочность соединения не будет гарантирована для высоконагруженных конструкций. Для обеспечения необходимых параметров может потребоваться дополнительное усиление (наплавка, армирование). Структурно-фазовый состав полученных участков отличается разнообразием:

– при применении никелевых электродов (ОЗЧ-2) в качестве основной фазы выступает аустенит ( $\gamma$ -Fe с растворенным Ni). Микроструктура мелкозернистая, с небольшим количеством карбидов. Наблюдается высокая пластичность и ударная вязкость;

– при применении ферроникелевых электродов (МНЧ-1) в качестве основной фазы выступает аустенитно-ферритная структура ( $\gamma + \alpha$ ) с возможными дисперсными карбидами (*Cr*, *Fe*). Наблюдаются хорошая прочность и износостойкость;

– при применении медно-никелевых электродов (МНЧ-3) основной фазой выступает твердый раствор *Cu-Ni* ( $\alpha$ -фаза) с выделением интерметаллидов (*Ni<sub>3</sub>Al*, *Ni<sub>3</sub>Ti*).

Таким образом, очевидные преимущества холодной сварки:

- минимальные термические деформации;
- отсутствие перегрева, что снижает риск коробления и изменения геометрии детали;
- возможность использования для тонкостенных и термочувствительных материалов;
- возможность работы без демонтажа;
- ремонт крупногабаритных узлов (например, станин станков, корпусов насосов);
- хорошая обрабатываемость после наплавки;
- структура мелкозернистая, без крупных хрупких фаз.

Однако можно отметить и ряд ограничений:

– не подходит для высоконагруженных динамических нагрузок (усталостная прочность ниже, чем у основного металла);

– требуется тщательная подготовка поверхности (очистка от масел, окислов).

3. В последнее время для повышения качества и надежности наплавки применяется усовершенствованная методика, сочетающая локальный подогрев, контролируемую сварку и термообработку. Эта технология особенно эффективна при ремонте ответственных деталей из чугуна, высокоуглеродистых и легированных сталей [5]:

1) локальный индукционный подогрев до 300–350 °С, проводимый с целью снизить термические напряжения и предотвратить образование трещин, вместе с тем уменьшает градиент температур между наплавкой и основным металлом и повышает пластичность зоны термического влияния, что особенно важно для чугуна (снижает риск отбеливания и трещин);

2) заварку никелевым электродом (ОЗЧ-2, МНЧ-1, МНЧ-3) с контролем температуры, что позволяет предотвратить перегрев и рост зерна, а также снизить окисление и пористость. При этом никелевые электроды должны обеспечивать хорошую адгезию к основному металлу, а также пластичную аустенитную структуру, устойчивую к растрескиванию;

3) медленное охлаждение в термоизолирующем материале проводится с целью снизить остаточные напряжения для уменьшения риска холодных трещин в чугуне;

4) низкотемпературный отжиг при 550 °С в течение 2 ч проводят с целью снять внутренние напряжения и стабилизировать структуру. При этом наблюдаются полигонизация дислокаций, частичный распад неравновесных фаз, улучшение механических свойств (пластичности).

Основные структурно-фазовые превращения, проходящие при применении данного метода, сводятся к следующему:

- разложение остаточного аустенита, что ведет к повышению пластичности;
- частичный графитизационный отжиг;
- дисперсионное твердение;
- коагуляция карбидов, чреватая повышением ударной вязкости;
- рекристаллизация в зоне ЗТВ;
- сфероидизация карбидов.

Таким образом, применение локального подогрева, контролируемой наплавки и последующего отжига дает более стабильные и однородные структуры по сравнению с классической холодной сваркой.

В целом можно отметить преимущества комбинированного метода, которые заключаются в снижении трещинообразования, улучшении структуры наплавки и возможности ремонта сложных деталей. При применении этого метода исключается отбеливание, сохраняется графитная фаза, что позволяет получать в итоге структуру феррит + графит + аустенитные участки.

При этом существующие технологии включают либо технологию холодной сварки, которая подразумевает участие составов на никелевой основе (не проявляют необходимой стойкости при возникновении детонации), либо применение электросварки (подразумевающий нагрев всего корпуса до высоких температур, влекущих термическую деформацию), что влечет необходимость полного демонтажа, разборки двигателя и помещения корпуса в технологическую печь с соответствующими параметрами рабочей зоны. Все это приводит к дополнительным затратам и не гарантирует качественного ремонта.

**Результаты исследований.** Для проведения исследований воспользовались блоком цилиндров автомобиля ВАЗ. Блок выполнен из серого чугуна марки СЧ-26, обладающего микроструктурой пластинчатого графита с химическим составом<sup>1</sup> (таблица 1).

Таблица 1. – Состав литейного чугуна сплава, %

Углерод (C)	Кремний (Si)	Марганец (Mn)	Сера (S)	Фосфор (P)	Железо (Fe)
3,5–3,7	2–2,4	0,5–0,8	до 0,15	до 0,2	~93

Механические характеристики: твердость НВ 130–241 МПа; линейная усадка 1,1%; предел прочности 150 МПа.

Сравнительные характеристики методов ремонта – таблица 2.

Таблица 2. – Сравнительные характеристики методов ремонта

Параметр	Горячая сварка	Холодная сварка	Комбинированный метод
Предел прочности, МПа	320	250	350
Твердость НВ	210	240	220
Остаточная деформация, мм	0,1	0,3	0,15
Стоимость ремонта	высокая	средняя	средняя

При анализе наиболее перспективным можно считать комбинированный метод ремонта. При этом основная стоимость приходится как на термообработку, так и на материал.

Ставилась задача замены дорогостоящего материала при сохранении физико-эксплуатационных свойств. Было предложено применить материалы из металлоотходов на чугунной основе с добавлением меди и бора. Методы получения и выявленные свойства описаны в работах<sup>2</sup> [6; 7].

Состав и свойства композиционных материалов:

- основа: порошок на основе металлоотходов чугуна (80–85%);
- легирующие добавки:
  - медь (10–12%) – улучшает теплопроводность и пластичность;
  - бор (3–5%) – способствует образованию эвтектик, снижая температуру плавления;
  - кремний (1–2%) – раскислитель.

Технология ремонта [8; 9]:

1. Подготовка поверхности (шлифовка, обезжиривание).
2. Нанесение порошковой смеси по шликеру (толщина слоя 1,5–2 мм).
3. Локальный нагрев до 1100–1150 °С.
4. Прогрев в индукционном поле при 850 °С в течение 30 мин для снятия напряжений.

<sup>1</sup> ГОСТ 1412-85. Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 7 с.

<sup>2</sup> Штемпель О.П. Интенсификация диффузионного легирования металлических порошков для защитных покрытий в подвижных порошковых смесях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / О.П. Штемпель; Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2003. – 24 с.

После проведенных испытаний выявлены следующие параметры – таблица 3.

Таблица 3. – Результаты испытаний

Твердость соединения, НВ	230–250
Прочность на сдвиг, МПа	280–300
Пористость, не более%	2–3

Сравним полученные методы (таблица 4).

Таблица 4. – Сравнительная характеристика процессов

Параметр	Комбинированный метод	Порошковая технология
Температура процесса, °С	600–650	1100–1150
Время ремонта, часов	4–6	2–3
Адгезия, от основного металла	0,7–0,8	0,9–0,95
Твердость НВ	200–220	230–250
Предел прочности, МПа	250–350	280–300
Остаточная деформация, мм	0,15	0,05

**Заключение.** Предложенная технология позволяет повысить эффективность ремонта на 35–40% за счет плавления железо-бористых эвтектик, придающих сплаву жидкотекучесть при температурах, на 200–300 °С ниже, чем никелевые сплавы, что снижает себестоимость на 35–40%; обеспечить стабильные характеристики соединения при минимальном нагреве всего изделия и локальном снижении плотности тока за счет узкой полосы нагрева и снижения температуры плавления железо-медно-борных композиций, минимизирующем термические деформации (остаточная деформация 0,05 мм против 0,15 мм у комбинированного метода).

Расширяются возможности ремонта сложнопрофильных деталей, применения самопроизвольного легирования основного металла за счет перераспределения фаз в процессе нанесения и повышенную адгезии (0,9–0,95 от основного металла) из-за активного диффузионного взаимодействия меди с железом.

Введение в материал бора, создающее боридные эвтектики, а также способствующее измельчению структуры шва и зоны термического воздействия, формирует мелкодисперсную структуру, которая может выступать в качестве несущей для восприятия внешних нагрузок. Все это положительно сказывается на эксплуатационных характеристиках изделия в целом.

При этом можно заранее прогнозировать структуру, а следовательно, и свойства материала.

После ремонта формируются следующие фазы:

- основная матрица: феррито-перлитная смесь с включениями графита (от чугуновой основы);
- упрочняющие фазы:
  - бориды ( $Fe_2B$ ) – повышают твердость до 230–250 НВ;
  - медные прослойки – улучшают пластичность и теплопроводность;
- зона сплавления:
  - градиентная структура с плавным переходом от наплавленного слоя к основному металлу;
  - отсутствие хрупких интерметаллидов, благодаря контролируемому зональному охлаждению.

В качестве перспективы развития процесса можно отметить:

- оптимизацию состава порошковых смесей для конкретных материалов и условий эксплуатации;
- разработку специализированных установок для ремонта тонкостенных и труднодоступных элементов головок блоков цилиндров;
- создание технологии ремонта блоков цилиндров старых двигателей без их полного демонтажа;
- повышение прочности на 15–20% по сравнению с холодной сваркой;
- снижение себестоимости ремонта на 35–40% относительно горячей сварки;
- минимизация риска образования трещин.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технология ремонта автомобильных деталей / Современные проблемы и пути развития технического сервиса в АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Минск (24–25 ноября 2022 г.) / редкол.: Л.М. Акулович и др. – Минск: БГАТУ, 2022. – 356 с.
2. Cold Metal Transfer (CMT) Welding of Cast Iron: Microstructure and Mechanical Properties / S. Kumar et al. // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2020. – Vol. 29. – P. 4567–4578. DOI: 10.1007/s11665-020-04958-9
3. Journal of Materials Processing Technology. – 2021. – Vol. 295. – 117152, 117158. – URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-materials-processing-technology/vol/295/suppl/C>.
4. Горяйнов А.А., Иванов В.И. Современные технологии восстановления деталей методом холодной наплавки // Вестник машиностроения. – 2018. – № 5. – С. 45–50. DOI: 10.17212/0042-4633-2018-5-45-50

5. Hybrid Induction Heating and Laser Cladding for Repairing Cast Iron Components / L. Zhang et al. // *Materials Science and Engineering*. – 2019. – 748. – P. 1–15. URL: <https://m.researching.cn/articles/OJa13862d510ac4fe3/referenceandcitations>.
6. Константинов В.М., Фруцкий В.А. Интеллектуальные покрытия из металлоотходов – альтернатива антифрикционным бронзам // *Ремонт, восстановление, модернизация*. – 2002. – № 6. – С. 36–39.
7. Константинов В.М., Фруцкий В.А. Взаимосвязь структуры и свойств антифрикционных газотермических покрытий из боромеденной чугушной стружки // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки*. – 2003. – № 2. – С. 7–11.
8. Смирнов В.П., Козлов А.Д. Композиционные материалы на основе чугунных отходов для ремонта // *Литейное производство*. – 2022. – № 3. – С. 28–33. DOI: 10.12737/2541-8416-2022-3-28-33
9. Штемпель О.П., Конон М.В., Конон И.М. Технология ремонта трещин чугуновой головки блока цилиндров // *Инновационные технологии в машиностроении: электрон. сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. / Новополоцк (21-22 апр. 2020 г.) / Полоц. гос. ун-т; под. ред. В.К. Шелега; Н.Н. Попок*. – Новополоцк, 2020. – С. 184–186.

Поступила 08.01.2026

## TECHNOLOGIES FOR WELDING DEFECTS IN CAST IRON ENGINE HOUSING PARTS

**V. FRUTSKII, O. SHTEMPEL, I. PILIPENOK**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*The study presents a comprehensive method for restoring the housing parts of internal combustion engines, taking into account the peculiarities of their operational destruction. A classification of defects by localization zones has been developed, and a differentiated repair technology has been proposed for different types of damage. The effectiveness of a combined approach that combines mechanical processing, thermomdiffusion saturation, and controlled welding has been experimentally confirmed, ensuring the restoration of operational characteristics to 92-95% of the original values. Modern methods for repairing cast iron housing parts of internal combustion engines have also been considered. A comparative analysis of various welding technologies, including gas, arc, and cold welding, has been conducted. An optimized repair method with preheating and subsequent heat treatment has been proposed, ensuring a joint strength of up to 95% of the original material.*

**Keywords:** *internal combustion engine, body parts, repair and restoration, flaw detection.*

УДК [331.101.1:656.13]+004.8

DOI 10.52928/2070-1616-2026-53-1-56-61

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ КОГНИТИВНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ОПЕРАТОРАМИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ТИПИЧНЫХ СТРАТЕГИЙ И ОШИБОК МЫШЛЕНИЯ

*канд. техн. наук, доц. С.В. БОГДАНОВИЧ*  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*канд. техн. наук, доц. П.И. БАЛТРУКОВИЧ*  
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

*Рассматривается проблема человеческой ошибки в контуре управления интеллектуальными транспортными системами. Обосновывается необходимость перехода от традиционных систем поддержки принятия решений, ориентированных на данные, к новому классу систем, способных в реальном времени идентифицировать когнитивное состояние оператора, его стратегии и предрасположенность к ошибкам. Предлагается методологический подход к разработке таких систем, основанный на создании типологии когнитивных ошибок, выявлении их цифровых маркеров в поведении оператора и использовании алгоритмов машинного обучения для реализации адаптивных поддерживающих интервенций.*

**Ключевые слова:** интеллектуальные транспортные системы, оператор, ошибка, когнитивная нагрузка, система поддержки принятия решений, человеко-машинный интерфейс.

**Введение.** В настоящее время крупные города сталкиваются с существенным ростом мобильности населения, что ведет к усложнению транспортных потоков. Ответом на это стало повсеместное внедрение интеллектуальных транспортных систем (ИТС) – комплексных технологических платформ, объединяющих сенсорные сети, системы видеонаблюдения, управляемые дорожные знаки и алгоритмы обработки больших данных [1]. Изначально казалось, что автоматизация процессов управления дорожным движением сможет минимизировать влияние человеческого фактора. Однако практика показала обратное: по мере усложнения ИТС роль человека не только не уменьшилась, но и трансформировалась, сделав оператора центра управления дорожным движением (ЦУДД) центральным элементом всей системы [2].

Сегодня оператор ЦУДД – это специалист, принимающий ответственные решения в условиях, которые характеризуются двумя взаимосвязанными факторами: острым дефицитом времени и избытком информации. На его рабочее место в реальном времени поступает огромное количество данных от детекторов, камер и датчиков. В этом потоке информации он должен не просто обнаружить инцидент – будь то дорожно-транспортное происшествие, внезапный затор или поломка светофора, но и мгновенно оценить его масштаб, спрогнозировать влияние на транспортную сеть и выбрать оптимальный сценарий реагирования. Ценность таких решений чрезвычайно высока, поскольку они напрямую влияют на безопасность тысяч участников дорожного движения и экономическую эффективность городской логистики [3]. При этом сами технологии, призванные помочь, становятся источником огромной когнитивной нагрузки, требуя от оператора способностей к параллельной обработке разнородной информации и поддержанию высокого уровня концентрации на протяжении многих часов. Именно в этой точке пересечения технологической сложности и человеческой психологии кроется одна из наиболее серьезных и наименее изученных проблем современной урбанистики.

**Основная часть.** Анализ существующей практики показывает, что при проектировании систем поддержки принятия решений (СППР) для ИТС основные усилия разработчиков направлены на решение инженерных задач: повышение точности и полноты сбора данных (Data Fusion), совершенствование математических моделей для краткосрочного и долгосрочного прогнозирования транспортных потоков, а также разработку библиотек стандартных планов управления для реагирования на типовые ситуации. В основе таких систем лежит логика, согласно которой предоставление оператору максимально полной и объективной картины дорожной обстановки – своего рода «цифровой копии» транспортной сети – автоматически приведет к принятию верных решений [4].

Однако в этой цепочке «данные–прогноз–решение» имеет место существенное упущение: она практически полностью игнорирует психологические и когнитивные аспекты деятельности самого оператора.

Классические и современные работы в области анализа человеческого фактора подтверждают, что ошибки являются не столько виной конкретного исполнителя, сколько закономерным свойством сложных социотехнических систем. Дж. Ризон в своей модели «швейцарского сыра» показал, что катастрофы редко бывают следствием одного неверного действия; чаще они происходят, когда совпадают скрытые недостатки на разных уровнях системы – от организационных просчетов до неудачной конструкции интерфейса [5; 6]. Д. Норман продемонстрировал, как неинтуитивный дизайн оборудования и программного обеспечения провоцирует пользователей на ошибочные действия [7].

В контексте управления динамическими процессами, к которым также относится дорожное движение, центральным понятием, определяющим эффективность оператора, становится ситуационная осведомленность (Situation Awareness). А следовательно, любая система поддержки, которая стремится быть по-настоящему эффективной, должна быть нацелена не столько на предоставление «сырых» данных, сколько на целенаправленное формирование и поддержание высокого уровня ситуационной осведомленности у оператора.

Таким образом, имеет место противоречие, которое и определяет исследуемую проблему. С одной стороны, сложность и масштаб современных ИТС возлагают на оператора колоссальную ответственность, делая его когнитивные способности (внимание, память, аналитическое мышление) решающим фактором обеспечения безопасности и эффективности дорожного движения. С другой – инструментарий, который предоставляется в его распоряжение, – существующие системы поддержки принятия решений – спроектированы в отрыве от природы человеческого познания. Этот разрыв между возрастающей ответственностью оператора и неадекватностью средств поддержки его когнитивной деятельности представляет собой явную уязвимость в системах управления транспортной инфраструктурой.

Данное противоречие требует пересмотра подхода к проектированию СППР. Необходим переход от парадигмы «человек для системы» к парадигме «система для человека», где технология не просто поставляет данные, а активно помогает оператору справляться с когнитивной нагрузкой и избегать предсказуемых человеческих ошибок.

Деятельность оператора ИТС в корне отличается от пассивного наблюдения за экранами мониторов – это непрерывный и напряженный цикл когнитивной работы. Этот цикл можно условно разделить на несколько взаимосвязанных этапов.

Все начинается с мониторинга – процесса распределенного внимания, в ходе которого оператор сканирует большой объем визуальной и символической информации в поиске отклонений от нормы. При обнаружении аномалии, например, резкого снижения скорости потока на участке, совершения ДТП или нештатного срабатывания светофора, задача переходит в фазу диагностики. На этом этапе необходимо не просто констатировать факт, а понять его причину, отделив ложные тревоги от реальных инцидентов.

Сразу за диагностикой следует прогнозирование – пожалуй, самая сложная когнитивная задача. Оператор должен, основываясь на своем опыте и данных системы, мысленно «проиграть» ситуацию наперед: как этот локальный инцидент повлияет на связанные участки сети через 5, 15, 30 минут?

И только после этого наступает этап планирования и реализации управляющих воздействий: выбор и активация соответствующего сценария из системной библиотеки, ввод ограничений скорости, перенаправление потоков или информирование водителей через динамические табло.

Весь этот цикл, от обнаружения до реакции, в идеале должен занимать считанные минуты, что создает колоссальную когнитивную нагрузку.

Основываясь на классической трехуровневой модели Дж. Ризона, мы можем выделить несколько типов ошибок, адаптировав их к специфике деятельности оператора ИТС [5].

Ошибки, основанные на навыках человека (Slips and Lapses), происходят на уровне автоматизированных действий, при выполнении хорошо заученных процедур. Например, оператор корректно отработал инцидент, но забыл снять ограничения скорости после его ликвидации, создав искусственный затор. Такие ошибки часто провоцируются отвлечением внимания или усталостью.

Ошибки, основанные на правилах (Rule-Based Mistakes), возникают на следующем, более осознанном, уровне. Они связаны с применением заученных правил и инструкций. Ошибка может заключаться либо в применении плохого, неэффективного правила, либо, что встречается гораздо чаще, в применении хорошего правила в неподходящей ситуации. Например, оператор видит на карте транспортный затор и активирует стандартный сценарий «Затор», который подразумевает изменение циклов светофоров для увеличения пропускной способности. Однако он не успел или не смог распознать, что первопричиной затора является серьезное ДТП, требующее совершенно иного правила – немедленного вызова экстренных служб и полного перекрытия полосы. Правило было применено верно для симптома («затор»), но неверно для истинной проблемы («ДТП»).

Ошибки, основанные на знаниях (Knowledge-Based Mistakes), случаются в принципиально новых, незнакомых или нетипичных ситуациях, для которых у оператора нет ни готовых навыков, ни заученных правил. В этом случае ему приходится полагаться на свое фундаментальное понимание транспортной системы, на свои ментальные модели. Ошибка на этом уровне – это ошибка диагностики и построения гипотез. Например, столкнувшись с необъяснимым и непредсказуемым поведением транспортного потока, оператор может построить неверную ментальную модель происходящего, что приведет к целой цепочке неправильных решений. Именно здесь наиболее ярко проявляется разница между новичком и экспертом.

Помимо этих типов ошибок, на принятие решений оператором влияют системные отклонения в мышлении, известные как когнитивные искажения (Cognitive Biases). Это не случайные сбои, а укоренившиеся в человеческой психологии «короткие пути» мышления, которые в условиях неопределенности часто приводят к неверным выводам [8].

Деятельность операторов в данном случае отличается и характеризуется набором эффективных когнитивных стратегий. Они не просто реагируют, а действуют на упреждение, отслеживая потенциально опасные,

но еще не критические изменения обстановки. Вместо того чтобы поддаваться склонности к подтверждению, они используют активную проверку гипотез, целенаправленно задавая вопросы: «А что еще это может быть? Какая информация опровергла бы мою догадку?». Наконец, они демонстрируют гибкое распределение внимания, умея плавно переключаться между глобальным обзором всей транспортной сети и детальным анализом конкретного инцидента.

Предлагаемая функциональная типология ошибок и стратегий применительно к ИТС позволяет сформировать основу, своего рода «словарь», который необходим для следующего, технологического этапа работы. Такая типология позволяет структурировать и размечать эмпирические данные о поведении операторов, создавать обучающие выборки для моделей машинного обучения, способных в дальнейшем распознавать предпосылки к тем или иным ошибкам в реальном времени.

Переход от традиционных систем, ориентированных на данные СППР, к когнитивно-адаптивным системам требует усовершенствованной методологии.

Простого добавления новых функций в существующие человеко-машинные интерфейсы недостаточно. Необходимо выстроить полный цикл – от детального изучения реального поведения оператора до создания самообучающихся алгоритмов, способных к «мягким» и своевременным вмешательствам. Предлагается методология, состоящая из четырех последовательных этапов (рисунок).

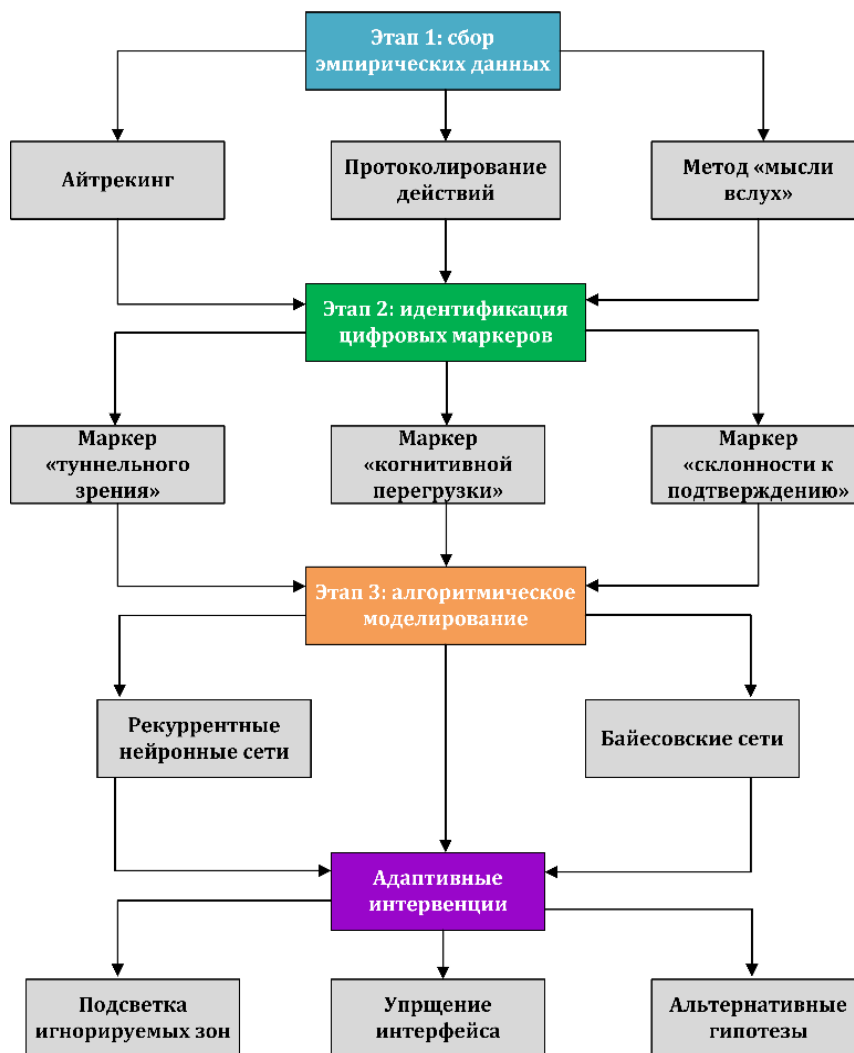


Рисунок. – Методология перехода к когнитивно-адаптивным системам

*Этап 1. Сбор эмпирических данных.* Основой для любых алгоритмов машинного обучения являются качественные данные. В нашем случае речь идет о сборе многомерной информации, отражающей не только внешние события, но и внутренние когнитивные процессы оператора. Проведение таких исследований в условиях реального ЦУДД сопряжено с огромными трудностями и этическими ограничениями. Поэтому основным инструментом на данном этапе становится использование высокореалистичных тренажеров-симуляторов ЦУДД. Такие симуляторы позволяют создавать «цифровые двойники» рабочего места оператора и моделиро-

вать сложные сценарии (множественные ДТП, нештатные ситуации, каскадные сбои), которые в реальной жизни происходят редко, но имеют наиболее серьезные последствия.

Для получения всесторонней картины в рамках симуляционных сессий применяется комплекс взаимодополняющих технологий.

*Айттрекинг (Eye Tracking).* Системы отслеживания движения глаз позволяют с высокой точностью регистрировать траекторию взгляда оператора, определять его зоны интереса на интерфейсе, измерять длительность фиксации и последовательность сканирования информации. Это прямой путь к пониманию того, на что направлено внимание оператора, а какая информация остается «невидимой».

*Протоколирование действий.* Программное обеспечение симулятора должно вести лог всех без исключения взаимодействий оператора с системой: каждое нажатие кнопки мыши, ввод с клавиатуры, переключение между экранами, вызов справочной информации. Эта последовательность действий формирует объективную историю его управляющей активности.

*Метод «мысли вслух» (Think-Aloud Protocol).* В процессе выполнения сценария оператора просят проговаривать свои мысли, гипотезы, сомнения и основания для принимаемых решений. Эти речевые протоколы, синхронизированные с данными айттрекинга и логами действий, являются ценным источником информации для реконструкции его мыслительного процесса и верификации когнитивного состояния [9].

*Этап 2. Идентификация цифровых маркеров когнитивных состояний.* Собранный на первом этапе массив разнородных данных сам по себе не имеет ценности, пока мы не научимся его интерпретировать. Главная задача второго этапа – выявить в потоке поведенческих данных устойчивые, измеряемые индикаторы, которые с высокой вероятностью соответствуют определенным когнитивным стратегиям, состояниям или ошибкам из приведенной выше типологии. Назовем такие индикаторы цифровыми маркерами.

Цифровой маркер – это не сама ошибка, а ее измеряемое поведенческое «эхо». Рассмотрим несколько потенциальных маркеров.

*Маркер «туннельного зрения».* Длительная фиксация взгляда (например, более 15 секунд) на одном элементе интерфейса (одна камера, один участок карты) при одновременном появлении и игнорировании визуальном или аудиально заметных тревожных сигналов в других зонах экрана.

*Маркер «когнитивной перегрузки».* Резкое увеличение энтропии в действиях оператора – хаотичное, нецеленаправленное переключение между экранами и вкладками, частые повторные действия (например, многократный вызов одной и той же камеры), увеличенное время между обнаружением инцидента и первым управляющим действием.

*Маркер «склонности к подтверждению».* Последовательность действий, при которой оператор после выдвижения первичной гипотезы (зафиксированной по протоколу «мысли вслух») просматривает только те источники данных, которые могут ее подтвердить, систематически игнорируя информацию, способную ее опровергнуть (например, просматривает 3 камеры, показывающие затор, но не открывает текстовое сообщение от дорожного патруля о поломке).

*Этап 3. Алгоритмическое моделирование.* На данном этапе идентифицированные цифровые маркеры используются для обучения алгоритмической модели. Цель этой модели – анализировать в реальном времени поток поведенческих данных от оператора и оценивать вероятность его нахождения в том или ином когнитивном состоянии, предрасполагающем к ошибке. Для решения этой задачи могут применяться различные методы машинного обучения, в частности, *рекуррентные нейронные сети (RNN, LSTM)*, хорошо подходящие для анализа временных последовательностей (траектория взгляда, порядок кликов), или *Байесовские сети доверия*, позволяющие моделировать вероятностные связи между маркерами и когнитивными состояниями.

*Этап 4. Адаптивные интервенции.* Завершающий этап реализует принцип замкнутого контура когнитивной поддержки, где система на основе идентифицированных цифровых маркеров динамически корректирует взаимодействие «человек–машина» для смягчения когнитивных искажений, который включает в себя набор следующих адаптивных интервенций.

*Подсветка игнорируемых зон* представляет собой нейроэргономическую интервенцию, направленную на компенсацию селективного внимания (например, туннельного зрения). Система детектирует устойчивую фиксацию взгляда на ограниченной области интерфейса и пропуск релевантных стимулов в других зонах, после чего активирует значимые визуальные или аудиальные сигналы (например, пульсирующие подсветки на карте ЦУДД). Это стимулирует согласованные движения глаз оператора к упущенным элементам, используя механизм ориентировочной реакции для перераспределения когнитивных ресурсов.

*Упрощение интерфейса* – это адаптация рабочего пространства, которая помогает оператору справиться с перегрузкой, когда система замечает признаки хаотичного поведения (например, когда человек начинает бесцельно переключаться между разделами экрана). В таких случаях система автоматически настраивает отображение информации: скрывает лишние кнопки и элементы управления, собирает вместе связанные данные или переключает экран в специальный упрощенный режим. Такой подход уменьшает нагрузку на оператора за счет двух основных механизмов: во-первых, убирает с экрана отвлекающие и ненужные в данный момент элементы (визуальный шум), а во-вторых, располагает важную информацию компактно и логично (когда связанные элементы находятся рядом). Эффективность этого метода подтверждается исследованиями в области теории

когнитивной нагрузки (cognitive load theory), которая изучает, как люди воспринимают и обрабатывают информацию в условиях ограниченных возможностей внимания и памяти [10].

*Альтернативные гипотезы* – дает возможность системе «видеть», что оператор заиклен на одной идее и игнорирует факты, которые ей противоречат. Тогда она подсказывает ему: либо показывает пропущенные важные данные («Ты не посмотрел датчик X»), либо предлагает другое объяснение ситуации («Может, пробка из-за сломанного светофора?»). Это помогает оператору взглянуть на проблему шире и избежать ошибки.

В целом на концептуальном уровне работа модели заключается в вычислении вероятности состояния  $S$  при наличии набора наблюдаемых маркеров  $\{M\}$ :

$$P(S | \{M_1, M_2, \dots, M_n\}),$$

где  $S$  может быть, например, состоянием «туннельное зрение» или «когнитивная перегрузка».

Принципиально важно, как система реагирует, когда эта вероятность превышает заданный порог. Вместо резкого сообщения «ОШИБКА!», которое лишь увеличит стресс, СППР нового поколения должна осуществлять мягкие, контекстно-зависимые адаптивные интервенции.

При угрозе «туннельного зрения» система может не выводить предупреждение, а подсветить другой, игнорируемый, но важный участок на карте или автоматически вывести на дополнительный экран изображение с релевантной камеры из той зоны, куда оператор не смотрит.

При подозрении на «склонность к подтверждению» система может проактивно предложить альтернативную гипотезу в виде вопроса: «Замедление трафика может быть вызвано не только затором, но и остановившимся автомобилем. Проверить данные от патрульной службы?».

При обнаружении маркеров «когнитивной перегрузки» система может применить адаптивное упрощение интерфейса – временно скрыть второстепенные, не относящиеся к текущему инциденту данные, и предложить оператору пошаговый план действий в строгом соответствии с утвержденным регламентом, снижая необходимость импровизировать в стрессовой ситуации.

Предлагаемый подход (сбор данных → идентификация маркеров → алгоритмическое моделирование → адаптивная интервенция) напрямую соединяет достижения когнитивной психологии и эргономики с современными методами Data Science. Эта методология смещает фокус с анализа транспортной системы как таковой на анализ системы «человек–машина», а предложенная концепция цифровых маркеров когнитивных состояний закладывает технологический фундамент для создания проактивных и человекоориентированных систем поддержки принятия решений.

**Заключение.** В настоящей статье обосновывается необходимость перехода к когнитивно-ориентированным СППР для ЦУДД, преодолевающим ограничения традиционных подходов. Предлагаемая трехэтапная методология включает: разработку типологии когнитивных ошибок в ИТС, выявление поведенческих индикаторов состояний на основе мультимодальных данных симуляторов и применение моделей машинного обучения для проактивного распознавания риска ошибок. При этом предложено использование цифровых маркеров для перехода от реактивной к проактивной поддержке, предотвращающей ошибки до их возникновения. Внедрение таких систем повысит безопасность, эффективность управления транспортом и снизит нагрузку на операторов, задавая стандарт для ИТС нового поколения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Big data applications in intelligent transport systems: a bibliometric analysis and review / M. Hassan, Hr. D. Mahin, A. Al Nafees et al. // Discover Civil Engineering. – 2025. – Vol. 2(49). DOI: 10.1007/s44290-025-00205-z
2. Воронин В.М. Теория и практика человеко-машинных систем. – Екатеринбург: УрГУПС, 2014. – 67 с.
3. Душкин Р.В. Интеллектуальные транспортные системы. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 282 с.
4. Data-Driven Intelligent Transportation Systems: A Survey / J. Zhang, F.-Y. Wang, K. Wang et al. // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2011. – Vol. 12, № 4. – P. 1624–1639. DOI: 10.1109/TITS.2011.2158001
5. Reason J. Human Error: Models and Management // BMJ. – 2000. – Vol. 320, № 7237. – P. 768–770. DOI: 10.1136/bmj.320.7237.768
6. Захаров П., Пересыпкин С. Культура безопасности труда: Человеческий фактор в ракурсе международных практик. – М.: Интеллект. Лит., 2019. – 128 с.
7. Norman D. A. The Design of Everyday Things. – New York: Basic Books, 2013. – 347 p.
8. Tversky A., Kahneman D. Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases // Science. – 1974. – Vol. 185, № 4157. – P. 1124–1131. – URL: [https://sites.socsci.uci.edu/~bskyrms/bio/readings/tversky\\_k\\_heuristics\\_biases.pdf](https://sites.socsci.uci.edu/~bskyrms/bio/readings/tversky_k_heuristics_biases.pdf) (Date of access: 17.07.2025).
9. Ericsson K.A., Simon H.A. Protocol Analysis: Verbal Reports as Data // Psychological Review. – 1980. – Vol. 87. – P. 215–251.
10. Sweller J., Merrienboer J. J. G. van, Paas F. G. W. C. Cognitive architecture and instructional design // Educational Psychology Review. – 1998. – № 10(3). – P. 251–296.

Поступила 10.11.2025

**DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR COGNITIVE DECISION SUPPORT  
BY INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS OPERATORS  
BASED ON THE ANALYSIS OF TYPICAL STRATEGIES AND THINKING ERRORS**

**S. BOGDANOVICH**

*(Belarusian National Technical University, Minsk)*

**P. BALTRUKOVICH**

*(Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk)*

*The problem of human error in the control loop of intelligent transport systems is considered. The necessity of transition from traditional data-oriented decision support systems to a new class of systems capable of identifying the cognitive state of the operator, his strategies and predisposition to errors in real time is substantiated. A methodological approach to the development of such systems is proposed, based on the creation of a typology of cognitive errors, identification of their digital markers in the operator's behavior and the use of machine learning algorithms for the implementation of adaptive support interventions.*

**Keywords:** *intelligent transport systems, operator, error, cognitive load, decision support system, human-machine interface.*

УДК 004.942

DOI 10.52928/2070-1616-2026-53-1-62-69

## ПРИМЕНЕНИЕ КАСЕТНО-КОНВЕЙЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СКОРОСТНЫХ СИСТЕМ ГОРОДСКОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА ДЛЯ СВЯЗИ ГОРОДОВ-СПУТНИКОВ С МИНСКОМ

*Д.В. ШОРОХ, канд. техн. наук, доц. В.Н. ШУТЬ  
(Брестский государственный технический университет)*

*Рассматривается применение кассетно-конвейерной технологии скоростного общественного транспорта для организации эффективного сообщения между Минском и городами-спутниками. Описаны принципы функционирования системы, ее преимущества в снижении транспортной нагрузки и улучшении связности агломерации. Предложена концепция интеграции в существующую транспортную сеть.*

**Ключевые слова:** *кассетно-конвейерная технология, интеграция транспорта, транспортная система, скоростной транспорт, модульные транспортные системы.*

**Введение.** Технология наземного транспорта имеет глубокие исторические корни, начиная с изобретения колеса, которое появилось более 6 тыс. лет назад. С развитием цивилизации способы перемещения людей и товаров значительно эволюционировали, и сегодня существует множество различных видов транспорта, таких как водный, железнодорожный, автомобильный, воздушный и др. У каждого из этих видов есть свои преимущества и ограничения, которые определяют их использование в зависимости от специфики задач.

В настоящее время численность населения Земли превышает 8 млрд человек, и, по прогнозам, к концу столетия она может достичь 11 млрд. В условиях урбанизации люди все чаще выбирают города для постоянного проживания, что делает вопрос эффективного общественного транспорта особенно актуальным. Многие крупные города нуждаются в промежуточных системах, которые соединяют метрополитены с уличными маршрутами, и такие системы, как LRT [1] (легкое рельсовое транспортное сообщение), успешно решают эту задачу. Эта технология имеет потенциал значительно повысить скорость и эффективность транспортных связей между городами и их спутниками, а также разгрузить существующие транспортные сети.

*Целью данной работы* является исследование и обоснование возможности реализации пилотного проекта суперскоростной рельсовой трассы, основанной на инновационной технологии кассетно-конвейерной перевозки пассажиров.

Развитие информационных технологий, в особенности, искусственного интеллекта, позволяет пересмотреть концепцию организации и управления современным городским транспортом. Будущее за автоматическим транспортом. На улицах городов появятся новые высокоэкономичные системы общественных автоматических перевозок.

Существенным недостатком транспортной системы «скоростной трамвай» является недостаточно высокая скорость (30 км/ч) и, следовательно, невозможность повысить его провозную способность за счет скорости движения. Это ограничение носит принципиальный характер и его нельзя обойти, как и в метро, предел скорости которого 42 км/ч. Связано это с основным и неизбежным атрибутом всякого городского транспорта: делать остановки на каждом остановочном пункте маршрута.

Рассмотрим трамвайный маршрут, состоящий в прямом направлении, к примеру, из 12 остановочных пунктов. Если пассажиру необходимо проехать из начального пункта в конечный, то транспортное средство сделает 10 промежуточных остановок, не нужных пассажиру, прежде чем доставит его в пункт назначения. Примем, что на каждом промежуточном остановочном пункте с транспортного средства сходит 1/10 часть пассажиров и загружаются новые. Таким образом, при каждой остановке бесполезно гасится кинетическая энергия, пропорциональная 9/10 массам пассажиров, которым не надо выходить на этой остановке. Также теряется энергия, относящаяся к массе транспортного средства.

Отсутствие точной, объективной информации в режиме реального времени о мощности пассажиропотока на маршруте препятствует принятию оптимальных решений по выводу на маршрут такого количества транспортных единиц, чтобы покрыть этот пассажиропоток. Поэтому зачастую трамваи либо перегружены, либо недогружены.

Кроме того, транспортная система «скоростной трамвай» плохо влияет на улично-дорожную среду, т.к. предоставление трамваям преимущественного проезда на светофорах дискриминирует других участников дорожного движения.

Суперскоростная транспортная система лишена всех этих недостатков.

**Основная часть.** *Суперскоростной трамвай – новый тип LRT.* Основатель кибернетики, американский математик Н. Винер на заре развития этой науки говорил о возможности появления полностью автоматических заводов, где человека не будет. Полностью автоматические или с минимальным числом людей заводы уже появились. Теперь такое время наступило для транспорта. Беспилотный суперскоростной трамвай небольшой

местимости от 50 до 100 пассажиров позволит гибко удовлетворять потребности потребителей транспортных услуг в городе не по жесткому графику движения (расписанию), а по требованию пассажира, пришедшего на остановочный пункт.

Основой суперскоростной транспортной системы является инновационный принцип кассетно-конвейерной перевозки, который впервые разработан в лаборатории интеллектуальных транспортных систем Брестского государственного технического университета. Суть кассетно-конвейерного принципа перевозки пассажиров в городской среде подробно рассмотрена на примере беспилотных электрокаров-инфобусов [2; 3].

Кассетно-конвейерная технология скоростных пассажирских перевозок – это автоматизированная система общественного городского транспорта, способная без помех со стороны других транспортных средств функционировать в насыщенной улично-дорожной среде и перевозить количество пассажиров, сравнимое с метро [4–7]. Система действует при полном отсутствии управления со стороны человека и является принципиально новым видом общественного транспорта на базе мобильных автономных электрокаров (беспилотных). Техно-экономические характеристики, которые обеспечивает данная транспортная система, недоступны известным на сегодняшний момент транспортным средствам городской перевозки пассажиров, таким как автобус, троллейбус, трамвай и метро. Все беспилотные электрокары увязаны в один контур управления. Система адаптивна к пассажиропотоку, т.е. работает по требованию на обслуживание на перевозку с минимальным временем ответа на запрос (время ожидания пассажира). Сочетает в себе признаки личного (малое время ожидания транспорта и безостановочный, или с минимальным числом остановок, проезд пассажиром из пункта отправления в пункт назначения) и общественного (высокая провозная способность) транспорта.

Кассетная, роботизированная городская транспортная система массовой конвейерной перевозки пассажиров в исходном состоянии находится в спящем режиме и активизируется в момент появления пассажиров на станции (остановке). Пассажир, проходя через турникет, оплачивает проезд и одновременно указывает свою станцию назначения. Эти сведения поступают на сервер системы, где формируется матрица корреспонденций по данной остановке. На основе данных со всех остановок строится матрица корреспонденций  $M$  поездок пассажиров:

$$M = \begin{pmatrix} 0 & m_{12} & m_{13} & \dots & \dots & m_{1j} & \dots & m_{1k} \\ 0 & 0 & m_{23} & \dots & \dots & m_{2j} & \dots & m_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & m_{i,i+1} & \dots & m_{ij} & \dots & m_{ik} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & m_{k-1,k} \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

где  $k$  – количество остановок;  $m_{ij}$  – количество пассажиров, севших на  $i$ -й остановке с целью доехать до  $j$ -й остановки ( $i, j = 1, \dots, k$ ).

Все элементы матрицы  $M$  на главной диагонали и под главной диагональю равны нулю (т.к. пассажир не может выйти на остановке, на которой сел в вагон, и не может ехать назад). Таким образом, все пассажиры, которые находятся на станциях, дифференцированы по принципу конечного пункта поездки.

Конвейерный способ перевозки указывает на непрерывный процесс движения кассет (автопоездов) с минимальным интервалом в 20 с между ними. Это также является минимальным достаточным временем выгрузки и загрузки пассажиров. Для этого инфобусы выполнены узкими (шириной 1 м) со множеством дверей. Конвейерный способ движения позволяет максимально использовать дорожное пространство, равномерно распределить нагрузку на рельсовое полотно пути и обеспечить время ожидания транспорта пассажиром от 20 с до одной минуты в любое время суток. Особенно следует отметить, что это единственный вид городского общественного транспорта, готовый обслуживать пассажиров 24 ч в сутки.

*Соединение Минска с городами-спутниками на базе суперскоростной трамвайной системы.* 29 октября 2024 г. у Президента Республики Беларусь состоялось совещание по вопросу необходимости скоростных транспортных магистралей, связывающих столицу с городами-спутниками. От Президента прозвучало предложение по созданию рельсового транспорта как наиболее экономичного и экологичного, использующего электроэнергию, в достатке имеющуюся в Республике Беларусь. Уже сегодня более 40% всей генерируемой электроэнергии поступает от Белорусской АЭС, и эта величина будет расти и далее.

Первоначально беспилотный общественный транспорт будет рельсовым (трамвай, метро), что связано с простотой управления. К примеру, в СССР автопилот на железной дороге был успешно испытан в 1953 г. Во многих городах Европы (Лондон, Париж) поезда метро следуют без машиниста.

Задача создания автоматического общественного транспорта намного проще, чем беспилотного личного транспорта, т.к. последний функционирует в сложной динамической среде с неограниченным числом различных вариантов и самых неожиданных случаев, в то время как трасса автоматического общественного транспорта закрыта от внешних воздействий и обустроена системой многочисленных датчиков.

Таким образом, с развитием информационно-коммуникационных технологий стало возможным создание новых типов транспортных систем с характеристиками, недостижимыми в парадигме старых транспортных воззрений.

Между Минском и его городами-спутниками должен функционировать автоматический, интеллектуальный, информационно нагруженный транспорт с высокой скоростью сообщения и достаточной провозной способностью; такой же незаметный для населения, как лифт в многоэтажном доме, удовлетворяющий запрос за минимальное время от момента заказа, способный самостоятельно, без участия или с минимальным участием человека, адаптироваться к динамике пассажиропотока, выводя на линию требуемые объемы транспортных средств.

*Анализ городов-спутников Минска.* Из рассмотренных направлений связи городов-спутников (Дзержинск, Заславль, Логойск, Смолевичи, Фаниполь, Руденск) с Минском можно отсеять направления, на которых уже имеется железная дорога – это Дзержинск, Фаниполь, Смолевичи, Руденск. Остается два перспективных направления: Заславль, Логойск. Кроме того, имеется еще одно перспективное направление на агрогородок Самохваловичи, но оно уступает по числу жителей, живущих на линии дорожного сообщения, в сравнении с Логойском и Заславлем.

Если сравнивать направления Логойск и Заславль, то как первое тестовое направление реализации данного проекта лучше выбрать Заславль. На рисунке 1 изображена трасса Минск–Заславль со всеми промежуточными населенными пунктами и остановками.

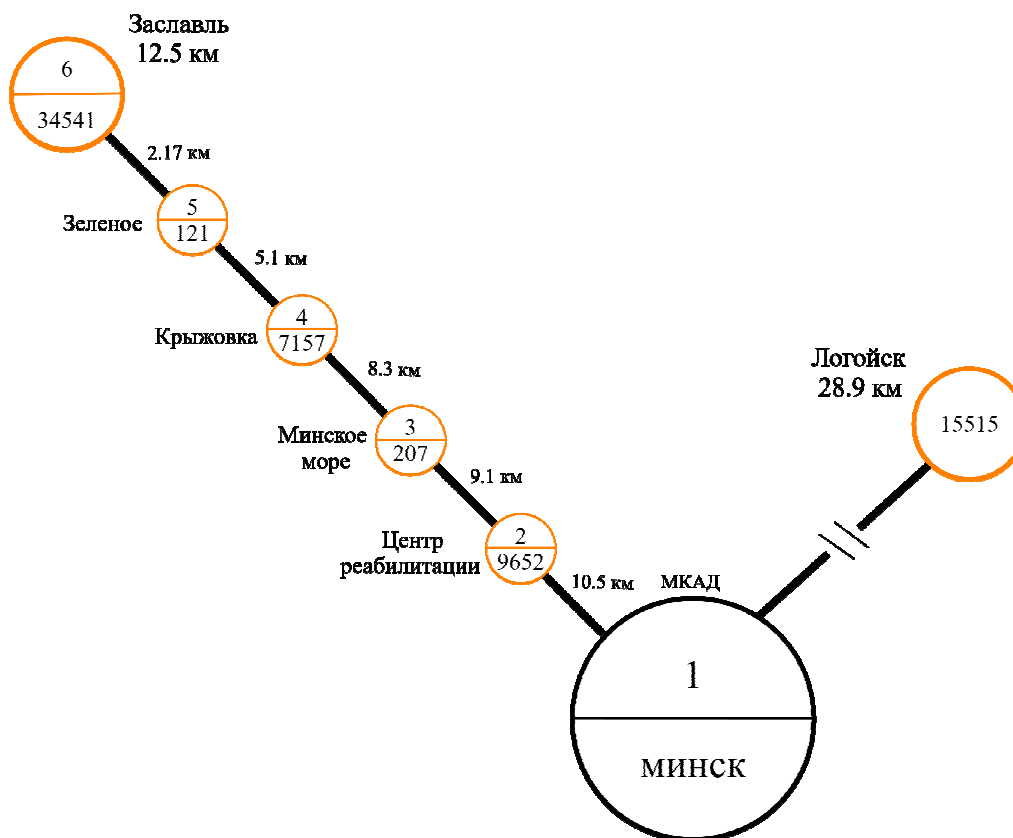


Рисунок 1. – Схема трассы Заславль–МКАД (Минск)

Преимущества направления на Заславль состоят в следующем:

- расстояние до МКАД почти в 3 раза меньше, чем у Логойска;
- отсутствие перекрестков и других препятствий (по направлению на Заславль нет перекрестков и пешеходных переходов, препятствующих движению кассет);
- возможность масштабирования и расширения проекта (от Заславля имеется возможность пустить ветку до Радошковичей);
- плотность пассажиров на километр пути на направлении МКАД–Заславль выше, чем на направлении МКАД–Логойск.

В таблице 1 отображены населенные пункты, численность населения, остановки и расстояния трассы Заславль.

Таблица 1. – Расстояние от предполагаемой начальной остановки в Заславле до последующих остановок вдоль трассы Заславль–МКАД

Населенные пункты	Население, чел.	Остановки	Расстояние, км
Заславль	17404	Заславль	0,00
д. Зеленая	121	Зеленое	1,47
		Юный коммунар	2,87
Ратомка	7157	Крыжовка	5,1
д. Качино	207	Минское море	8,3
Ждановичи	9652	Центр реабилитации	10,1
		МКАД	12,5

По направлению Заславль–МКАД расположено 6 остановок. Все остановочные пункты закрытого типа с терминалами оплаты проезда, заказа пассажиром конечного пункта поездки и входными турникетами. Трасса Заславль–МКАД четырехполосная (по две полосы в разных направлениях). Направления разделены металлическими ограждениями барьерного типа. Именно в зоне разграничения направлений следует пускать скоростную кассетно-конвейерную линию.

Исходя из того, что трамвайный путь имеет ширину 1000 мм, то скоростная кассетно-конвейерная линия легко помещается в зону разграничения. Следует отметить, что кассетно-конвейерная линия является однокольной и работает в реверсном режиме. Этим сокращается стоимость строительства путей более чем в три раза. Это возможно за счет сокращения в два раза железнодорожного полотна, а также за счет ненадобности заимствования части автомобильной полосы движения в случае двухколейной реализации проекта. Все укладывается без дополнительных работ в уже имеющуюся структуру дорожной сети.

Также необходимо подчеркнуть, что железнодорожный путь является облегченным – трамвайного типа инфобусы имеют в 5 раз меньший вес, чем обычный трамвай, и следовательно, стоимость строительства облегченного полотна значительно ниже (кассета из инфобусов, эквивалентная тому же объему пассажиров трамвая, дает меньшую нагрузку на единицу длины рельса, т.к. является распределенной нагрузкой по длине рельса).

На рисунке 2 схематически изображен однокольный рельсовый путь от Минска и до города-спутника. Путь начинается в Минске с накопителя 1 инфобусов и заканчивается накопителем 2 инфобусов в городе-спутнике. Между началом и концом трассы расположены  $k$  промежуточных остановок. Путь реверсный.

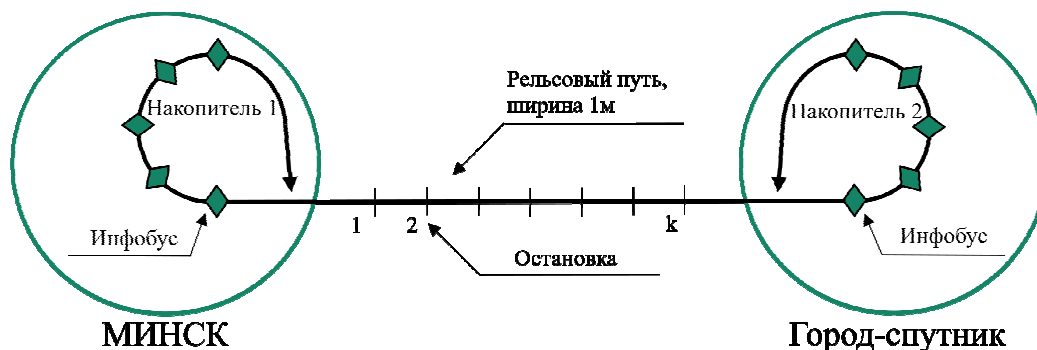


Рисунок 2. – Реверсная кассетно-конвейерная трасса

На рисунке 3 изображена схема однокольного рельсового пути. Трасса пути отгорожена от полос движения автомобилей ограждением. Реальный вид ограждения показан на рисунке 4, где в пространстве ограждения движется кассета из двух инфобусов.

Из препятствий, встречаемых в заданном направлении Заславль–МКАД, можно выделить основания эстакад путепроводов, расположенных на пути проектируемой кассетно-конвейерной трассы. Два места, где встречаются такие препятствия, – при выезде из Заславля и при въезде в Ратомку. Для решения проблемы необходимо скоростную кассетно-конвейерную линию пустить в обход основаниям эстакад путепровода, сместив полосу движения за счет обочины; ширина обочины позволяет это сделать.

*Структура и функционирование суперскоростной транспортной системы Минска с городами-спутниками.* Кассетная, роботизированная, скоростная транспортная система массовой конвейерной перевозки пассажиров между Минском и городами-спутниками состоит из выделенного узкого пути (рельсовый), расположенного по центру магистрали и изолированного от полос автомобильного движения как слева, так и справа от них ограждением (рисунки 3, 4). На всем протяжении рельсового пути рядом с промежуточными населенными пунктами выполнены остановки закрытого типа посадки и высадки пассажиров, снабженные входными терминалами (рисунок 5). Пассажир, проходя через турникет остановочного пункта, оплачивает проезд и одновременно указывает свою станцию назначения. Эти сведения со всех остановок поступают на сервер системы, где формируются матрицы корреспонденций.

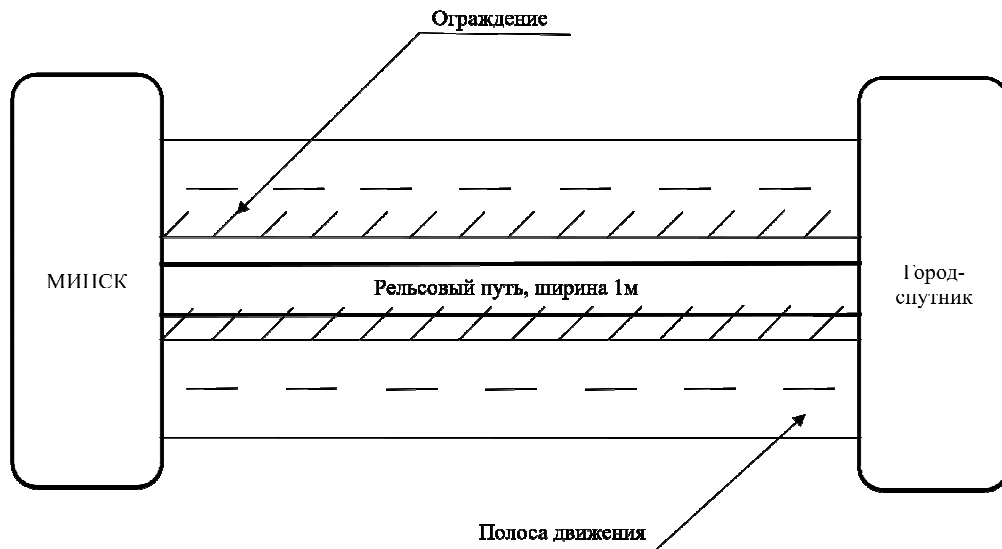


Рисунок 3. – Схема кассетно-конвейерной трассы

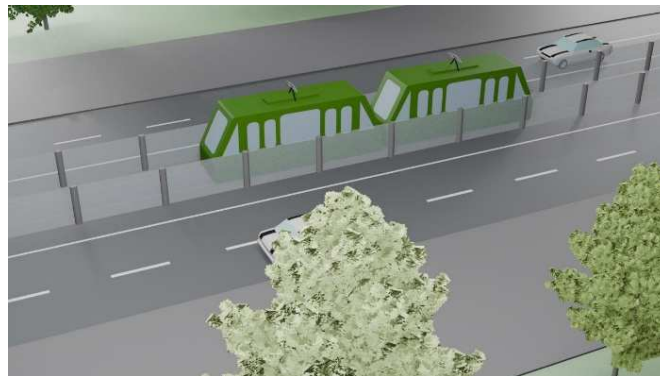


Рисунок 4. – Кассетно-конвейерная линия Заславль–МКАД

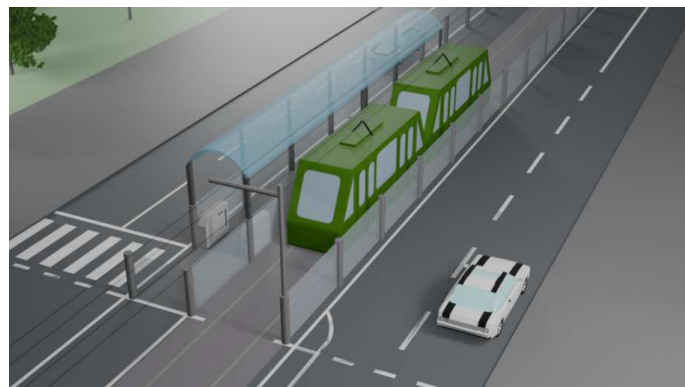


Рисунок 5. – Остановочный пункт с посадкой через пешеходный переход

Беспилотные автономные минитрамваи (инфобусы) небольшого объема в 40 пассажиров базируются в накопителях 1 и 2, расположенных в конечных пунктах маршрута (см. рисунок 2). Каждый инфобус оборудован компьютером, связанным с сервером системы, команды с которого он обрабатывает автономно под управлением собственного компьютера.

На основе данных со всех остановок строятся две матрицы корреспонденций: *M1* – прямого направления; *M2* – обратного направления поездок пассажиров.

Матрица прямого направления движения *M1* для шести остановочных пунктов изображена на рисунке 6. Под прямым направлением движения инфобусов понимается направление движения от города-спутника к Минску. Граф прямого направления для маршрута из этих шести остановок изображен на рисунке 8. Это утренний перевоз пассажиров со всех остановочных пунктов маршрута от города-спутника (остановка *к*)

до Минска (остановка 1) (см. рисунок 2). Здесь  $\kappa = 6$ . В это время пассажиры из города-спутника и промежуточных населенных пунктов едут на работу и учебу в г. Минск

Здесь  $m_{21}, m_{31}, m_{41}, m_{51}$  и  $M_{61}$  – число пассажиров, ожидающих транспорт на остановках, соответственно, 2, 3, 4, 5 и 6 для поездки в Минск (1). Из города-спутника число пассажиров  $M_{61}$  наибольшее, т.к. население его намного больше промежуточных станций (см. рисунок 1, таблицу 1). В матрице прямого направления символы  $\Delta_{32}, \Delta_{42}, \Delta_{52}, \Delta_{62}, \Delta_{43}, \Delta_{53}, \Delta_{63}, \Delta_{54}, \Delta_{64}$  и  $\Delta_{65}$  означают очень малую величину, т.к. это перевозки между промежуточными на трассе небольшими населенными пунктами.

Матрица обратного направления движения  $M2$  для шести остановочных пунктов изображена на рисунке 7. Под обратным направлением движения инфобусов понимается направление движения от Минска к городу-спутнику. Граф обратного направления для маршрута из этих шести остановок изображен на рисунке 9. Это вечерний вывоз пассажиров из Минска (остановка 1) до всех остановочных пунктов маршрута и до города-спутника (остановка 6). В это время пассажиры из Минска возвращаются домой.

Обозначения  $m_{12}, m_{13}, m_{14}, m_{15}, M_{16}, \Delta_{23}, \Delta_{24}, \Delta_{25}, \Delta_{26}, \Delta_{34}, \Delta_{35}, \Delta_{36}, \Delta_{45}, \Delta_{46}, \Delta_{56}$  в матрице обратного направления движения  $M2$  относятся к обратному направлению движения инфобусов (от Минска к городу-спутнику) и аналогичны прямому направлению. Кассеты из инфобусов двигаются попеременно от города-спутника к Минску и, наоборот, от Минска к городу-спутнику, делая промежуточные остановки, если это необходимо, т.е. если с промежуточной остановки есть запрос на перевозку. В противном случае кассета проезжает текущую остановку не останавливаясь. В случае запроса на перевозку останавливается не вся кассета, а только последний в кассете инфобус. Он забирает с этой остановки пассажиров и затем самостоятельно продолжает движение. Он может догнать кассету либо самостоятельно прибыть на конечную остановку.

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_{31} & \Delta_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_{41} & \Delta_{42} & \Delta_{43} & 0 & 0 & 0 \\ m_{51} & \Delta_{52} & \Delta_{53} & \Delta_{54} & 0 & 0 \\ M_{61} & \Delta_{62} & \Delta_{63} & \Delta_{64} & \Delta_{65} & 0 \end{pmatrix}$$

Рисунок 6. – Матрица  $M1$  прямого направления движения инфобусов

$$\begin{pmatrix} 0 & m_{12} & m_{13} & m_{14} & m_{15} & M_{16} \\ 0 & 0 & \Delta_{23} & \Delta_{24} & \Delta_{25} & \Delta_{26} \\ 0 & 0 & 0 & \Delta_{34} & \Delta_{35} & \Delta_{36} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta_{45} & \Delta_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Рисунок 7. – Матрица  $M2$  обратного направления движения инфобусов

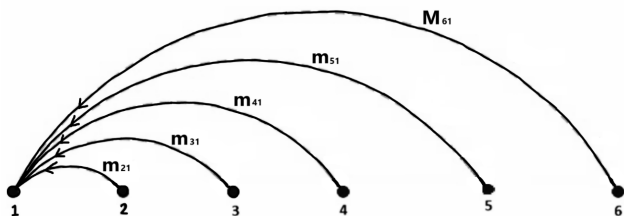


Рисунок 8. – Граф прямого направления движения инфобусов

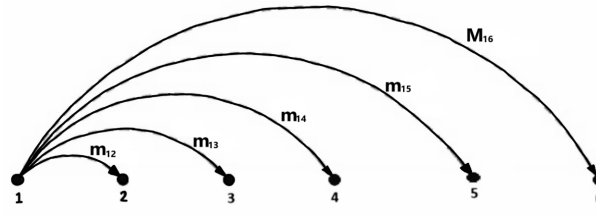


Рисунок 9. – Граф обратного направления движения инфобусов

*Параметры инфобуса (суперскоростного трамвая).* Внутренний салон инфобуса имеет размеры: в длину 6 м, в ширину 1 м (по ширине рельсового пути). Внешняя ширина инфобуса составляет всего 1,2 м. Она небольшая и в совокупности с внешним ограждением составляет довольно узкий коридор в 1,4 м, в котором движутся кассеты инфобусов. Этим обеспечивается возможность внесения ее в любую улично-дорожную сеть без больших материальных затрат. Площадь инфобуса  $S = 6 \times 1 = 6 \text{ м}^2$ . При плотности 6 пасс./м<sup>2</sup> (допускается от 4 и до 8 пасс./м<sup>2</sup>) объем (пассажироместимость) инфобуса составит  $V = 6 \times 6 = 36$  пасс. Берем  $V = 40$  пасс.

В Европе легкорельсовый городской транспорт имеет объем от 200 и до 300 пассажиров., что крайне неудобно и очень затратно при колеблющемся пассажиропотоке. В нашем случае транспортное средство любого объема формируется мгновенно. Так, для 200 пассажиров необходима кассета из 5 инфобусов и т.д.

Мест для сидения в инфобусе – минимальное (2–5). Связано это с тем, что маршрут в одну сторону в 10 км он проезжает за 6 мин при средней скорости 100 км/ч. Среднее время нахождения пассажира в инфобусе составляет 3 мин. Расстояние от города-спутника Заславль в 12,5 км до Минска он преодолит за 7,5 мин.

Таким образом, кассетность, конвейерность, синхронизированность и высокая алгоритмизированность процессов позволяют данной транспортной системе достичь параметров метро, а по некоторым позициям значительно превзойти их.

Перечислим основные качества суперскоростной трамвайной системы (таблица 2). Полная адаптивность к пассажиропотоку; быстрое формирование транспортного средства любого объема; высокая энергоэкономичность; малое время ожидания транспорта пассажиром; низкие амортизационные расходы; высокая транспортная доступность.

Таблица 2. – Сравнительная характеристика суперскоростного и скоростного трамвая

Скоростной трамвай	Суперскоростной трамвай	Преимущества
Система функционирует при управлении человеком	Система функционирует при полном отсутствии человека	Высокий уровень безопасности движения. Сокращение числа ДТП, травм и смертей. Минимизация негативного влияния человеческого фактора, который по статистике является причиной почти 80% ДТП
Нет единого контура управления	Система беспилотный суперскоростной трамвай увязана единым контуром управления	Единая система управления обеспечивает оптимальный режим эксплуатации без простоев и неэффективного использования транспортных средств
Система слабо адаптирована к пассажиропотоку	Система максимально адаптирована к пассажиропотоку	Система работает по требованию пассажира на обслуживание и перевозку с минимальным временем ответа на запрос
Общественный транспорт	Сочетает в себе признаки личного и общественного транспорта	Высокая провозная способность, минимальное время на ожидание транспорта
Выделенная полоса в общем потоке движения транспорта	Выделенная специально оборудованная полоса	Эффективное использование пропускной способности дорог. Оптимальный скоростной режим существенно сократит дорожные заторы
Работает по графику	Работает по ежедневно 24 ч	Высокие потребительские качества
Средняя скорость движения 25–30 км/ч	Высокая средняя скорость движения 60–90 км/ч	Увеличение провозной способности системы в 1,5 раза. Сокращение времени поездки пассажира
Средняя провозная способность 25 тыс. пасс./ч	Высокая провозная способность 33,3 тыс. пасс./ч	Высокая степень удовлетворения потребностей населения в перевозках
Высокий уровень изнашиваемости механических частей транспорта	Низкий уровень изнашиваемости механических частей транспорта	Сокращение эксплуатационных затрат
Высокий уровень расхода электроэнергии на километр пути	Низкий уровень расхода электроэнергии на километр пути	Экономия электроэнергии
Наличие водителя трамвая	Отсутствие водителя	Экономия на заработной плате водителя

**Заключение.** В мире наблюдается возрождение интереса к трамвайным системам. Во многих передовых странах Европы активно развиваются новые скоростные трамвайные линии (LRT). Обычные трамваи превращаются в высокоскоростной транспорт благодаря выделению отдельных путей, исключая взаимодействие с другим уличным движением, а также увеличению расстояний между остановками. Однако последнее решение снижает транспортную доступность для пассажиров. Появление концепции суперскоростного трамвая на основе кассетно-конвейерной транспортной технологии открывает новые перспективы. Впервые становится возможным создание принципиально новой трамвайной системы – суперскоростного LRT. Такая система способна обеспечить провозную способность, сопоставимую с метрополитеном, и в 80% случаев может стать альтернативой дорогостоящему строительству метро.

В рамках данной работы предстояла задача проанализировать возможность связи городов-спутников с Минском высокотехнологичной суперскоростной рельсовой трассой на базе инновационной технологии кассетно-конвейерной перевозки пассажиров. Анализ показал, что такой проект имеет высокий потенциал для решения существующих транспортных проблем, улучшения качества жизни и создания устойчивой городской среды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Головки В.А., Матюшков Л.П., Шуть В.Н. Основы искусственного интеллекта. – Брест, 2010. – 112 с.
2. Шуть В.Н., Персия Л. Интеллектуальные робототехнические транспортные системы. – Брест: БрГТУ, 2017. – 230 с.
3. Шуть В.Н., Швецова Е.В. Кассетно-конвейерная технология скоростных систем городских пассажирских перевозок. – Брест: БрГТУ, 2023. – 207 с.
4. Ракитский А.В., Шуть В.Н. Робототехническая транспортная система // Информационные технологии и системы 2013 (ИТС 2013): материалы Междунар. науч. конф. / Минск, Беларусь (23 окт. 2013 г.). – Минск: БГУИР, 2013. – С. 82–83.
5. Пролиско Е.Е., Шуть В.Н. Новый тип высокопроизводительного общественного городского транспорта // Перспективы развития транспортного комплекса: материалы II Междунар. заоч. науч.-практ. конф. / Минск (4–6 окт. 2016 г.). – Минск, 2016. – С. 11–14.

6. Пролиско Е.Е., Шуть В.Н. Роботизированный городской транспорт кассетно-конвейерной перевозки пассажиров // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации: докл. XV Междунар. конф. / Минск (17 нояб. 2016 г.). – Минск, 2016. – С. 86–91.
7. Капский Д.В., Пролиско Е.Е., Шуть В.Н. Система городского общественного транспорта будущего // Автомобильные дороги: безопасность и надежность: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. В 2 ч. / Минск (22–23 нояб. 2018 г.) / БелдорНИИ. – Минск, 2018. – Ч. 1. – С. 194–202.

*Поступила 29.07.2025*

**APPLICATION OF CASSETTE-CONVEYOR TECHNOLOGY  
FOR HIGH-SPEED URBAN PUBLIC TRANSPORT SYSTEMS  
TO CONNECT SATELLITE CITIES WITH MINSK**

***D. SHORAKH, V. SHUTS***  
***(Brest State Technical University)***

*This paper explores the application of cassette-conveyor technology in high-speed public transportation to establish efficient connections between Minsk and its satellite towns. The principles of system operation are described, highlighting its advantages in reducing transportation load and improving agglomeration connectivity. A concept for integration into the existing transportation network is proposed.*

**Keywords:** *cassette-conveyor technology, transport integration, transportation system, high-speed transport, modular transport systems.*

## СОЦИАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ПРИОРИТЕТНЫХ МЕР ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ МАРШРУТНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

ЛЮ ЮЙВЭЙ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Статья посвящена разработке формализованного методологического аппарата для оценки целесообразности внедрения специально выделенных полос для маршрутного пассажирского транспорта (МПТ) с целью обеспечения устойчивого развития транспортных систем мегаполисов и агломераций. Предложен и научно обоснован новый, более универсальный и объективный, социально-ориентированный критерий – минимальный объем пассажиропотока. Предложена эмпирическая формула для его расчета, позволяющая учитывать конкретные дорожно-транспортные условия на перегонах улиц.*

**Ключевые слова:** устойчивое развитие, маршрутный пассажирский транспорт, приоритет, полоса движения, критерий, социально-ориентированный подход.

**Введение.** Повышение качества транспортного обслуживания МПТ на улицах города достигается путем внедрения специальных полос на перегонах улиц и применения методов, обеспечивающих приоритет, в т.ч. адаптивного управления транспортными потоками, особенно на регулируемых перекрестках и в условиях плотной городской застройки. Все эти мероприятия можно определить одним термином – методы организации приоритетного движения. Однако их внедрение тормозится отсутствием четких критериев введения и адекватных методов организации приоритетного движения, особенно в зоне регулируемых перекрестков. Причем максимальная эффективность мер воздействия достигается за счет синергии пространственных (выделенные полосы) и временных (адаптивное управление сигналами) методов приоритета.

**Основная часть.** Использование специальных полос возможно двумя путями:

- постоянным резервированием одной и более существующих полос или всей проезжей части;
- реконструкцией улицы с целью выделения или отделения специальных полос.

В [1] отмечается, что принятие решения о внедрении специальных полос определяется по результатам натурных экспериментов, в которые входит подсчет количества перевезенных пассажиров МПТ за единицу времени до и после введения приоритетных условий.

В работе<sup>1</sup> фиксируется, что определяющим фактором при внедрении специальных полос на перегонах улиц является минимальная величина пассажиропотока, которая составляет 2000 пасс./ч.

В [2], кроме пассажиропотока, в качестве критерия используют такие показатели, как количество полос движения в одном направлении, минимальная интенсивность движения МПТ и тип расположения специальной полосы в плане проезжей части улицы.

Такие же критериальные характеристики, за исключением количества полос движения, используются при внедрении особых полос в США. В Великобритании<sup>2</sup> целесообразность внедрения специальных полос на перегонах улиц определяется по двум показателям: минимальной интенсивности движения автобусов, что составляет 50 ед./ч, и минимальной величине пассажиропотока – 2000 пасс./ч.

В настоящее время в Беларуси для внедрения выделенных специальных или «дополнительных» полос используются критерии, указанные в п. 5.1.7 и 6.2.6 СН 3.03.06-2022<sup>3</sup>.

Обобщение международного опыта внедрения специальных полос МПТ и выделения проезжих частей позволило определить некоторые критерии [3].

Можно сформулировать три принципиальных условия, при наличии которых использование специальных полос на перегонах улиц будет оправданным. Назовем их критериями применения:

- 1) критерий I: не менее 3-х полос движения в одном направлении ( $m \geq 3$ );
- 2) критерий II: минимальный объем пассажиропотока;
- 3) критерий III: состояние ТП на неприоритетных полосах после выделения специальных полос для движения МПТ.

Условие  $m \geq 3$  (критерий I) обязательно, поскольку при меньшем значении режим и условия движения на неприоритетной полосе будут определять динамические габариты ТС и действия водителя, движу-

<sup>1</sup> Bus rapid transit. Planning guide. – 3ed edition. – New York, 2007. – 825 p.

<sup>2</sup> East London Transit: Summary Report / July 2001. – London, GB. – P. 40–42.

<sup>3</sup> СН 3.03.06-2022. Улицы населенных пунктов. – Минск: Минстройархитектуры, 2022. – 56 с.

щегося впереди самостоятельно образованной группы («пачки») автомобилей. На практике наблюдаются случаи, где для неприоритетного потока оставляют одну полосу для движения с правом выезда на специальную полосу при неблагоприятных обстоятельствах и резком ухудшении условий движения в виду форс-мажора (ДТП, поломки автомобиля на полосе и т.п.). Однако такое решение приемлемо только для небольших по длине участков улиц (не более 200 м), а эффективность его функционирования зависит во многом от культуры поведения водителей конкретной страны. Следовательно, учитывая этот факт для критерия I, принимаем условие  $m \geq 3$ .

Таким образом, количество полос движения (критерий I) в одном направлении является первым и определяющим критерием внедрения специальных полос. Критерий II определяет целесообразность введения специальных полос, а критерий III – эффективность их функционирования на уличной сети города.

Китайский стандарт GA/T 507-2004 «Расположение автобусных полос» (Professional Standard – Public Safety Standards)<sup>4</sup> также определяет условия и методы устройства выделенных полос для автобусов и в дополнение со стандартом DB11/T 1163-2022<sup>5</sup> «Особенности устройства полос для автобусов» (в редакции от 04.2023) (Beijing Provincial Standard of the People's Republic of China) устанавливает принципы, форму полос для автобусов, вспомогательные средства, оборудование и другие требования.

Разница между минимальными значениями пассажиропотока, предлагаемыми в вышеприведенных источниках, составляет 3300 пасс./ч. Возникает необходимость в исследовании этого показателя и установлении минимальных объемов пассажиропотоков при различных дорожно-транспортных условиях на перегонах улиц, по которым внедрение специальных полос будет целесообразным и оправданным.

Для определения минимального объема пассажиропотока необходимо рассматривать условия, в которых специальные полосы уже функционируют, а производить их оценку следует через призму системы «Дорожные условия – Транспортные потоки» (далее – «ДУ–ТП») [4]. Можем предположить, что дорожные условия (дороги, улицы, отдельные участки улиц или дорог) осуществляют обслуживание пассажиров, соответственно каждая полоса на проезжей части улицы или дороги обслуживает определенное количество пассажиров. Подтверждением правильности этой гипотезы является показатель «перевозная способность дороги» (пасс./ч, т/ч), который широко используется для определения транспортно-эксплуатационного состояния улицы [5].

После внедрения специальных полос в системе «ДУ–ТП» проявится некоторое вариативное свойство, т.е. ряд изменений в ее структуре, что в конечном итоге превратит ее в другую систему [6]. Так, уже в подсистеме «ДУ» можно выделить две подсистемы с приоритетными и неприоритетными дорожными условиями: приоритетные ( $П_{п}$ ) и неприоритетные ( $П_{н}$ ) полосы движения. Аналогичные изменения произойдут в подсистеме ТП, где появляются приоритетные ( $Q_{пн}$ ) и неприоритетные ( $Q_{пн}$ ) потоки. Такие преобразования в системе «ДУ–ТП» обусловлены ограничениями, налагаемыми внедрением специальных полос в уличную среду (поток  $Q_{пн}$  не может использовать для движения неприоритетные дорожные условия, и, наоборот, поток  $Q_{пн}$  не может использовать специальную полосу, за исключением частных случаев) и изменением цели функционирования системы (обеспечение комфорта водителя [7] и эффективных пассажирских перевозок).

Трансформация состояния системы «ДУ–ТП» после внедрения специальных полос представлена на рисунке 1.

Используя трансформационные характеристики, можно отметить, что приравнивание количества пассажиров, обслуживаемых подсистемой  $S_{пд}$  за единицу времени, к количеству, которое будет обслуживаться подсистемой  $S_{нд}$  за этот же период, дает возможность говорить о целесообразности внедрения специальных полос.

Кратко эту целесообразность можно выразить следующим неравенством:

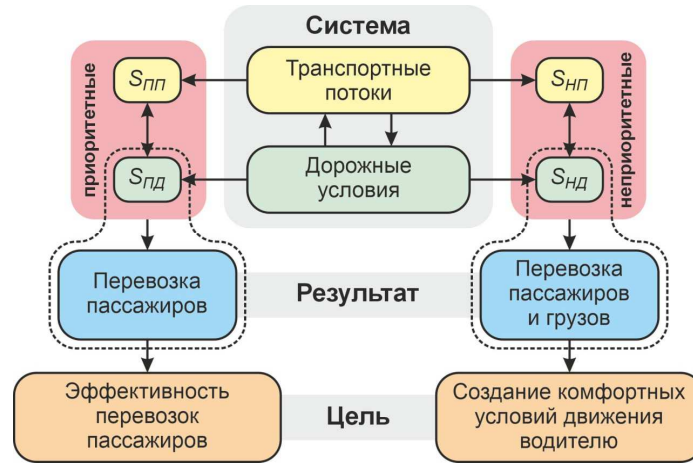
$$S_{пд} \geq S_{нд}, \quad (1)$$

где  $S_{пд}$ ,  $S_{нд}$  – соответственно подсистемы приоритетных и неприоритетных дорожных условий.

Количество пассажиров, обслуживаемых подсистемой  $S_{нд}$ , будет зависеть от ее взаимодействия с подсистемой  $S_{пд}$ , что аналогично процессу взаимосвязей в общей системе «ДУ–ТП» [6]. Поэтому для определения количества обслуживаемых пассажиров подсистемой  $S_{нд}$  следует обратиться к состояниям функционирования системы «ДУ–ТП», определяемым характеристиками ее подсистем.

<sup>4</sup> GA/T 507-2004. Расположение автобусных полос (Professional Standard – Public Safety Standards). – URL: <https://std.samr.gov.cn/hb/search/stdHBDetailed?id=8B1827F1DC82BB19E05397BE0A0AB44A>

<sup>5</sup> DB11/T 1163-2022 公交专用道设置规范 = Особенности устройства полос для автобусов (в редакции от 04.2023) (Beijing Provincial Standard of the People's Republic of China) – URL: <https://jtw.beijing.gov.cn/xxgk/flfg/jthy/202302/P020230220636516881174.pdf>



$S_{пп}$ ,  $S_{нп}$ ,  $S_{пд}$ ,  $S_{нд}$  – подсистемы приоритетных и неприоритетных ТП и приоритетных и неприоритетных дорожных условий, соответственно

Рисунок 1. – Трансформация системы «ДУ–ТП» после внедрения специальных полос

На всем диапазоне возможного функционирования системы «ДУ–ТП» существует состояние  $W$ , при котором обеспечивается эффективное выполнение цели системы, т.е. наиболее эффективная перевозка пассажиров с позиции затрат времени, транспортных расходов и уровня безопасности движения.

Состояние  $W$  системы «ДУ–ТП» определяет качественное состояние транспортного потока и соответствует оптимальному уровню загрузки дороги движением. Для количественного выражения последнего служит коэффициент загрузки движения ( $Z$ ), который может принимать значения от 0 до 1 [5]. Многими исследователями отмечается, что оптимальный экономически эффективный уровень загрузки, а значит, состояние  $W$  системы фиксируется, когда величина  $Z$  приобретает значение 0,5–0,7. И для того чтобы определить количество пассажиров, обслуживаемых любой полосой проезжей части при состоянии  $W$  системы, необходимо воспользоваться одной из характеристик ТП – средним заполнением автомобилей пассажирами, или коэффициентом заполнения [9].

Математическую модель целесообразности внедрения специальных полос на перегонах улиц можно записать в виде следующей характеристики:

$$Q_{пjk} \geq Q_{нjk} \text{ при } Q_{нjk} \in W, \quad (2)$$

где  $Q_{пjk}$  – объем пассажиропотока на полосе пп  $j$ -го перегона в  $k$ -м направлении, пасс./ч;

$Q_{нjk}$  – интенсивность пассажирского движения на полосах пн  $j$ -го перегона в  $k$ -м направлении при состоянии  $W$  системы «ДУ–ТП», пасс./ч.

Показатель  $U$  принимаем равным общей емкости определенного автобуса. При этом

$$Q_{пjk} = q_{пjk} U_{jk}, \quad (3)$$

где  $q_{пjk}$  – интенсивность приоритетного потока на  $j$ -м перегоне в  $k$ -м направлении в соответствии с пассажиропотоком на маршруте, авт./ч;

$U_{jk}$  – общая емкость МТС на  $j$ -м перегоне в  $k$ -м направлении, пасс.

Интенсивность пассажирского движения на полосах пн можно определить по формуле

$$Q_{нjk} = q_{нjk}^w Y_{jk}, \quad (4)$$

где  $q_{нjk}^w$  – интенсивность неприоритетного потока на  $j$ -м перегоне в  $k$ -м направлении, соответствующему состоянию  $W$  системы «ДУ–ТП», авт./ч;

$Y_{jk}$  – коэффициент заполнения автомобиля пассажирами на  $j$ -м перегоне в  $k$ -м направлении (по данным работы<sup>6</sup>  $Y = 1,1-2,5$ ).

<sup>6</sup> Bus rapid transit. Planning guide. – 3ed edition. – New York, 2007. – 825 p.

В формуле (4) неизвестным остается величина  $q_{Hjk}^W$ , которую можно определить как

$$q_{Hjk}^W = Q_{\text{прсHjk}} X_{Hjk} y_{jk}, \tag{5}$$

где  $Q_{\text{прсHjk}}$  – пропускная способность  $i$ -й полосы пп  $j$ -го перегона в  $k$ -м направлении, авт./год;  
 $X_{\text{оп}}$  – оптимальный уровень загрузки улицы движением,  $X_{\text{оп}} = 0,5-0,7$ ;  
 $y_{jk}$  – коэффициент многополосности для  $j$ -го перегона в  $k$ -м направлении, зависит от количества приоритетных и неприоритетных полос движения в  $k$ -м направлении: пп = 1 и пн  $\geq 2$ ,  $y = 1,9$ ; пп = 2 и пн  $\geq 4$ ,  $y = 3,5$ .

Для количественного выражения в этих условиях состояний системы «ДУ–ТП» используется степень насыщения  $x$ , а состояние  $W$  системы существует тогда, когда величина  $x$  приобретает значение 0,95 [9]. Учитывая указанное, формула (4) для перегона улиц регулируемого движения примет следующий вид:

$$q_{Hjk}^W = \sum_{i=1}^r Q_{\text{прсHjk}}' x_{\text{оп}}, \tag{6}$$

где  $q_{Hjk}^W$  – интенсивность неприоритетного потока на  $j$ -м перегоне регулируемого движения в  $k$ -м направлении, соответствующему состоянию  $W$  системы «ДУ– П», авт./ч;

$Q_{\text{прсHjk}}'$  – пропускная способность  $i$ -й полосы пн  $j$ -го перегона на подходе к регулируемого перекрестка в  $k$ -м направлении, авт./ч;

$x_{\text{оп}}$  – оптимальная степень насыщения движением на подходе к перекрестку;

$r$  – количество полос движения пн в  $k$ -м направлении (при  $r > 2$  учитываются пропускные способности двух полос с наибольшими значениями).

С учетом (3)–(6) формула (2) примет вид:

– для  $j$ -го перегона непрерывного движения

$$q_{Пjk} U_{jk} \geq Q_{\text{прсHjk}} X_{\text{оп}} y_{jk} Y_{jk}; \tag{7}$$

– для  $j$ -го перегона регулируемого движения

$$q_{Пjk} U_{jk} \geq \sum_{i=1}^r Q_{\text{прсHjk}}' x_{\text{оп}} Y_{jk}. \tag{8}$$

С помощью формул (7) и (8) возможно оценить целесообразность обслуживания пассажиров специальной полосой на всей длине существующего или проектируемого автобусного маршрута с необходимой разбивкой его на однородные участки:

$$\begin{aligned} Q_{П1} &\geq Q_{Н1}, \\ Q_{П2} &\geq Q_{Н2}, \\ Q_{П1} &\geq Q_{Н2}, \\ &\dots, \\ Q_{Пn} &\geq Q_{Нn}, \end{aligned} \tag{9}$$

где  $n$  – количество однородных участков (перегонов) на маршруте МТС.

Характеристика (9) является своеобразным показателем целесообразности функционирования специальных полос на перегонах улиц.

На основе этих показателей и возможных интервалов их значений был определен диапазон значений минимального объема пассажиропотока для перегона улиц непрерывного и регулируемого движения (рисунок 2).

Из рисунка 2 видно, что минимальный объем пассажиропотока имеет широкий диапазон значений и составляет:

- для перегона улицы непрерывного движения – от 1250 до 5700 пасс./ч;
- для перегона улицы регулируемого движения – от 950 до 5950 пасс./ч.

Такой диапазон значений объясняется наличием на перегонах улиц различных дорожно-транспортных условий, которые отличаются в данном случае из-за пропускной способности полосы движения и коэффициента заполнения. Учитывая вышеизложенное, величина  $Q_{Пjk}$  для практических расчетов примет следующие значения – см. таблицу (значения округлены).

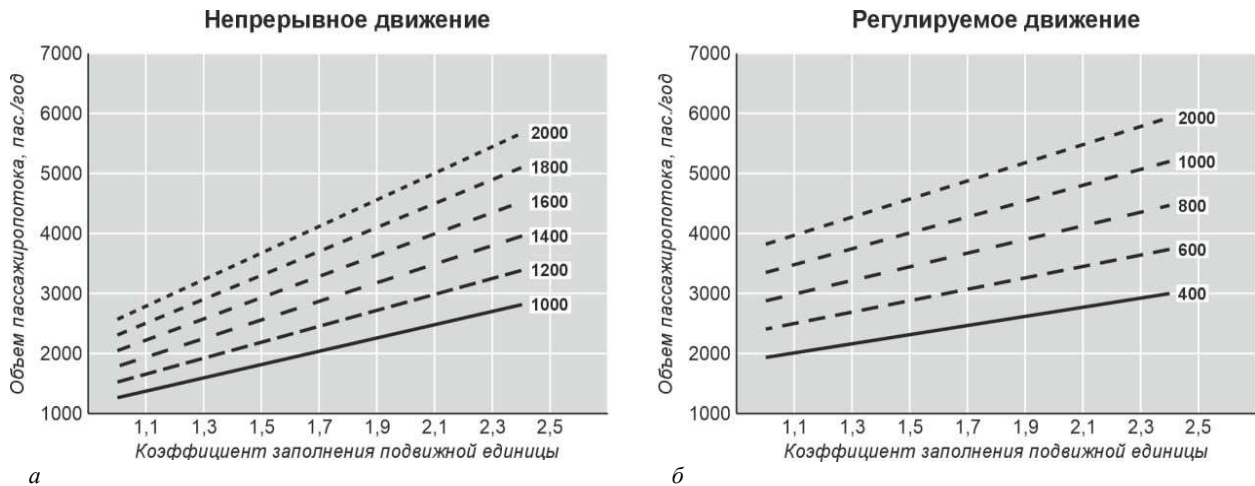


Рисунок 2. – Диапазон значений минимального объема пассажиропотока для перегона улиц непрерывного (а) и регулируемого (б) движения

Таблица. – Минимальное значение объема пассажиропотока для практических расчетов (пасс./ч)

Коэффициент заполнения $Y$	Пропускная способность полосы движения на перегоне улицы, авт./ч			
	непрерывного движения		регулируемого движения	
	1000	1200	700	800
1,8	2050	2460	2390	2740

Подытоживая, важно отметить, что с помощью предложенной эмпирической формулы (2) есть возможность устанавливать целесообразность внедрения специальных полос на перегонах улиц по значениям минимального объема пассажиропотока, который в свою очередь позволяет учитывать особенности дорожно-транспортных условий на элементах уличной сети.

Процесс оценки потенциальных условий по критерию III, или процесс расчета уровня загрузки на полосах П<sub>н</sub>, можно сформировать в виде оследовательности, представленной на рисунке 3.



Рисунок 3. – Оценка состояния ТП на неприоритетных полосах

Важнейшим этапом в этой последовательности является прогнозирование изменения интенсивности, а значит, и уровня загрузки на полосах п<sub>н</sub> после использование специальных полос. Оценка потенциальных дорожно-транспортных условий на целесообразность внедрения специальных полос на перегонах улиц по трем критериям, а также процесс подбора типов и вариантов специальных полос по разным характеристикам можно сформировать в виде следующего алгоритма (рисунок 4).

**Заключение.** Решена задача по разработке формализованного методологического аппарата для оценки целесообразности внедрения выделенных полос. Научно обоснована и доказана несостоятельность традиционного критерия, основанного на интенсивности движения МТС, поскольку он не учитывает вариативность вместимости. Взамен предложен и теоретически обоснован более универсальный и объективный критерий – минимальный

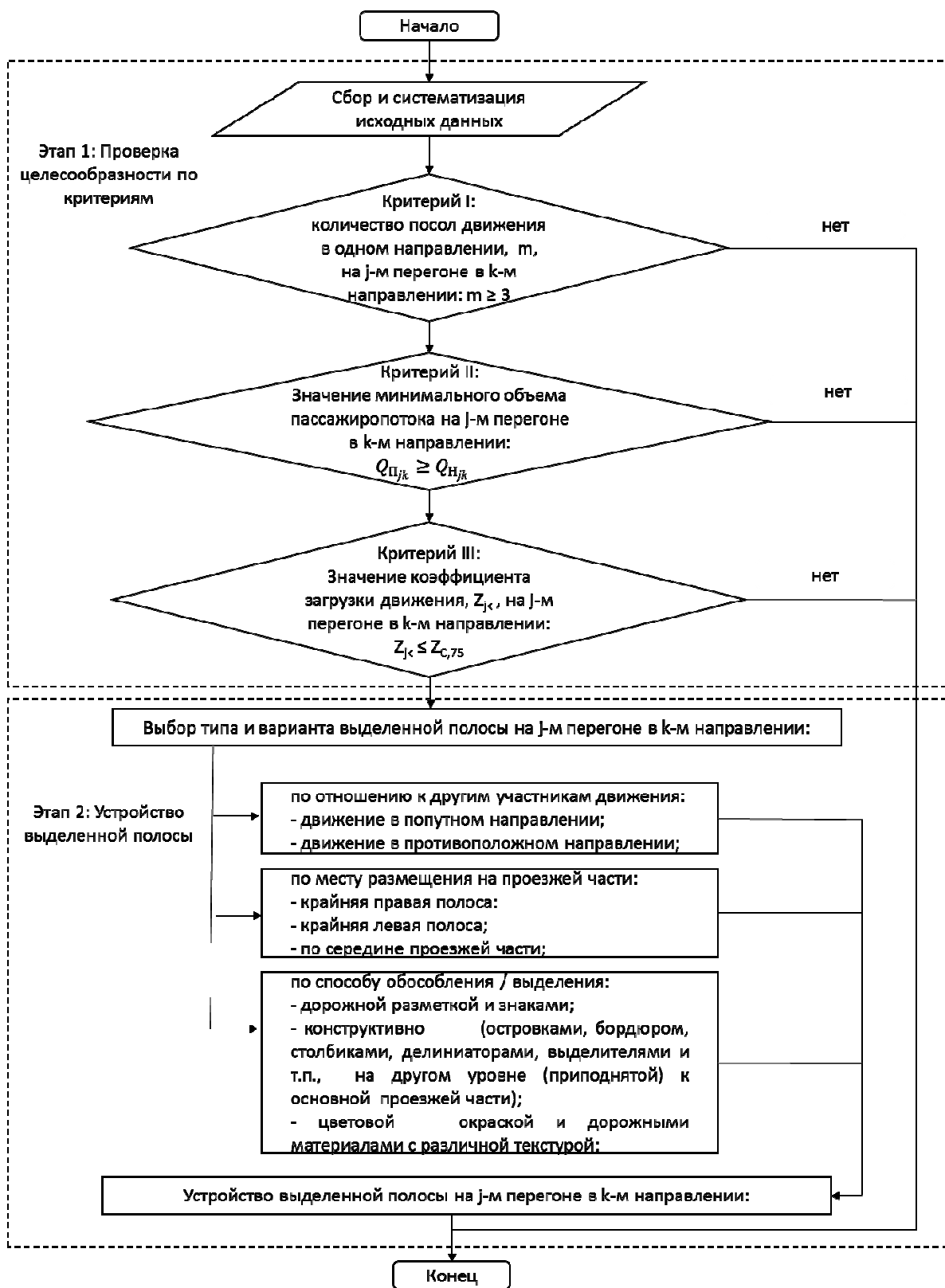


Рисунок 4. – Алгоритм внедрения специальных полос на перегонах улиц

объем пассажиропотока (950–5500 пасс./ч), напрямую коррелирующий с целью повышения качества обслуживания для максимального числа горожан. Разработана новая эмпирическая формула для его расчета, которая, в отличие от существующих фиксированных нормативов, является гибким инструментом, адаптируемым к конкретным дорожно-транспортным условиям. Кроме того, для обеспечения сбалансированности системы доказано, что состояние потока на непериприоритетных полосах следует определять уровнем загрузки, допустимая область которого не превышает 0,75.

Совокупность этих результатов представляет собой готовую к применению методику, которая переводит процесс принятия решений из субъективной плоскости в область объективного, научно обоснованного планирования городской транспортной инфраструктуры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Автомобильные перевозки и организация дорожного движения: справ.: [пер. с англ.] / В. У. Рэнкин, П. Клафи, С. Халберт и др. – М.: Транспорт, 1981. – 592 с.
2. Seo Y.U., Jang H., Park J.H. A Study on Setting-Up a Methodology and Criterion of Exclusive Bus Lane in Urban Area // Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. – 2005. – Vol. 5. – P. 339–341.
3. MacLennan, C. PIARC: priority for public transport and other high occupancy vehicles (HOV) on urban roads // Roads special. – Vol. SPECIAL II, Iss. 10.07A. – P. 1–51.
4. Хомяк Я.В. Организация дорожного движения. – Киев: Высш. шк., 1986. – 270 с.
5. Сильянов В.В., Домке Э.Р. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц: учеб. – М.: Академия, 2008. – 352 с.
6. Автоматизированные системы управления дорожным движением: учеб. пособие / Д.В. Капский, Ю.А. Врубель, Д.В. Навой и др. – Минск; М.: Инфра-М, 2015. – 367 с.
7. Иносэ Х., Хамада Т. Управление дорожным движением: [пер. с англ.]. – М.: Транспорт, 1983. – 248 с.
8. Фомин И.А. Город в системе населенных мест. – Киев: Будівельник, 1986. – 111 с.
9. Schnabel W., Lohse D. Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Band 1: Straßenverkehrstechnik, 2. Auflage. – Berlin: Verlag für Bauwesen GmbH, 1997. – 595 p.
10. Врубель Ю.А., Капский Д.В., Кот Е.Н. Определение потерь в дорожном движении. – Минск: БНТУ. – 240 с.

Поступила 22.12.2025

### A SOCIALLY-ORIENTED APPROACH TO SELECTING PRIORITY MEASURES FOR ORGANIZING PUBLIC TRANSPORT

LIU YUWEI

(Belarusian National Technical University, Minsk)

*This article develops a formalized methodological framework for assessing the feasibility of introducing dedicated lanes for public transport (PRT) to ensure the sustainable development of transportation systems in megacities and agglomerations. A new, more universal, and objective socially-oriented criterion—the minimum passenger flow – is proposed and scientifically substantiated. An empirical formula for calculating it is proposed, taking into account specific road conditions on street sections.*

**Keywords:** sustainable development, public transport, priority, lane, criterion, socially-oriented approach.

УДК 656

DOI 10.52928/2070-1616-2026-53-1-77-82

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО ПРИОРИТЕТА МАРШРУТНЫХ ПАССАЖИРСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕКРЕСТКАХ

**ЛЮ ЮЙВЭЙ***(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Усовершенствован метод специального выделения полос для движения маршрутных транспортных средств (МТС) в зоне регулируемого перекрестка, который позволяет создать для МТС непрерывный пространственный коридор для беспрепятственного подъезда к стоп-линии и проезда через перекресток. Разработана классификация, включающая шесть основных типов конфигураций таких полос, адаптированных под различные сценарии организации движения (прямолинейное, поворотное, комбинированное). Разработаны имитационные модели в среде VISSIM. Установлено, что наибольшая эффективность метода достигается при его интеграции с адаптивными алгоритмами управления светофором, в частности, с функцией вызова специальной «зеленой» фазы, что обеспечивает полноценный пространственно-временной приоритет.*

**Ключевые слова:** *метод, маршрутные транспортные средства, специальная полоса, адаптивные алгоритмы, имитационное моделирование.*

**Введение.** Приоритетный проезд непосредственно по регулируемому перекрестку обеспечивается с помощью адаптивных алгоритмов управления светофорной сигнализацией, в частности через алгоритмы продления разрешенного сигнала и досрочного завершения запрещенного сигнала, а также вызовом специальной фазы для МТС (для реализации абсолютного приоритета) [1–5]. Выполнен анализ обустройства выделенных полос в Китае<sup>1</sup>.

По реализации этого способа на регулируемом перекрестке специальные полосы можно условно разделить на две группы. К первой группе относятся полосы, которые устраиваются на перекрестках, где остановочные пункты отсутствуют или расположены непосредственно перед ним, а ко второй – где остановочные пункты расположены после регулируемого перекрестка. Отдельные типы, по функциональному назначению, делятся на две разновидности: только для автобусов или комбинированное их использование с неприоритетными правоповоротными ТС. Обозначение специальных полос имеет три цифры: первая указывает на группу, вторая – тип, третья (при наличии) – разновидность использования.

На рисунке 1 показано исполнение специальных полос схематично на плане перекрестка. Тип 1.1 целесообразно применять для обеспечения приоритета по всем трем направлениям при расположении ОП МТС перед перекрестком, а для прямолинейного движения и поворота направо – при их отсутствии. При таких же условиях для поворота налево целесообразно применять тип 1.2. Полосы типа 2.1 обеспечивают приоритет для транзитного движения, тип 2.2 – для поворота направо, а типы 2.3 и 2.4 – для поворота налево.

Типы 1.1, 2.1 и 2.2 используются в двух случаях, т.е. если внедрены специальные полосы типа 1.1.2, 2.1.2 и 2.2.2, то на специальную полосу могут также въезжать правоповоротные транспортные средства (на рисунке 2, б, и 3.3, в, приведены обе разновидности специальной полосы типа 2.1).

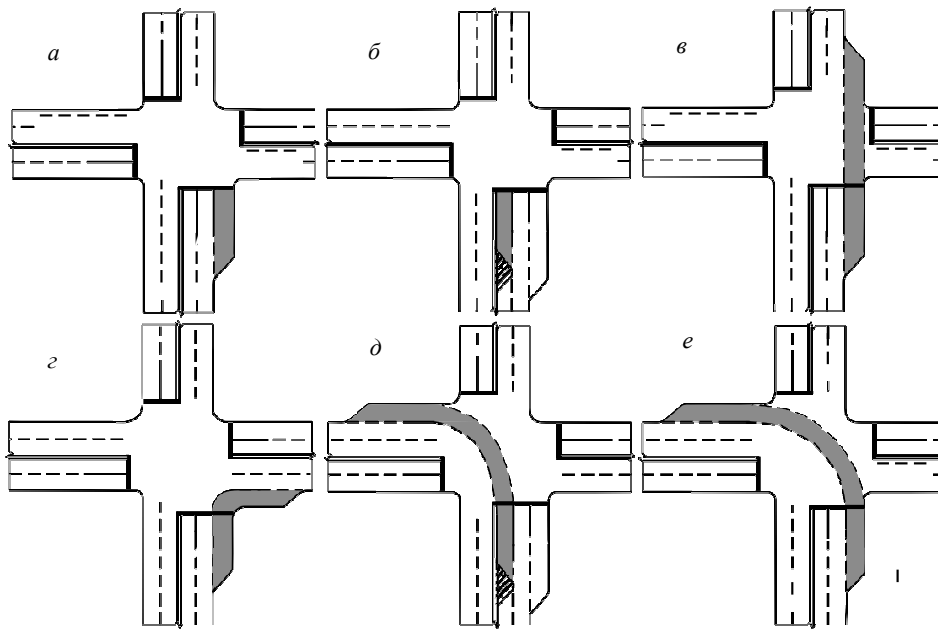
Пример применения специальных полос первой группы на подходе к перекрестку с тремя полосами движения в одном направлении приведен на рисунке 3.

**Основная часть.** *Определение геометрических параметров специальной полосы, устраиваемой в зоне регулируемого перекрестка.* Процесс движения МТС по специальной полосе можно разбить на следующие этапы: вход приоритетного потока на специальную полосу – движение приоритетного потока по специальной полосе на подходе к перекрестку – движение приоритетного потока по специальной полосе непосредственно на перекрестке – движение приоритетного потока по специальной полосе после перекрестка – выход приоритетного потока из специальной полосы (рисунок 4).

Первая функция, которую выполняет геометрический элемент, – обеспечение безопасного и плавного выполнения маневра отклонения МТС от основного потока. Этот участок называют отгоном уширения, длина которого зависит от расчетной скорости и может определяться по различным формулам [6; 7]. По нормативам при размещении остановочных пунктов ширину дополнительной полосы принимают не менее 3 м; отгон уширения – не менее 20 м, а в стесненных условиях глубину «карманов» допускается уменьшать до 2,5 м, длину отгонов уширения – до 10 м<sup>2</sup>.

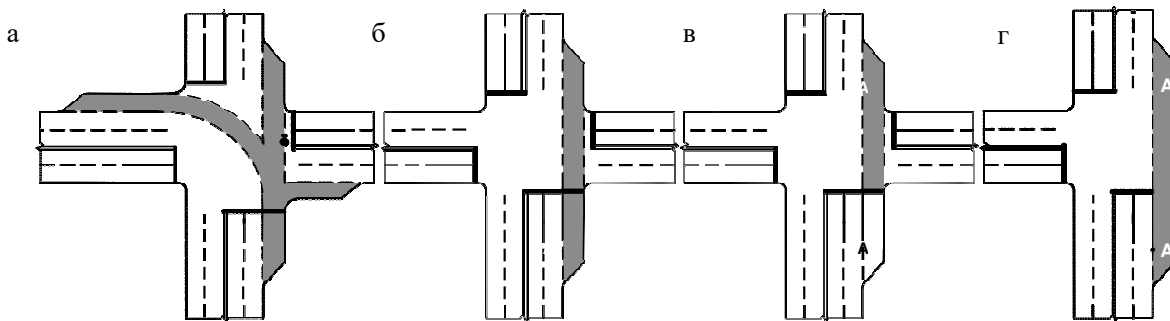
<sup>1</sup> GA/T 507-2004. Расположение автобусных полос (Professional Standard – Public Safety Standards). – URL: <https://std.samr.gov.cn/hb/search/stdHBDetailed?id=8B1827F1DC82BB19E05397BE0A0AB44A>

<sup>2</sup> СН 3.03.06-2022. Улицы населенных пунктов – вулицы населенных пунктаў. – Минск: Минскстройархитектуры, 2022. – 56 с.



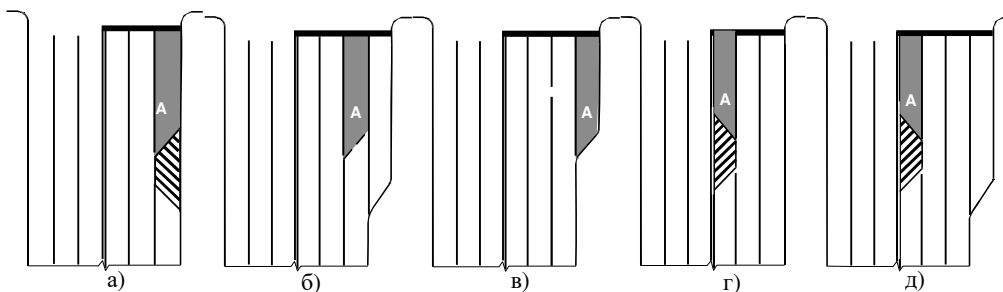
*a* – тип 1.1; *б* – 1.2; *в* – тип 2.1; *г* – 2.2; *д* – тип 2.3; *e* – 2.4

**Рисунок 1. – Типы специальных приоритетных полос в зоне регулируемого перекрестка первой и второй групп**



*a* – одновременное внедрение типа 2.1, 2.2, 2.4; *б* – тип 2.1.1; *в* – тип 2.1.2;  
*г* – специальная полоса типа 2.1 в зоне T-образного перекрестка

**Рисунок 2 – Специальные приоритетные полосы в зоне регулируемого перекрестка**



*a, б, в* – тип 1.1; *г, д* – тип 1.2

**Рисунок 3. – Специальные полосы типа 1.1 и 1.2 в зоне регулируемого перекрестка с тремя полосами на его подходе**

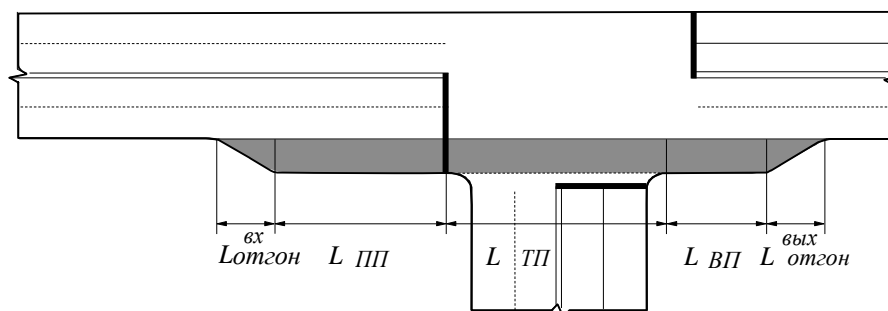


Рисунок 4. – Схематичное изображение геометрических элементов специальной полосы в зоне регулируемого перекрестка

В начале второго этапа, как и в предыдущем, в определенной степени идет процесс разделения потока на приоритетный и неприоритетный. Осуществление МТС маневра отклонения происходит на элементе отгона  $L_{отгон}^{вх}$ , а завершается на участке подхода к перекрестку  $L_{пп}$ . Его можно разделить на два участка:  $L_{отп}$  (участок на котором фиксируется образование более однородного потока) и  $L_{псл}$  (участок подхода к стоп-линии перекрестка).

Чтобы всегда обеспечивался доступ МТС к зоне участка  $L_{отп}$  и при этом не нарушалась равномерность их скоростей, необходимо участок  $L_{псл}$  запроектировать соответствующей длины. Для этого нужно определять максимальную длину очереди ТС на полосе, граничащую с уширением (на специальной полосе), при режиме светофорного регулирования, соответствующем пиковым значениям интенсивности движения на подходе к перекрестку.

При нормальных (неперенасыщенных) условиях движения на подходе (уровень загрузки  $\leq 1,0$ ) образовавшиеся в начале разрешенного сигнала очереди полностью разъезжаются за эффективную продолжительность разрешенного сигнала [1; 6; 7]. Однако если на подходе уровень загрузки превышает 0,65, наблюдаются циклы, за которые очереди разъезжаются на разрешенный сигнал не полностью. Как правило, в большей степени это проявляется при уровне загрузки более 0,9 [1; 8].

При перенасыщенных условиях движения (уровень загрузки больше 1,0), т.е. когда на подходе интенсивность приезда превышает возможности отъезда, образованные очереди за разрешенный сигнал не могут разъехаться практически никогда. Они могут «исчезнуть» только в течение нескольких циклов. Соответственно, наибольшее количество ТС в очереди будет после  $n$  цикла периода перегрузки. Поскольку именно такие условия являются потенциальными условиями образования затора, то для устранения его проявлений необходимо следовать обеспечению нормального режима управления на перекрестке, при котором степень насыщения не должна превышать верхнюю границу 0,95 [1; 6; 7].

Учитывая вышеупомянутую длину элемента специальной полосы на подходе к перекрестку  $L_{пп}$  будет определяться как

$$L_{пп} = L_{отп} + L_{псл}, \quad (1)$$

где  $L_{отп}$  – длина участка, на котором завершается маневр отклонения (принимается равной длине статического габарита МТС), м;

$L_{псл}$  – максимальная длина очереди неприоритетных ТС на полосе, граничащей со специальной полосой, м.

На следующем этапе исследуемый геометрический элемент – (транзитный, прямой) участок  $L_{тп}$  специальной полосы непосредственно на регулируемом перекрестке. Такие условия будут повышать скорость проезда МТС площади перекрестка и безопасность их движения. Длина элемента  $L_{тп}$  зависит от количества полос на подходе к перекрестку по пересекаемым направлениям и от вида совершаемого им маневра.

Длина участка  $L_{разог}$  должна определяться с расстояния для разгона; при этом участок выхода потока из специальной полосы  $L_{отгон}^{вх}$  определяется аналогично для входа – как длина уширения отгона на входе  $L_{отгон}^{вх}$ . В соответствии с действующими ТНПА, в стесненных условиях, их величину можно принимать как длину отгона уширения (кармана) на выезде от остановки, которая составляет 15 м<sup>3</sup>.

Общую длину элементов специальной полосы в зоне перекрестка можно записать следующим образом:

$$L_{сп} = L_{отгон}^{вх} + L_{пп} + L_{тп} + L_{ВП} + L_{отгон}^{вых}, \quad (2)$$

<sup>3</sup> СН 3.03.06-2022. Улицы населенных пунктов – вулицы населеных пунктаў. – Минск: Минскстройархитектуры, 2022. – 56 с.

где  $L_{\text{сп}}$  – длина специальной полосы в зоне перекрестка, м;  
 $L_{\text{отгон}}^{\text{вх}}$ ,  $L_{\text{отгон}}^{\text{вых}}$  – длины уширения отгона соответственно на входе специальной полосы и на выходе из нее;  
 $L_{\text{пп}}$  – длина участка специальной полосы на подходе к перекрестку, м;  
 $L_{\text{тп}}$  – длина участка специальной полосы непосредственно на перекрестке, м;  
 $L_{\text{вп}}$  – длина участка специальной полосы за перекрестком, м.

В упрощенном варианте максимальную длину очереди можно рассчитать по следующей формуле [1; 9]:

$$q_{li} = \frac{t_{\text{кр}} q_i}{\left(1 - \frac{q_i}{q_{\text{нi}}}\right) T}, \quad (3)$$

где  $q_{li}$  – максимальная длина очереди на  $i$ -й полосе, авт.;  
 $t_{\text{кр}}$  – длительность запрещающего сигнала светофора, с;  
 $q_i$  – интенсивность движения на  $i$ -й полосе, авт./ч;  
 $q_{\text{нi}}$  – поток насыщения на  $i$ -й полосе, авт./ч;  
 $T$  – продолжительность периода расчета, с.

Также можно уточнить значения наибольшей длины очереди ТС по американским HCM [12] и немецким HBS<sup>4</sup> [13] нормативам. Расчетная формула для определения максимальной длины очереди ТС по американским нормативам имеет вид [с. 16–152, (G16-6)]<sup>5</sup>:

$$q_{li} = q_{l1} + q_{l2}, \quad (4)$$

где  $q_{l1}$  – средняя длина очереди при равномерном прибытии ТС к перекрестку, авт. Определяется по формуле [с. 16–152, (G16-7)]<sup>5</sup>:

$$q_{l1} = PF_2 \frac{\frac{q_i c}{3600} \left(1 - \frac{\lambda}{c}\right)}{1 - \left[\min(1, 0; x_i) \frac{\lambda}{c}\right]}, \quad (5)$$

где  $q_i$  – интенсивность движения на  $i$ -й полосе, авт./ч;  
 $C$  – длительность светофорного цикла, с;  
 $\lambda$  – эффективная доля зеленого сигнала, с;  
 $x_i$  – доля загрузки на  $i$ -й полосе движения;

$PF_2$  – коэффициент корректировки при периодическом поступлении ТС на перекресток (для изолированных перекрестков  $PF_2 = 1,0$ ). Определяется по формуле<sup>5</sup> [с. 16–152, (G16-8)]:

$$PF_2 = \frac{\left(1 - R_p \frac{\lambda}{c}\right) \left(1 - \frac{q_i}{q_{\text{нi}}}\right)}{\left(1 - \frac{\lambda}{c}\right) \left[1 - R_p \frac{q_i}{q_{\text{нi}}}\right]}, \quad (6)$$

где  $q_i$ ,  $c$ ,  $\lambda$ ,  $c$ ,  $q_{\text{нi}}$  – определены выше;

$R_p$  – коэффициент группы или «пачки» ТС (для изолированных перекрестков принимают 1,0).

$q_{l2}$  – длина очереди при случайном прибытии ТС к перекрестку, авт. Определяется по формуле<sup>5</sup> [с. 16–153, (G16-9)]:

$$q_{l2} = 0,25 PF_2 \frac{\frac{q_i c}{3600} \left(1 - \frac{\lambda}{c}\right)}{1 - \left[\min(1, 0; x_i) \frac{\lambda}{c}\right]}. \quad (7)$$

*Моделирование оптимальной длины специальной полосы подходе к изолированному перекрестку.* Рассмотрим следующую модель условий дорожного движения (рисунок 5).

<sup>4</sup> Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. – Bundesanstalt für Straßenwesen, 2001. – 370 s.

<sup>5</sup> Highway Capacity Manual. – TRB, Washington, DC, 2010. – 1139 p.

Модель включает режимы светофорного регулирования (рисунок 6).

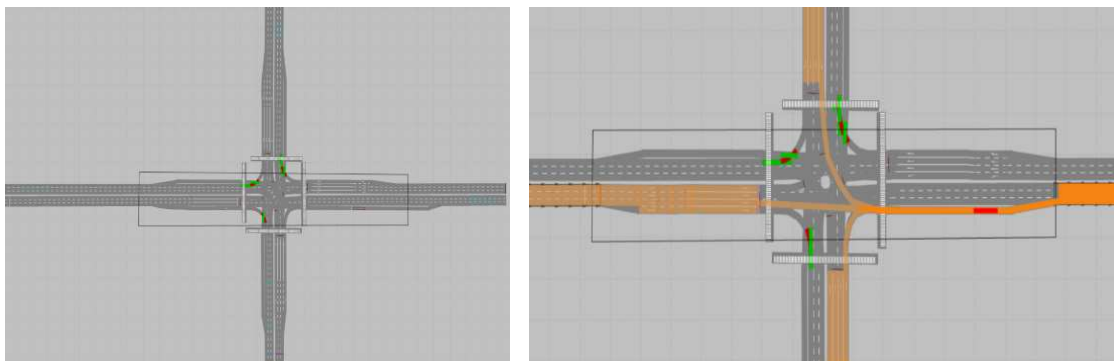


Рисунок 5. – Имитационная модель подхода к изолированному перекрестку

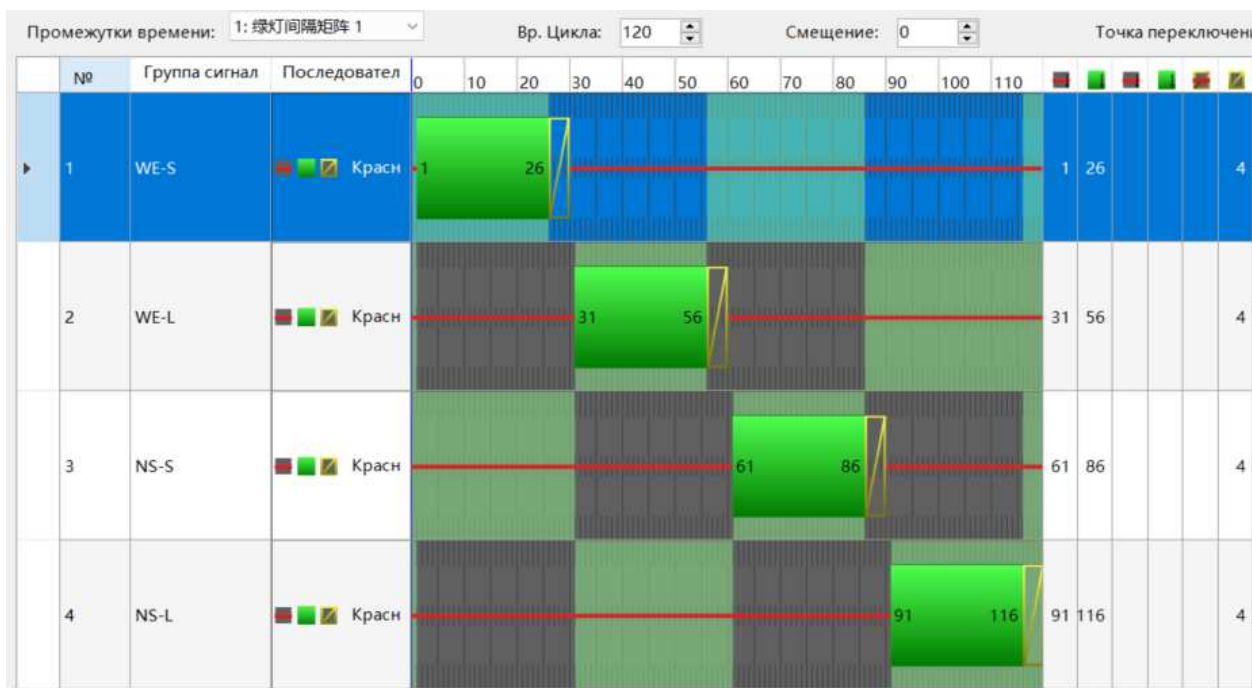


Рисунок 6. – Матрица интервалов светофора

Путем симуляций из 200 итераций получены средние значения параметров (таблица 1).

Таблица 1. – Сравнение данных со специальными полосами и без них

(секунды)	Максимальная длина очереди	Максимальные результаты времени в пути ТС	Максимальные результаты времени задержек	
			время простоя	задержки ТС
Со специальными полосами	33,07	105,63	22,96	48,82
Без специальных полос	62,26	67,55	59,15	87,98

Из таблицы 1 видно, что при большой транспортной нагрузке на дороге различные данные со специальными полосами для автобусов почти в два раза выше, чем без специальных полос для автобусов. Также очевидно, что вызов специальной фазы на регулируемом перекрестке целесообразно использовать для дополнения метода «специально выделенная полоса в зоне перекрестка» в части обеспечения приоритетного проезда через перекресток.

Чтобы получить более очевидный результат по VISSIM, количество транспортных средств устанавливается на максимальное значение, которое может вместить модель дорожной сети. Результаты моделирования при определенных условиях приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Результаты моделирования (фрагмент)

(секунды)		Максимальная длина очереди	Максимальные результаты времени в пути ТС	Максимальные результаты времени задержек	
				время простоя	задержки ТС
Со специальными полосами	500	31,99	67,55	22,96	48,82
	1000	33,07	67,65	23,06	48,92
Без специальных полос	500	30,96	63,66	25,99	45,55
	1000	69,37	80	39,61	62,79

**Заключение.** Решена ключевая проблема движения МПТ – разрыв приоритета МПТ на регулируемых перекрестках с ограниченной пропускной способностью. Усовершенствован и формализован метод «специальная выделенная полоса в зоне перекрестка», позволяющий создать для МТС непрерывный пространственный коридор для беспрепятственного проезда. Сформулирована типология из шести основных конфигураций таких полос, адаптированных под различные сценарии организации движения. С помощью имитационного моделирования в среде VISSIM разработаны модели для определения оптимальной длины выделенной полосы на подходе к перекрестку. Доказано, что ее длина должна быть достаточной для поглощения максимальной длины очереди, формирующейся на смежной полосе. Также были не только валидированы геометрические параметры полос, но и сделан ключевой вывод: максимальная эффективность метода достигается только при его интеграции с мерами временного приоритета, а именно – с функцией вызова специальной «зеленой» фазы для обеспечения беспрепятственного проезда МТС через перекресток. Это доказывает, что для обеспечения полноценного пространственно-временного приоритета недостаточно одних лишь планировочных решений. Установлены пределы области эффективного применения разработанного метода, определяемые условиями движения как маршрутного, так и основного транспортного потока, что позволяет принимать обоснованные решения о его внедрении на практике.

Таким образом, создан практический инструмент для реализации комплексного подхода для разработки адаптивных алгоритмов управления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Координированное управление дорожным движением / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Д.В. Рожанский и др. – Минск: БНТУ, 2011. – 230 с.
2. Печерский М.П., Хорович Б.Г. Автоматизированные системы управления движением в городах. – М.: Транспорт, 1979. – 176 с.
3. Системы и средства автоматизированного управления дорожным движением в городах / Е.Б. Хилажев, В.С. Соколовский, В.М. Гурулев и др. – М.: Транспорт, 1984. – 184 с.
4. Автоматизированные системы управления дорожным движением: учеб. пособие / Д.В. Капский, Ю.А. Врубель, Д.В. Навой и др. – Минск; М.: Инфра-М, 2015. – 367 с.
5. Полищук В.П. Проектирование автоматизированных систем управления на автомобильных дорогах. – Киев: УМК ВО, 1990. – 55 с.
6. Врубель Ю.А. Потери в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2003. – 380 с.
7. Врубель Ю.А. Организация дорожного движения: в 2 ч. – Минск: Белорус. фонд безопасности дорож. движения, 1996. – Ч. 1. – 328 с.
8. Пржибыл П., Свитек М. Телематика на транспорте: [пер. с чеш.]. – М.: МАДИ, 2003. – 540 с.
9. Скирковский С.В., Капский Д.В., Навой Д.В. Теоретические и практические подходы к созданию и развитию интеллектуальной транспортной системы города. – Гомель: БелГУТ, 2022. – 171 с.

Поступила 22.12.2025

**IMPROVING THE METHOD FOR ENSURING SPATIAL-TEMPORAL  
PRIORITY FOR PUBLIC TRANSPORT VEHICLES  
AT SIGNALIZED INTERSECTIONS**

**LIU YUWEI**

**(Belarusian National Technical University, Minsk)**

*This article develops an improved method for dedicating dedicated lanes for public transport vehicles (PTVs) at signalized intersections. This method creates a continuous "spatial corridor" for PTVs to approach the stop line and pass through the intersection without obstruction. A classification has been developed, including six main types of lane configurations adapted to various traffic management scenarios (straight, turning, and combined). Simulation models were developed in the VISSIM environment. It has also been established that the method's greatest effectiveness is achieved when integrated with adaptive traffic light control algorithms, in particular, with the function of calling a special "green" phase, which ensures full spatial and temporal priority.*

**Keywords:** *method, routes, vehicles, special lane, adaptive algorithms, simulation modeling.*

## ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.032.26:37:66

DOI 10.52928/2070-1616-2026-53-1-83-88

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ГЕНЕРАТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ  
В ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ  
(НА ПРИМЕРЕ MICROSOFT COPILOT)

д-р хим. наук, проф. М.А. ЗИЛЬБЕРГЛЕЙТ, Г.А. МОРОЗОВ  
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

В связи с расширением использования нейронных сетей в различных отраслях промышленности возникают проблемы по подготовке студентов к использованию искусственного интеллекта в учебном процессе. В статье рассматриваются перспективы и практические аспекты применения искусственных нейронных сетей и больших языковых моделей (на примере Microsoft Copilot) в процессе обучения студентов химико-технологического профиля. Приведены конкретные примеры решения задач по курсам «Процессы и аппараты химических производств», «Общая химическая технология» и кинетике химических реакций. Продемонстрировано, как использование искусственного интеллекта позволяет автоматизировать рутинные вычисления, визуализировать результаты (материальные балансы, кинетические кривые) и моделировать работу химических реакторов. Показано, что внедрение нейросетевых технологий в учебный процесс существенно сокращает время расчетов и позволяет сместить фокус внимания студентов с математических выкладок на физико-химический анализ процессов.

**Ключевые слова:** нейронные сети, искусственный интеллект, химическая технология, образование, кинетика реакций, материальный баланс, моделирование реакторов, Copilot.

**Введение.** Нейронная сеть – это математическая модель, имитирующая работу мозга человека, состоящая из взаимосвязанных узлов – «нейронов». Основное назначение таких систем заключается в воспроизведении процессов обучения и принятия решений, что позволяет выявлять скрытые закономерности в данных, выполнять прогнозы.

Структурно нейронная сеть включает три основных уровня: входной слой – принимает исходные данные; скрытые слои – преобразуют информацию с использованием весовых коэффициентов и активационных функций; выходной слой – формирует итоговое решение или прогноз (рисунок 1).

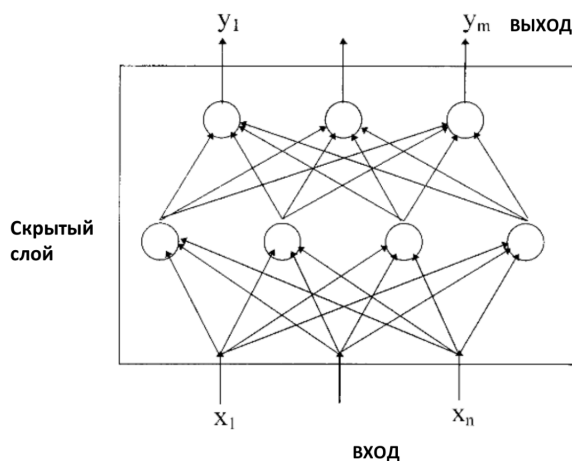


Рисунок 1. – Структура многослойной искусственной нейронной сети с прямыми связями

Каждая связь между нейронами характеризуется весом, отражающим силу влияния одного узла на другой. В процессе обработки данные проходят через последовательность преобразований, а результатом может быть число, классификация, рекомендация или иное решение. Обучение нейронной сети осуществляется методом обратного распространения ошибки (backpropagation), при котором веса корректируются до тех пор, пока прогнозы модели не достигают требуемой точности [1].

Современные исследования показывают, что методы машинного обучения и искусственного интеллекта (ИИ) находят все более широкое применение в химической технологии. Они используются для моделирования, автоматизации и оптимизации процессов, контроля качества и безопасности, а также для поиска новых катали-

заторов [2]. В химической промышленности нейросети применяются для оптимизации производственных процессов, разработки новых материалов и обеспечения экологической безопасности [3].

Особое внимание уделяется задачам прогнозирования свойств веществ. Так, нейросетевые модели позволяют предсказывать токсичность химических соединений, что имеет ключевое значение для экологии и промышленной безопасности [4]. В металлургии нейросети демонстрируют высокую эффективность при прогнозировании характеристик пластичности сталей, превосходя традиционные регрессионные методы [5].

Кроме того, в последние годы активно развивается направление интеллектуальных технологий, включающих нейронные сети и нечеткую логику, которые применяются для управления технологическими процессами, диагностики неисправностей и построения прогнозирующих моделей [6].

Наряду с промышленными приложениями, все большее внимание уделяется образовательному потенциалу нейросетевых технологий. В исследованиях подчеркивается, что генеративные модели и интеллектуальные системы могут использоваться для автоматизации рутинных расчетов, формирования учебных материалов и предоставления студентам персонализированной обратной связи [7–9]. К примеру, отмечается, что использование ChatGPT и аналогичных языковых моделей позволяет преподавателям создавать тестовые задания, конспекты лекций и даже интерактивные упражнения, что значительно экономит время и обеспечивает единый стандарт качества учебных материалов [7]. В других работах показано, что ИИ способен персонализировать образовательные траектории, выявляя пробелы в знаниях студентов и предлагая индивидуальные задания для их устранения [8].

*Цель работы:* оценка возможностей применения нейронных сетей при обучении студентов химико-технологического профиля в курсах: «Процессы и аппараты химических производств», «Общая химическая технология», «Оборудование химических технологий».

**Основная часть.** Ниже мы показываем основные пути использования нейронных сетей, которые, по нашему мнению, могут быть пригодны в обучении студентов химико-технологического профиля.

*Пример 1.* Расчет расхода щелока для выщелачивания хлорида калия из сильвинитовой руды является повседневной задачей, с которой регулярно сталкиваются технологи на производстве. Обычно ее решают через составление системы материальных балансов по основным компонентам и последующее определение неизвестных величин аналитическими или численными методами. Такой способ дает надежный результат, но требует значительных вычислений и внимательной проверки исходных данных. На практике это нередко превращается в трудоемкий процесс, особенно если состав руды или условия выщелачивания меняются.

На этом примере мы бы хотели продемонстрировать ход процесса расчета при возможности быстрого изменения исходных данных. Для этого мы воспользовались искусственным интеллектом Microsoft Copilot в режиме Smart (GPT-5). К Copilot был направлен запрос со следующей постановкой задачи: рассчитать расход щелока  $P$ , содержащего (масс. доли, %) 12,8% KCl, и 13,9% NaCl, необходимого для выщелачивания KCl из 1000 кг сильвинитовой руды  $C$  состава: 27% KCl, 73% NaCl, с получением крепкого щелока  $K$  с содержанием: 19,7% KCl, 17% NaCl, остальное – вода и галитовый остаток (хвосты)  $G$  с содержанием: 1,24% KCl и 94,76% NaCl.

Традиционный способ расчета заключается в составлении материального баланса по KCl, NaCl и общей массе потоков. Формируются три линейных уравнения, которые после решения тем или иным методом такой системы дают искомый результат. Время, которое затрачивает преподаватель на решение этой задачи, обычно составляет около 25 минут.

При реализации решения при помощи ИИ требуется ввести условие задачи в диалоговое окно, само вычисление не превышает одной секунды, нейронная сеть предоставляет также подробное решение задачи. Например, в результате расчета при помощи ИИ было установлено, что для переработки 1000 кг руды требуется около 2726 кг щелока. При этом формируется порядка 3114 кг крепкого раствора и 612 кг хвостов. Проверка материальных балансов по компонентам показала совпадение с результатами, полученными традиционным методом, расхождения находятся в пределах округления. Таким образом, использование Microsoft Copilot позволило не только воспроизвести корректное решение, но и существенно сократить время вычислений, обеспечив возможность оперативного изменения исходных данных при варьировании состава сырья или условий процесса.

*Пример 2.* В рамках преподавания курсов химико-технологического профиля одной из фундаментальных задач классической теории кинетики является последовательное необратимое превращение веществ ( $A \rightarrow B \rightarrow C$ ), где  $A$  – исходное вещество,  $B$  – промежуточный продукт, а  $C$  – конечный продукт. Традиционное решение этой задачи предполагает составление системы дифференциальных уравнений первого порядка, описывающих скорости изменения концентраций компонентов  $A$  и  $B$ , а также обязательное привлечение уравнения материального баланса для концентрации  $C$ . Это требует от студентов выполнения аналитических расчетов, включая интегрирование системы уравнений, что является достаточно трудоемким процессом. Для демонстрации эффективности использования ИИ в учебном процессе данная задача была смоделирована с помощью Copilot. Запрос (промпт) был структурирован в три этапа для получения комплексного решения. Первая часть промпта была посвящена формализации кинетики процесса: было указано, что компонент  $A$  превращается в  $B$  с константой  $k_1$ , а  $B$  превращается в  $C$  с константой  $k_2$ , при этом оба превращения имеют первый порядок. Также были заданы начальные условия: исходная концентрация компонента  $A$  составляет  $C_{0A}$ , а концентрации остальных компонентов равны нулю. От ИИ требовалось вывести систему дифференциальных уравнений и предоставить аналитическое решение для концентрации промежуточного компонента  $B$ . Вторая часть запроса предусматривала нахождение критиче-

ского параметра – времени, при котором количество компонента  $B$  достигает максимума. Третья часть задачи заключалась в визуализации результатов, а именно в построении графика изменения концентрации всех трех компонентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  во времени. При выполнении подобного комплексного запроса ИИ обычно генерирует программный код, чаще всего на языке Python, который требует подключения специализированных библиотек для визуализации данных. Однако, чтобы упростить выполнение третьей части задачи и избежать необходимости установки дополнительных библиотек, было введено требование выполнить программную часть в HTML-формате. На рисунке 2 представлен фрагмент кода, который был выполнен нейросетью.

```
<script>
function derivs(y, k1, k2) {
  const [A, B, C] = y;
  return [
    -k1 * A,
    k1 * A - k2 * B,
    k2 * B
  ];
}

function rk4(y, dt, k1, k2) {
  const f = (y) => derivs(y, k1, k2);
  const k1v = f(y);
  const k2v = f(y.map((v, i) => v + dt * k1v[i] / 2));
  const k3v = f(y.map((v, i) => v + dt * k2v[i] / 2));
  const k4v = f(y.map((v, i) => v + dt * k3v[i]));
  return y.map((v, i) => v + dt / 6 * (k1v[i] + 2 * k2v[i] + 2 * k3v[i] + k4v[i]));
}

function simulate() {
  const k1 = parseFloat(document.getElementById("k1").value);
  const k2 = parseFloat(document.getElementById("k2").value);
  const A0 = parseFloat(document.getElementById("A0").value);
  const B0 = parseFloat(document.getElementById("B0").value);
  const C0 = parseFloat(document.getElementById("C0").value);

  const dt = 0.05;
  const tmax = 10;
  const steps = Math.floor(tmax / dt);
  const t = [], A = [], B = [], C = [];
  let y = [A0, B0, C0];
```

Рисунок 2. – Фрагмент программного кода, сгенерированный нейронной сетью

Такой подход позволяет исполнителю просто скопировать сгенерированный код, сохранить его как файл с расширением `.html` и получить график. Выполнение всего промпта заняло у нейронной сети менее одной секунды, что многократно сократило время, необходимое для традиционного ручного решения. В результате ИИ предоставил как подробное аналитическое решение задачи, так и готовый к запуску код для построения графика изменения концентраций. Этот результат (рисунок 3) наглядно демонстрирует динамику процесса: экспоненциальное убывание концентрации  $A$ , кривую с максимумом для  $B$  и  $S$ -образный рост концентрации  $C$  до ее предельного значения.

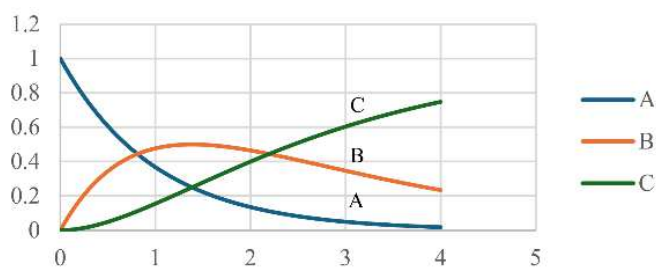


Рисунок 3. – График изменения концентраций реагентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$

Таким образом, использование ИИ позволяет преподавателю и студенту не тратить время на громоздкие математические выкладки, а немедленно перейти к анализу кинетического поведения системы, интерпретации влияния констант скоростей и изучению времени максимального выхода продукта.

*Пример 3.* Еще более сложной задачей, решение которой традиционными методами занимает значительное учебное время, является расчет кинетики обратимой реакции, протекающей в две ступени с одним исходным веществом. Схема такого процесса может быть представлена как последовательное превращение вещества  $A$  в промежуточный продукт  $B$ , который затем переходит в конечный продукт  $C$ , причем обе стадии являются обратимыми.

Классическое решение этой задачи требует от студента глубоких знаний в области высшей математики. Необходимо составить систему дифференциальных уравнений скоростей реакции на основе закона действующих масс, дополнить ее уравнением материального баланса и решить полученную систему. Процесс решения сводится к сведению системы к линейному дифференциальному уравнению второго порядка, составлению характеристического квадратного уравнения и поиску его корней. Итоговые формулы для концентраций представляют собой громоздкие выражения, включающие суммы экспоненциальных функций, зависящих от констант скоростей прямых и обратных реакций. Практика показывает, что ручной вывод этих уравнений занимает у студентов значительное время и сопряжен с высокой вероятностью ошибок в алгебраических преобразованиях. Для оптимизации этого этапа обучения был использован ИИ. В промпт была заложена формулировка задачи: «Вывести уравнения зависимости концентраций от времени для последовательной обратимой реакции первого порядка  $A \rightleftharpoons B \rightleftharpoons C$  с константами прямых скоростей  $k_1, k_2$  и обратных  $\beta_1, \beta_2$ ». Нейросеть корректно составила систему дифференциальных уравнений и использовала уравнение материального баланса для замкнутой системы. Был продемонстрирован метод решения через характеристическое уравнение. ИИ вывел корни этого уравнения (собственные числа системы), имеющие физический смысл констант затухания процесса. Были получены итоговые аналитические выражения для концентраций всех трех компонентов смеси в любой момент времени. Для оценки точности работы нейросети полученное решение было сопоставлено с классическим выводом, приведенным в учебной литературе по химической кинетике [10]. Сравнение показало, что, несмотря на возможные различия в обозначениях переменных (например, использование  $\lambda$  вместо  $\gamma$  для корней характеристического уравнения), математическая структура и физический смысл полученных формул полностью совпадают с данными, приведенными в литературе [10].

*Пример 4.* В теории химических реакторов обычно рассматривают два идеальных реактора: реактор идеального (полного) смешения и реактор идеального (полного) вытеснения. Для идеального смешения характерно абсолютно полное выравнивание всех параметров реакции по объему реактора. Идеальное вытеснение предполагает, что любое количество реагентов и продуктов через реактор перемещается как твердый поршень, и в соответствии с особенностями реакции устанавливается определенное распределение ее параметров по длине реактора (в пространстве). Реальные реакторы в той или иной степени приближаются к моделям идеального смешения или идеального вытеснения. В то же время реальный реактор совмещает свойства реактора идеального смешения и реактора идеального вытеснения. Традиционная схема расчета обычно предполагает разделение реакторного пространства на два параллельных потока: реактор идеального смешения и реактор идеального вытеснения, и последующее суммирование полученного результата. Поставленную задачу можно решить проще, если предположить, что в одном реакторе протекает процесс, в котором кинетика процесса подчиняется кинетике как в реакторе идеального смешения, так и в реакторе идеального вытеснения. Классическая схема расчета предполагает решение системы нелинейных уравнений.

Идеальный реактор вытеснения: для реакций первого порядка закон изменения концентрации описывается экспоненциальным уравнением

$$C_{\text{вытеснения}}(t) = C_0 e^{-kt},$$

где  $C_0$  – начальная концентрация реагента;  $k$  – константа скорости химической реакции первого порядка, характеризующая интенсивность химического превращения;  $t$  – время пребывания реагентов в реакторе.

Идеальный реактор смешения: при условии первого порядка кинетики динамика концентрации часто аппроксимируется зависимостью вида

$$C_{\text{смешения}}(t) = \frac{C_0}{1+kt}.$$

Реальный реактор, в котором наблюдаются эффекты как вытеснения, так и смешения, можно смоделировать с использованием взвешенной суммы приведенных выше выражений. Для этого вводится параметр  $\alpha$  (от 0 до 1), который характеризует степень приближения реакционной системы к режиму идеального вытеснения. Тогда результирующая зависимость концентрации задается формулой

$$C(t) = \alpha C_0 e^{-kt} + (1 - \alpha) \frac{C_0}{1 + kt}.$$

В качестве экспериментальной модели реального реактора был разработан Python-скрипт, сгенерированный искусственным интеллектом Copilot. Данная модель описывает динамику изменения концентрации реагента в реакторе, объединяющем два режима: идеальное вытеснение и идеальное смешение. Для более реалистичного воспроизведения экспериментальных условий к теоретическим значениям концентрации добавляется регулируемый гауссовский шум. Это позволяет учесть погрешности измерений и другие случайные факторы, обусловленные реальными лабораторными условиями. Сгенерированные данные сохраняются в CSV-файл.

Для решения задачи, связанной с нахождением коэффициентов  $k$  и  $\alpha$ , был сформирован промпт, обращенный к искусственному интеллекту Copilot. В промпте была сформулирована задача найти решение, которое позволит определить оптимальные значения параметров  $k$  и  $\alpha$  модели реального реактора на основании входных данных концентрации от времени  $C(t)$ . В качестве результата был сгенерирован код на языке Python. Для подбора оптимальных параметров ИИ использовал численный метод минимизации, предоставляемый библиотекой SciPy. Для верификации разработанной нейросетью модели был проведен численный эксперимент, в ходе которого сравнивались заданные параметры реактора и значения, восстановленные алгоритмом на основе зашумленных данных. Итоги сопоставления представлены в таблице.

Таблица. – Моделирование процесса кинетики работы реактора

$k_{\text{модели}}$	$\alpha_{\text{модели}}$	$t$ , мин	$n$ , кол-во точек	$k_{\text{найденное}}$	$\alpha_{\text{найденное}}$	Разбегка $\alpha$ , %	Разбегка $k$ , %
1	0,05	10	30	0,9940	0,0573	14,6	0,6
1,5	0,01	20	60	1,4925	0,0164	64	0,5
2	0,35	5	20	1,9906	0,3547	1,34	0,47
0,27	0,83	15	15	0,2689	0,8355	0,66	0,4
3	0,1	25	100	2,9910	0,1178	17,8	0,3

**Заключение.** Результаты проведенного исследования подтверждают целесообразность интеграции инструментов ИИ в методику преподавания химико-технологических дисциплин. На примере решения задач расчета материального баланса процесса выщелачивания показано, что использование нейросетевых моделей позволяет сократить время выполнения расчетов с характерных для традиционного метода 25 минут до нескольких секунд при сохранении точности результатов в пределах правил округления. Применение генеративных моделей также продемонстрировало высокую эффективность при анализе кинетики сложных реакций и моделировании гидродинамики реальных реакторов, где нейросеть успешно справилась с идентификацией параметров процесса с погрешностью менее 0,5%.

Вместе с тем следует отметить ряд ограничений и потенциальных рисков использования подобных технологий, не рассмотренных детально в рамках данной работы, но имеющих принципиальное значение. Вероятностный характер работы больших языковых моделей создает предпосылки для возникновения фактических ошибок, что диктует необходимость обязательной критической верификации получаемых данных традиционными методами. Кроме того, чрезмерное доверие к автоматизированным решениям без глубокого понимания физико-химической сущности процессов может привести к снижению уровня фундаментальной подготовки студентов и утрате навыков самостоятельного анализа. Эффективность применения ИИ также находится в прямой зависимости от корректности формулирования запросов, что требует формирования у обучающихся соответствующих компетенций.

Таким образом, внедрение рассмотренных технологий обеспечивает оптимизацию учебного времени, однако требует взвешенного подхода, при котором нейросети выступают не заменой, а вспомогательным инструментом, позволяющим сосредоточить внимание на интерпретации закономерностей и принятии обоснованных технологических решений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. – М.: И.Д. Вильямс, 2006. – С. 31–63
2. Нигматуллин В.Р., Руднев Н.А. Использование методов машинного обучения и искусственного интеллекта в химической технологии. Ч. II // Нефтегазовое дело. – 2019. – № 5. – С. 202–238.
3. Подольный В.А. Применение машинного обучения и нейросетей в химической промышленности // Вестник науки. – 2025. – № 3(84). – Т. 5. – С. 445–449.
4. Егорова А.Р., Зиннатуллина Г.Н., Зарипова Р.С. Прогнозирование токсичности химических веществ с использованием нейронных сетей // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2024. – Вып. 5. – С. 252–253.
5. Шкатов В.В., Шкатов В.В. Применение нейронных сетей для прогнозирования характеристик пластичности горячекатаных листовых сталей // Современные материалы, техника и технологии. – 2018. – № 3(18). – С. 42–46.
6. Сабитов М.А., Сенкевич Л.Б. Использование интеллектуальных технологий в химической промышленности // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 11. – С. 63–66.
7. Паскова А.А. Практические аспекты применения ChatGPT в высшем образовании // Вестник Майкопского государственного технологического университета. – 2023. – Т. 15. – № 3. – С. 67–74.

8. Шобонов Н.А., Булаева М.Н., Зиновьева С.А. Искусственный интеллект в образовании // Педагогика. – 2022. – С. 285–290.
9. Использование нейронных сетей в образовании / О.М. Бакунова, И.Л. Калименя, А.М. Бакунов и др. // Web of Scholar. – 2018. – Т. 1. – № 19. – С. 8–10.
10. Родигин Н.М., Родигина Э.Н. Последовательные химические реакции: Математический анализ и расчет. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – С. 46–47.

Поступила 09.1.2025

**PRACTICAL ASPECTS OF APPLYING NEURAL NETWORKS AND GENERATIVE MODELS  
IN TRAINING CHEMICAL ENGINEERING STUDENTS  
(USING MICROSOFT COPILOT AS AN EXAMPLE)**

**M. ZILBERGLEIT, G. MOROZOV**  
(Belarusian State Technological University, Minsk)

*Due to the expanding use of neural networks in various industries, challenges arise in preparing students to apply artificial intelligence in the educational process. The article examines the prospects and practical aspects of employing artificial neural networks and large language models (using Microsoft Copilot as an example) in the training of students specializing in chemical engineering. Specific examples are provided of solving problems in courses such as Processes and Equipment of Chemical Production, General Chemical Technology, and Chemical Reaction Kinetics. It is demonstrated how the use of artificial intelligence enables the automation of routine calculations, visualization of results (material balances, kinetic curves), and modeling of chemical reactor operation. The introduction of neural network technologies into the educational process is shown to significantly reduce calculation time and shift students' focus from mathematical derivations to the physico-chemical analysis of processes.*

**Keywords:** neural networks, artificial intelligence, chemical technology, education, reaction kinetics, material balance, reactor modeling, Copilot.

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ АНТИКОРРОЗИОННОЙ АКТИВНОСТИ  
НИЗКО- И ВЫСОКОЩЕЛОЧНЫХ СУЛЬФОНАТНЫХ ПРИСАДОК  
ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ  
В БАЗОВЫХ МАСЛАХ РАЗЛИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ**

**Г. АННАЕВ**

ORCID <https://orcid.org/0009-0002-9872-0788>

канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4398-1796>

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

*Представлены результаты исследования влияния обработки ультразвуком кальциевых сульфонатных присадок на их антикоррозионную активность по отношению к поверхности низкоуглеродистой стали. Установлено, что ультразвуковая обработка сульфонатных присадок является эффективным способом повышения их антикоррозионной активности в растворах базовых масел. Зафиксирована закономерность изменения антикоррозионной активности и работы адгезии по отношению к поверхности низкоуглеродистой стали от величины удельной энергии, переданной образцу сульфонатной присадки ультразвуковыми волнами. Определена оптимальная удельная энергия ультразвуковых волн, при которой антикоррозионная активность сульфонатных присадок максимальна. Выявлена взаимосвязь антикоррозионной активности растворов сульфонатных присадок с величиной работы их адгезии к поверхности стальной пластинки. Уточнен механизм антикоррозионного действия сульфонатных присадок. Показано, что из-за неоднородности образующейся защитной пленки на поверхности стали антикоррозионные свойства высокощелочной сульфонатной присадки, содержащей значительное количество карбоната кальция как до, так и после обработки ультразвуком, хуже, чем у низкощелочной сульфонатной присадки.*

**Ключевые слова:** сульфонатные присадки, базовые масла, ультразвуковая обработка, работа адгезии, антикоррозионная активность.

**Введение.** Коррозионные процессы в металлах, используемых в узлах машин и механизмов, приводят к потере производительности и сокращению срока эксплуатации оборудования, что влечет значительные экономические потери. Одним из способов борьбы с коррозией является использование различных ингибиторов, чаще всего органических, которые посредством адсорбции на поверхностях металлов формируют защитные слои, препятствующие воздействию агрессивных сред [1–5].

Среди присадок, используемых при получении товарных смазочных масел и защитных составов, особое значение имеют маслорастворимые сульфонатные соединения, обладающие выраженными моющими, диспергирующими и антикоррозионными свойствами, а также способностью нейтрализовать продукты коррозии, образующиеся в процессе эксплуатации техники [6–11].

Кальциевые сульфонатные присадки относятся к анионным маслорастворимым поверхностно-активным веществам, содержащим в составе молекулы полярную сульфогруппу, связанную с гидрофобными углеводородными радикалами. Это обеспечивает хорошую адсорбцию сульфонатов на металлической поверхности и формирование устойчивых защитных покрытий. Механизм антикоррозионного действия таких присадок заключается в электростатическом и химическом взаимодействии сульфонатных анионов с поверхностью металла, что приводит к подавлению электрохимических реакций коррозии и снижению адсорбции агрессивных ионов [8; 9].

Важным фактором, влияющим на эффективность работы присадок в смазочных маслах, являются свойства базовых масел, используемых при получении смазок и защитных составов. Коррозионные свойства базовых масел зависят от содержания в них коррозионно-активных компонентов и склонности к окислению. В работе [12] проведена сравнительная оценка влияния сульфонатов кальция разной щелочности в базовых маслах различной природы на их термоокислительную стабильность. Однако данных о влиянии базовых масел на антикоррозионную активность сульфонатных присадок при проведении обзора научной литературы не выявлено.

Основным отличительным свойством кальциевых сульфонатных присадок является их щелочное число, величина которого зависит от содержания в присадке карбоната кальция. Повышение щелочного числа сульфонатных присадок достигается путем введения в раствор сульфонатов кальция в базовом масле оксида или гидроксида кальция с последующей их карбонатацией. С ростом щелочного числа происходит увеличение размеров частиц карбоната кальция. Так, в синтетических высокощелочных карбонатированных сульфонатных присадках образуются частицы карбоната кальция с диаметром до 36 нм, окруженные молекулами диалкилбензолсульфонатов кальция [13]. Эффективность защитного действия ингибирующих составов

сульфонатов кальция, полученных на основе диалкилбензолсульфокислот, снижается с увеличением их щелочного числа [6; 9]. В связи с этим поиск способов повышения антикоррозионной активности сульфонатных присадок является актуальной задачей.

Одним из способов повышения активности нефтяных дисперсных систем является использование кавитационных эффектов, возникающих при их ультразвуковой обработке (УЗО) [14–18]. Особенностью кавитации является то, что она может ускорять процессы диффузии. Это происходит потому, что ударная волна, возникающая при схлопывании кавитационных пузырьков, может диспергировать твердые материалы, обеспечивая их более равномерное распределение в дисперсионной среде. Кроме того, высокое давление и энергия, генерируемые ударной волной, могут привести к разрыву химических связей. Схлопывание кавитационных пузырьков также способствуют локальному нагреву жидкости и интенсификации процессов массопереноса [19–21].

В работе [22] установлено, что воздействие ультразвуковых колебаний на синтетическое моторное масло «ZIC X7 Diesel» 10W-40 приводит к снижению его коэффициента поверхностного натяжения и способствует повышению износостойкости пар трения. Результаты, полученные при изучении закономерностей изменения антикоррозионной активности растворов синтетических нейтральных сульфонатов в полиальфаолефиновом базовом масле (о-ПАО-6) в отношении стали марки Ст10, также свидетельствуют о положительном влиянии УЗО на антикоррозионные свойства сульфонатных присадок [23]. Кроме того, в данной работе была выявлена взаимосвязь между размерами агрегатов (мицелл) нейтральных сульфонатов кальция в растворе о-ПАО-6 и их антикоррозионной активностью.

Целью настоящей работы является изучение влияния УЗО низко- и высокощелочных кальциевых сульфонатных присадок, полученных на основе диалкилбензолсульфокислот, в растворах базовых масел различного происхождения, на их антикоррозионную активность, а также углубление понимания механизмов влияния ультразвука на коллоидную структуру и антикоррозионные свойства сульфонатных присадок.

**Исследовательская часть.** Объектами исследований были выбраны четыре образца базовых масел и две синтетические сульфонатные присадки. Свойства базовых масел приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Свойства базовых масел

Показатель	Значение			
	SN-150	HC-4	VHVI-4	ПАО-6
Плотность при 15 °С, кг/м <sup>3</sup>	848,3	842,2	828,6	827,4
Вязкость кинематическая при 100 °С, мм <sup>2</sup> /с	4,9	4,3	4,4	5,9
Индекс вязкости	115	124	130	138
Содержание серы, мг/кг	243	34	4	0
Температура застывания, °С, не выше	-15	-15	-21	-57
Температура вспышки, определяемая в открытом тигле, °С	230	224	230	249
Потери от испарения методом Ноак, % масс.	15,2	16,4	13,8	5,8
Цвет, единицы ЦНТ	1,5	1,0	менее 0,5	менее 0,5
Показатель преломления $n_D^{20}$	1,4692	1,4667	1,4577	1,4564
Коэффициент поверхностного натяжения при 20 °С, мН/м	29,4	29,3	25,6	19,7
Массовая доля углерода (структурно-групповой состав):				
в ареновых кольцах	16,52	9,68	1,91	–
в циклоалканах	25,51	41,71	55,35	–
в алкильных заместителях	57,97	48,61	42,74	–
Содержание колец в средней молекуле:				
ареновых колец	0,41	0,23	0,04	–
циклоалкановых колец	0,68	1,05	1,36	–

Базовое масло SN-150 является смесью дистиллятных нефтяных масел, полученных путем вакуумной перегонки мазута, селективной очистки, сольвентной депарафинизации и доочистки отбеливающими глинами, с базовым маслом HC-4. По групповому составу масло SN-150 на 84,2% масс. состоит из парафино-нафтеновых углеводородов, на 14,4% масс. из ароматических углеводородов и на 1,4% масс. из смол.

Базовое масло HC-4 получено путем фракционирования и сольвентной депарафинизации остаточного продукта процесса гидрокрекинга вакуумных газойлей по технологии «Unicreking» (UOP) с последующей доочисткой отбеливающими глинами. По групповому составу масло HC-4 на 98,7% масс. состоит из парафино-нафтеновых углеводородов, на 1,1% масс. из ароматических углеводородов и на 0,2% масс. из смол.

Базовое масло VHVI-4 представляет собой продукт процесса гидроизомеризации остаточного продукта процесса гидрокрекинга вакуумных газойлей, совмещенного с процессом гидрофинишинга, направленного на глубокое гидрирование ароматических углеводородов.

Базовое масло ПАО-6 является синтетическим маслом, полученным путем полимеризации линейных альфа-олефинов. Отличительные особенности полиолефиновых масел: отсутствие ненасыщенных и ароматических углеводородов, соединений серы и других примесей, хорошие низкотемпературные свойства, высокие индекс вязкости и термоокислительная стабильность [24].

В качестве сульфонатных присадок в работе были использованы присадки, отличающиеся щелочным числом и содержанием кальция:

- низкощелочная сульфонатная присадка (СФ1) со щелочным числом 16 мг КОН/г и содержанием кальция 2,4% масс.;
- высокощелочная сульфонатная присадка (СФ2) со щелочным числом 405 мг КОН/г и содержанием кальция 15,1% масс.

Для изучения влияния ультразвуковой обработки сульфонатных присадок на их антикоррозионную активность в базовых маслах были приготовлены образцы путем механического перемешивания компонентов при температуре (50–60) °С в течение 1 ч. Содержание сульфонатной присадки во всех образцах равно 5% масс.

Обработка сульфонатных присадок ультразвуком проводилась при помощи ультразвукового диспергатора VCS-130 PB при температуре не выше 60 °С. Обрабатываемый образец присадки объемом 10 мл помещался в пробирку, которая опускалась в водяную баню с температурой не более 20 °С. В пробирку с образцом вводился зонд диспергатора и проводилась обработка образца ультразвуком с частотой 20 кГц. Диспергатор оснащен цифровым ваттметром, отображающим значение мощности, подаваемой на зонд, которая зависит от заданной амплитуды ультразвуковых волн. Удельная энергия, переданная образцу ультразвуковыми волнами, определялась путем деления переданной мощности на продолжительность обработки образца (определяется и отображается прибором) и на объем образца. Температура обрабатываемого образца контролировалась при помощи пирометра.

Антикоррозионная активность образцов определялась путем погружения стальных пластинок с нанесенным на их поверхность образцами в раствор электролита и выдерживания их при комнатной температуре (20±2) °С в течение 168 ч (ГОСТ 9.054-75, метод 4)<sup>1</sup>. Нанесение образцов проводилось путем полного погружения в них стальных пластинок на 5 мин с последующим выдерживанием пластинок в подвешенном состоянии на воздухе в течение 1 ч. Для проведения исследований были использованы предварительно отшлифованные пластинки из стали со следующим элементным составом (в % масс.): железо – 98,3; марганец – 0,6; хром – 0,232; кремний – 0,197; никель – 0,153; углерод – 0,145; медь – 0,110; молибден – 0,061; примеси других элементов – 0,202. Элементный состав стальной пластинки был определен при помощи оптико-эмиссионного спектрометра SPECTROPORT. Антикоррозионная (защитная) способность образцов оценивалась весовым методом по показателю коррозии  $K$ , определяемому путем деления изменения массы стальной пластинки за время испытания (г), на площадь поверхности пластинки (м<sup>2</sup>).

Результаты изучения влияния энергии УЗО сульфонатных присадок в базовых маслах на величину показателя коррозии стальных пластинок приведены на рисунках 1 и 2.

При погружении стальной пластинки в раствор сульфонатной присадки в базовом масле на ее поверхности образуется тонкая защитная пленка, препятствующая воздействию на металл различных негативных внешних воздействий, вызывающих коррозию. Эффективность защитного действия ингибирующего состава зависит в первую очередь от силы адсорбции ингибитора на поверхности металла [25; 26]. При этом эффективны лишь те ингибиторы коррозии, которые хорошо смачивают поверхность металла и слабо адсорбируются на границе «масло–вода» [27]. Также важным фактором, влияющим на защитное действие ингибирующего состава, является слой масла, который выступает в качестве дополнительной гидрофобной защитной пленки, покрывающей основную пленку ингибитора и создающей барьер как для диффузии ионов металла от его поверхности, так и для диффузии коррозионных агентов или воды к поверхности металла [28].

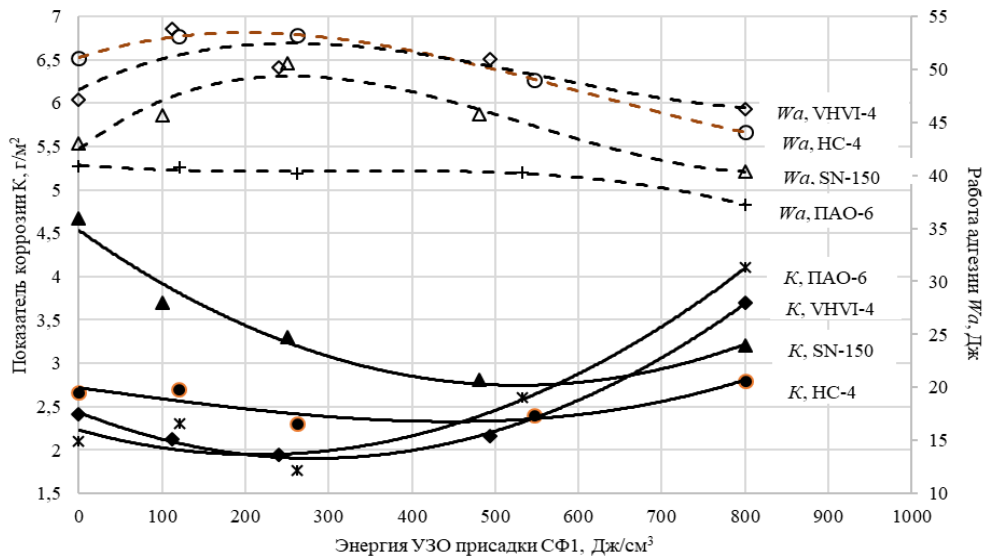
Для оценки влияния базового масла, используемого в качестве растворителя, и энергии УЗО на антикоррозионную активность сульфонатных присадок была определена работа адгезии исследуемых образцов к поверхности стальной пластинки. Работа адгезии ( $W_a$ , Дж) рассчитывалась по уравнению Дюпре–Юнга [29]:  $W_a = \sigma_{г/ж} \cdot (1 + \cos\theta)$ , где  $\sigma_{г/ж}$  – поверхностное натяжение на границе «газ–жидкость» (мН/м);  $\theta$  – краевой угол смачивания.

Поверхностное натяжение определялось при помощи автоматического тензиометра Q2000 при температуре 20 °С с использованием метода Вильгельми. Величина краевого угла смачивания образцами стальной пластинки измерялась при помощи цифрового микроскопа МИКМЕД 5.0 с программным обеспечением для измерения углов с точностью до 0,01°.

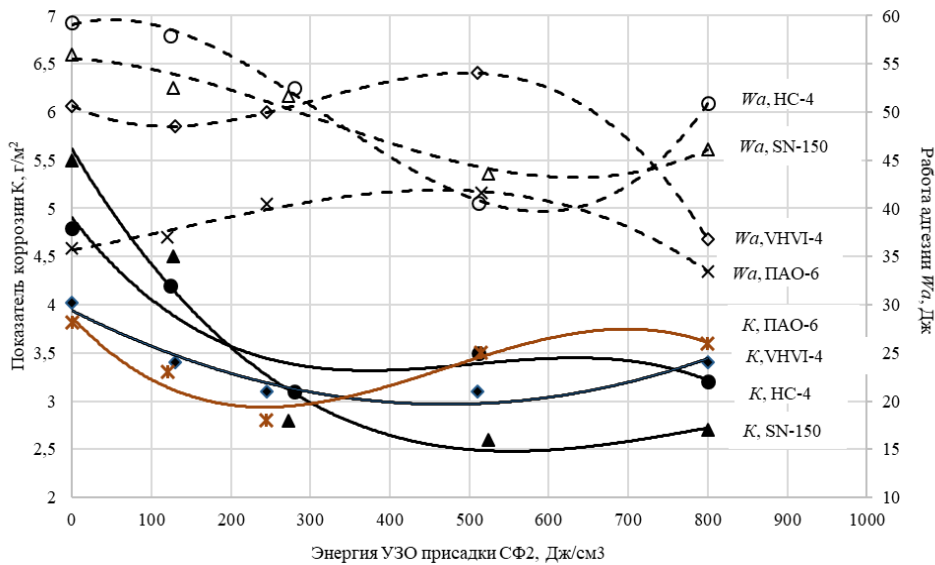
Установлено, что показатель коррозии  $K$  при использовании в качестве растворителя базовых масел снижается в ряду SN-150 > HC-4 > VHVI-4 > ПАО-6 и для низко-, и для высокощелочной сульфонатной присадок. При этом работа адгезии максимальна у образцов с маслом HC-4 и минимальна у образцов с маслом ПАО-6.

<sup>1</sup> ГОСТ 9.054-75. Единая система защиты от коррозии и старения. Консервационные масла, смазки и ингибированные пленкообразующие нефтяные составы. Методы ускоренных испытаний защитной способности. – М., 1976. – 11 с.

Вероятно, это связано с величиной поверхностного натяжения как исходных базовых масел, так и их смесей с сульфонатными присадками. Коэффициент поверхностного натяжения у исходных базовых масел уменьшается в ряду  $SN-150 \approx HC-4 > VHVI-4 > ПАО-6$  (см. таблицу 1). После введения в базовые масла сульфонатных присадок у всех образцов коэффициент поверхностного натяжения увеличивается. При добавлении к базовым маслам  $SN-150$ ,  $HC-4$ ,  $VHVI-4$  и  $ПАО-6$  5% масс. присадки СФ1 поверхностное натяжение увеличилось соответственно на 0,5; 0,6; 0,8 и 1,1 мН/м, а при добавлении присадки СФ2 – соответственно на 0,3; 0,4; 0,6 и 0,9 мН/м. Полученный результат можно объяснить различной растворяющей способностью базовых масел по отношению к сульфонатным присадкам. В отличие от других масел базовое масло ПАО-6 имеет однородную молекулярную структуру, образованную молекулами полиальфаолефинов, и обладает наименьшим коэффициентом поверхностного натяжения и низкой растворяющей способностью по отношению к присадкам. В связи с чем компоненты присадок концентрируются на поверхности раздела фаз.



**Рисунок 1. – Влияния энергии УЗО низкощелочной сульфонатной присадки СФ1 на показатель коррозии (сплошные линии) и величину работы адгезии (штриховые линии) ее смесей в базовых маслах**



**Рисунок 2. – Влияния энергии УЗО высокощелочной сульфонатной присадки СФ2 на показатель коррозии (сплошные линии) и величину работы адгезии (штриховые линии) ее смесей в базовых маслах**

Предполагается, что УЗО сульфонатных присадок приводит к увеличению дисперсности и поверхностной активности содержащихся в них частиц дисперсной фазы. В результате после добавления их в базовое масло происходит формирование более плотного и структурированного защитного слоя на поверхности металла. Данная гипотеза подтверждается результатами изучения влияния УЗО сульфонатных присадок перед введением их в базовые масла на работу адгезии полученных растворов. Так, при УЗО низкощелочной присадки СФ1 с удельной энергией ниже  $500 \text{ Дж/см}^3$  работа адгезии увеличивается, а показатель коррозии стальной пластинки уменьшается. При более высокой энергии УЗО наблюдаются тенденция к снижению работы адгезии присадки СФ1 к стальной пластинке и увеличение ее показателя коррозии. Вероятно, это связано с балансом сил межмолекулярного взаимодействия компонентов присадки между собой и с поверхностью металла. Увеличение энергии УЗО присадки приводит к образованию более прочных связей между ее компонентами, а возможно, и разрыву химических связей, что приводит к снижению их поверхностной активности по отношению к стали.

Важным фактором, влияющим на данный процесс, является также баланс сил межмолекулярного взаимодействия между компонентами присадки и базового масла. В частности, при введении в базовое масло ПАО-6, обладающее самой низкой растворяющей способностью по сравнению с другими маслами, присадки СФ1 с увеличением энергии УЗО минимальный показатель коррозии стальной пластинки наблюдается при энергии УЗО около  $250 \text{ Дж/см}^3$ . При дальнейшем увеличении энергии УЗО значения показателя коррозии стальной пластинки интенсивно растут. При этом работа адгезии снижается незначительно.

В то же время у образца с базовым маслом SN-150, предположительно обладающим наиболее высокой растворяющей способностью по отношению к присадкам, минимум показателя коррозии стальной пластинки наблюдается при энергии УЗО присадки СФ1 около  $500 \text{ Дж/см}^3$ , а максимум работы адгезии при энергии УЗО около  $250 \text{ Дж/см}^3$ . При этом по сравнению с другими базовыми маслами показатель коррозии вначале резко снижается до минимума, а затем плавно увеличивается.

Для растворов в базовых маслах высокощелочной присадки СФ2 с увеличением энергии УЗО прослеживается более сложная зависимость изменения показателя коррозии стальной пластинки. При этом общие тенденции изменения показателя коррозии и работы адгезии, наблюдаемые при УЗО присадки СФ1, сохраняются, т.е. с увеличением значения работы адгезии показатель коррозии стальной пластинки снижается.

Сравнительный анализ полученных результатов показал, что величина работы адгезии присадки СФ2 в маслах SN-150, HC-4 и VHVI-4 выше, чем присадки СФ1. Однако показатель коррозии стальной пластинки при этом тоже выше. По-видимому, это связано с различной антикоррозионной активностью компонентов присадок, их содержанием и распределением в базовом масле. Основным компонентом, определяющим антикоррозионную активность синтетических сульфонатных присадок, являются диалкилбензолсульфокислоты кальция, способные к хемосорбции с поверхностными атомами металла. В силу этого ингибитор действует как донор электронов, а металл – как их акцептор.

Чем выше щелочное число сульфонатной присадки, тем больше содержание карбонатов и гидроксидов кальция в ее единице массы. Соответственно в образце раствора присадки в базовом масле меньше содержание диалкилбензолсульфокислот кальция. При нанесении масла с присадкой на стальную пластинку на ее поверхности адсорбируются как диалкилбензолсульфокислоты кальция, так и микрочастицы карбоната кальция, которые по данным [30] также являются эффективным ингибитором коррозии стали в воде.

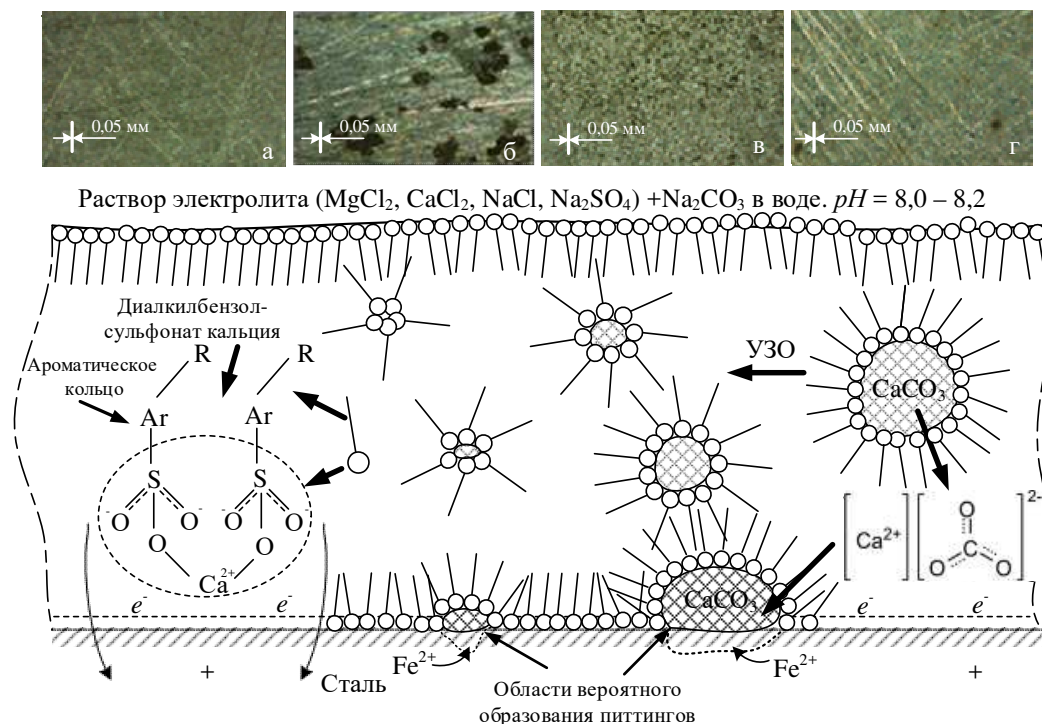
Вероятно, антикоррозионная активность минеральных микрочастиц карбоната и диалкилбензолсульфокислот кальция различны, что приводит к неоднородности образующегося на поверхности металла защитного слоя. При этом коррозия начинается в местах дефектов защитной пленки при достижении определенного электрического потенциала на поверхности металла. Данная гипотеза подтверждается результатами анализа микроструктуры поверхности стальных пластинок после выдерживания их в растворе электролита. На поверхности пластинок отмечено протекание питтинговой коррозии. При этом на пластинках, покрытых раствором высокощелочного сульфоната кальция СФ2 без УЗО, наблюдается наличие крупных питтингов (рисунок 3, б). После УЗО присадки СФ2 размер питтингов на поверхности стали существенно уменьшается (рисунок 3, в). При использовании в качестве ингибитора коррозии низкощелочной сульфонатной присадки СФ1 как до, так и после УЗО на поверхности стальных пластинок наблюдаются единичные следы питтинговой коррозии (рисунок 3, г).

Одной из основных причин протекания питтинговой коррозии является содержание в воде хлорид-ионов. Эти ионы разрушают защитную пассивную пленку на поверхности металла, переводя их в водорастворимые хлориды. Механизм действия ингибиторов коррозии достаточно сложен и имеет электрохимическую природу. Адсорбируясь на поверхности металла ингибитор снижает его отрицательный потенциал, замедляя тем самым процесс коррозии. Активная группа сульфонатных присадок обладает электронодонорными свойствами по отношению к металлу, поэтому сульфонаты относятся к ингибиторам анодного действия.

Карбонат кальция обычно не образует защитной пленки непосредственно на аноде и не относится к ингибиторам анодной коррозии. Он выступает в качестве физического барьера, уменьшая контакт металла с агрессивными веществами и тем самым препятствует коррозии. Растворимость карбоната кальция зависит от pH среды. Она имеет тенденцию осаждаться в щелочных условиях (например, вблизи катода) и растворяться в кислых условиях (например, вблизи анода), т.е. карбонат кальция действует как катодный ингибитор коррозии. Такое поведение может влиять на общий процесс коррозии, но непосредственно не подавляет анодную реакцию

[28; 31]. В некоторых случаях осаждение карбоната кальция происходит преимущественно на катодных участках поверхности металла, где протекают реакции восстановления. При этом отмечается локальное образование защитного слоя, который способен снизить скорость коррозии. Такие процессы наблюдаются при взаимодействии в водной среде бикарбоната кальция с кислородом и гидроксид-ионами. Образующаяся на стали карбонатная пленка всегда содержит в себе оксиды железа [30].

Схематически распределение сульфоната и карбоната кальция на поверхности металла и в масляной пленке и их взаимодействие с поверхностью металла представлено на рисунке 3.



*а* – стальная пластинка до испытания; *б* – стальная пластинка, покрытая раствором высокощелочного сульфоната кальция СФ2 в базовом масле НС-4, после испытания; *в* – стальная пластинка, покрытая раствором высокощелочного сульфоната кальция СФ2 после УЗО в базовом масле НС-4, после испытания; *г* – стальная пластинка, покрытая раствором низкощелочного сульфоната кальция СФ1 в базовом масле НС-4, после испытания

**Рисунок 3. – Фотографии поверхностей стальных пластинок до и после выдерживания в растворе электролита и предполагаемая схема распределения сульфоната и карбоната кальция на поверхности стали и в масляной пленке**

Важным фактором, влияющим на антикоррозионную активность сульфонатных присадок, является характер распределения сульфоната и карбоната кальция на поверхности металла и в масляной пленке. Диалкилбензолсульфонокислоты кальция как основные активные компоненты сульфонатных присадок представляют собой маслорастворимые поверхностно-активные вещества, т.е. состоят из дифильных молекул. При введении в базовое масло эти молекулы устремляются к поверхности раздела фаз, где ориентируются гидрофильной группой в сторону полярной фазы (поверхности металла), а олеофильным углеводородным радикалом – в сторону неполярной фазы (базового масла). Также они устремляются на межфазную границу, обладающую свободной поверхностной энергией. При нанесении раствора присадки на поверхность стальной пластинки этой границей является поверхность раздела фаз «воздух–базовое масло», а после опускания пластинки в раствор электролита – поверхность раздела фаз «водный раствор солей–базовое масло». Присадка в базовое масло вводится в количестве значительно выше критической концентрации мицеллообразования. Следовательно, в масляной фазе будут образовываться обратные мицеллы, диаметр которых по данным [13] около 1,7 нм. Однако, помимо диалкилбензолсульфонокислот кальция, в сульфонатных присадках присутствуют минеральные компоненты. В низкощелочной сульфонатной присадке содержится аморфный гидроксид и карбонат кальция с размером частиц от 2,0 до 10,8 нм, а в высокощелочной карбонаторированной присадке – кристаллические модификации карбоната кальция с размером частиц от 33 до 36 нм [13].

Минеральные компоненты сульфонатных присадок представляют собой твердые частицы дисперсной фазы, вокруг которых формируется сольватный слой из молекул диалкилбензолсульфонокислот кальция. В результате образуются обратные мицеллы с твердым ядром. В связи с более низкой седиментационной устойчи-

востью таких мицелл они могут оседать и адсорбироваться на поверхности металла, нарушая однородность защитной пленки из молекул диалкилбензолсульфокислот кальция. Несмотря на наличие ионной связи между ионом кальция и карбонат-ионом, у карбоната кальция дипольные моменты отдельных связей внутри карбонат-иона в значительной степени компенсируются, что приводит к очень слабому или отсутствующему общему дипольному моменту молекулы. Таким образом, карбонат кальция является неполярным веществом и слабо адсорбируется на поверхности металла, что нарушает однородность защитной пленки на ее поверхности, в связи с чем это может потенциально стать причиной образования питтингов на поверхности стали.

Под влиянием УЗО происходит диспергирование ядер, разрушение имеющихся в присадке мицелл, а затем образование новых полидисперсных мицелл меньшего размера. Известно, что увеличение дисперсности частиц приводит к росту их удельной поверхности. Следовательно, для образования вокруг них сольватного слоя требуется большее количество молекул диалкилбензолсульфокислот кальция. При воздействии ультразвука на поверхности частиц карбоната кальция появляются электрические силы, способствующие их притяжению и агрегации друг с другом [32]. Молекулы диалкилбензолсульфокислот кальция препятствуют снижению агрегативной устойчивости частиц карбоната кальция, адсорбируясь на их поверхности. В связи с этим можно ожидать, что после воздействия УЗО на сульфонатную присадку при ее смешивании с базовым маслом будут иметь место диспергирование образующихся мицелл и их коагуляция. Преобладание тех или иных процессов при формировании мицелл, вероятно, связано как с энергией УЗО сульфонатной присадки и ее щелочного числа, так и растворяющей способности базового масла.

**Заключение.** Синтетические диалкилбензолсульфонаты кальция обладают достаточно высокими антикоррозионными свойствами по отношению к низкоуглеродистой стали. С увеличением щелочного числа сульфонатных присадок их защитные свойства снижаются. Ультразвуковая обработка сульфонатных присадок является эффективным способом повышения их антикоррозионной активности в растворах базовых масел. Под воздействием ультразвуковых колебаний происходит диспергирование частиц дисперсной фазы, содержащихся в сульфонатных присадках, сопровождающееся улучшением их антикоррозионных свойств. Выявлена взаимосвязь антикоррозионной активности растворов сульфонатных присадок с величиной работы адгезии к поверхности стальной пластинки и размерами формирующихся мицелл. Чем выше величина работы адгезии к защищаемой поверхности и выше дисперсность присадки, тем выше ее антикоррозионная активность.

Выявлена закономерность изменения антикоррозионной активности и работы адгезии по отношению к поверхности низкоуглеродистой стали в зависимости от величины удельной энергии, переданной образцу сульфонатной присадки ультразвуковыми волнами. Определена оптимальная удельная энергия ультразвуковых волн, при которой антикоррозионная активность сульфонатных присадок максимальна. Изучено влияние вида базовых масел, в которых проводилось растворение сульфонатных присадок, на их антикоррозионную активность. Установлено, что защитные свойства раствора сульфонатных присадок в базовых маслах увеличиваются в ряду SN-150 < HC-4 < VHVI-4 < ПАО-6.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Попова А.А. Методы защиты от коррозии: курс лекций. – СПб.: Лань, 2022. – 272 с.
2. Ингибиторы коррозии (обзор) / Л.С. Козлова, С.В. Сибилева, Д.В. Чесноков и др. // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 2. – С. 67–75. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-67-75
3. Pandian B.R., Mathur G.S. Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media (review) // Materials Letters. – 2008. – V. 62. – № 1(15). – P. 113–116. DOI: 10.1016/j.matlet.2007.04.079
4. Tang Z. A review of corrosion inhibitors for rust preventative fluids // Current Opinion in Solid State & Materials Science. – 2019. – 23(4). – P. 20. DOI: 10.1016/j.cossms.2019.06.003
5. Ways to improve the anticorrosive properties of motor oils used in vehicles / Z. Alimova, R. Akhmatjanov, N. Kholikova et al. // E3S Web of Conferences. International Scientific Conference “Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering” (CONMECHYDRO – 2021). – 2021. – V. 264. – 05004. DOI: 10.1051/e3sconf/202126405004
6. Антикоррозионные свойства сульфонатных присадок / Г. Аннаев, А.А. Ермак, Н.А. Советников и др. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2024. – № 1(49). – С. 107–111. DOI: 10.52928/2070-1616-2024-49-1-107-111
7. Ghanbarzadeh A., Akbarinezhad E. Sulfonation of base oils as corrosion inhibitor for temporary protection of steel in atmospheric environment // Progress in Organic Coatings. – 2006. – V. 56, № 1. – P. 39–45. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2006.01.017
8. Теоретические основы химмотологии / под ред. А.А. Браткова. – М.: Химия, 1985. – 320 с.
9. Шехтер Ю.Н., Крейн С.Э., Калашников В.П. Маслорастворимые сульфонаты (производство и применение). – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 127 с.
10. Guidelines on the Use of Traditional Organic Sulfonate Corrosion Inhibitors / S. Fan, Ch. Zhou, L. Tan et al. // Handbook of Research on Corrosion Sciences and Engineering. – 2023. – P. 434–455. DOI:10.4018/978-1-6684-7689-5.ch016
11. Sulfonate additives in lubricating oils / P.Sh. Mammadova, I.D. Kulaliyev, K.A. Salmanova et al. // Azerbaijan Chemical Journal. – 2023. – No. 4. – P. 48–54. DOI: 10.32737/0005-2531-2023-4-48-54
12. Якимова С.М., Песковец А.В., Багдасаров Л.Н. Оценка эффективности работы сульфонатных присадок в смазочных маслах // Мир нефтепродуктов. – 2024. – № 2. – С. 66–70. DOI: 10.32758/2782-3040-2024-0-2-66-70
13. Calcium carbonate phase transformations during the carbonation reaction of calcium heavy alkylbenzene sulfonate overbased nanodetergents preparation / Zh. Chen, Sh. Xiao, F. Chen et al. // Journal of Colloid and Interface Science. – 2011. – 359. – P. 56–67. DOI: 10.1016/j.jcis.2011.03.086

14. Ермак А.А., Фонин М.Ф., Гришин П.Ф. Нефтяные дисперсные системы: учеб. пособие. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2023. – 184 с.
15. Recent advances of ultrasound applications in the oil and gas industry / J. Mierez, M. J. Al Tammar, K. M. Alruwaili et al. // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2024. – V. 103. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2024.106767
16. Клокова Т.П., Володин Ю.А., Глаголева О.Ф. Влияние ультразвука на коллоидно-дисперсные свойства нефтяных систем // *Химия и технология топлив и масел*. – 2006. – № 1(42). – С. 43–46. DOI: 10.1007/s10553-006-0026-у
17. Прачкин В.Г., Галаяудинов А.Г., Баранов Д.А. Изменение коллоидно-дисперсных свойств нефтяных систем с использованием ультразвукового воздействия // *Нефтепромысловое дело*. – 2015. – № 6. – С. 58–63.
18. Верховых А.А., Вахитова А.К., Елпидинский А.А. Обзор работ по воздействию ультразвука на нефтяные системы // *Вестник технологического университета*. – 2016. – Т. 19, № 8. – С. 37–42.
19. Research on Mechanism and Characteristics of Oil Recovery from Oily Sludge in Ultrasonic Fields. / X. Luo, H. Gong, Z. He et al. // *Journal of Hazardous Materials*. – 2020. – V. 399. – 123137. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123137
20. Recent Advances in Applications of Power Ultrasound for Petroleum Industry / X. Luo, H. Gong, Z. He et al. // *Ultrasonics – Sonochemistry*. – 2021. – V. 70. – 105337. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105337
21. Innovations in Oil Processing: Chemical Transformation of Oil Components through Ultrasound Assistance / A.V. Dengaev, M.A. Khelkhal, A.A. Getalov et al. // *Fluids*. – 2023. – V. 4(8). – 108. DOI: 10.3390/fluids8040108
22. Оценка влияния ультразвуковой обработки моторного масла на износ пар трения при длительных износных испытаниях / А.А. Симдянкин, А.М. Давыдкин, М.Н. Слюсарев и др. // *Вестник Мордовского университета*. – 2018. – № 4(28). – С. 583–602. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201804.583-602
23. Иванов М.Г., Иванова Д.М., Бурая И.В. Закономерности изменения антикоррозийной активности сульфонатных присадок в полиальфоолефиновом масле под действием ультразвука // *Бутлеровские сообщения*. – 2022. – Т. 72. № 11. – С. 106–113. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/22-72-11-106
24. Цветков О.Н. Поли-А-Олефиновые масла: химия, технология и применение. – М.: Техника: ТУМА ГРУПП, 2006. – 190 с.
25. Вигдорович В.И., Стрельникова К.О. Критерии оценки защитной эффективности ингибиторов коррозии // *Конденсированные среды и межфазные границы*. – 2011. – Т. 13. – № 1. – С. 24–28.
26. Галямов И.И., Галимов М.Р., Андриянов О.П. Моделирование начальной стадии формирования защитного слоя ингибитора коррозии методом молекулярной динамики // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. – 2011. – № 9. – С. 44–45.
27. Шехтер Ю.Н. О механизме действия маслорастворимых ингибиторов коррозии // *Химия и технология топлив и масел*. – 1966. – № 3. – С. 36–40. DOI: 10.1007/bf00729195
28. Брегман Дж.И. Ингибиторы коррозии / пер. с англ. Н.И. Вржосек [и др.]; под ред. проф. Л.И. Антропова. – М.; Л.: Химия [Ленингр. отд-ние], 1966. – 310 с.
29. Люпис К. Химическая термодинамика материалов: [пер. с англ.] / под ред. Н.А. Ватолина, А.Я. Стомахина. – М.: Металлургия, 1989. – 503 с.
30. Коррозионная стойкость оборудования химических производств. Коррозия под действием теплоносителей, хладогентов и рабочих тел / А.М. Сухотин и др.; под ред. А.М. Сухотина, В. М. Беренблит. – Л.: Химия, 1988. – 360 с.
31. Groysman A. Corrosion for Everybody // Springer, Dordrecht. – 2010. – 368 p. DOI: 10.1007/978-90-481-3477-9
32. Synthesis and Surface Modification of Calcium Carbonate Nanoparticles Using Ultrasound Cavitation Technique / N. Shimpi, A. Mali, D. P. Hansora Satyendra Mishra et al. // *Nanoscience and Nanoengineering*. – 2015. – Vol. 3, No. 1. – P. 8–12. DOI: 10.13189/nn.2015.030102

*Поступила 08.01.2026*

## REGULARITIES OF CHANGES IN THE ANTI-CORROSION ACTIVITY OF LOW- AND HIGH-ALKALI SULFONATE ADDITIVES DURING ULTRASONIC TREATMENT IN BASIC OILS OF VARIOUS ORIGIN

**G. ANNAYEV, A. YERMAK**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*The results of the study of the effect of ultrasonic treatment of calcium sulfonate additives on their anticorrosive activity against the surface of low-carbon steel are presented. Ultrasonic treatment of sulfonate additives has been found to be an effective way to increase their anticorrosive activity in base oil solutions. Regularity of change of anticorrosive activity and work of adhesion in relation to surface of low-carbon steel from value of specific energy transferred to sample of sulfonate additive by ultrasonic waves is revealed. The optimal specific energy of ultrasonic waves was determined, at which the anticorrosive activity of sulfonate additives is maximum. Relationship of anticorrosive activity of solutions of sulphonate additives with value of their work of adhesion to surface of steel plate and sizes of forming micelles is revealed. The mechanism of anticorrosive action of sulfonate additives has been clarified. It has been shown, that due to the inhomogeneity of the formed protective film on the surface of steel, the anti-corrosion properties of a high-alkaline sulfonate additive containing a significant amount of calcium carbonate, both before and after sonication, are worse than that of a low-alkaline sulfonate additive.*

**Keywords:** *sulfonate additives, base oils, ultrasonic treatment, adhesion work, anti-corrosion activity.*

УДК 665.77; 544.72

DOI 10.52928/2070-1616-2026-53-1-97-101

**ИЗУЧЕНИЕ СОРБЦИИ ПАРОВ ВОДЫ  
ОБРАЗЦАМИ КАМЕННОГО УГЛЯ И НЕФТЯНОГО КОКСА****Д.С. ЮХНО****ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2610-9832>****канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК****ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4398-1796>****(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)**

*Изложены результаты изучения элементного состава и свойств каменного угля, высокосернистого нефтяного кокса и активированной в токе азота при  $(500 \pm 1)$  °С смеси нефтяного кокса с 30% масс. полиэтилентерефталатом (ПЭТФ). Приведены данные термогравиметрического анализа образцов. Показано, что введение в нефтяной кокс ПЭТФ, с последующей активацией смеси, изменяет характер ее термостабильности, добавляя в среднетемпературную область стадию эндотермической деструкции полимера. Представлены изотермы адсорбции/десорбции паров воды при 20 °С ( $p_0=2,317$  кПа) для исследуемых образцов. Установлено, что исследуемый нефтяной кокс обладает низкой сорбционной способностью по отношению к парам воды. Высокой удельной поверхностью по методу БЭТ и энергией адсорбции паров воды обладает каменный уголь. У активированной смеси нефтяного кокса с ПЭТФ выше удельная поверхность по методу Ленгмюра, но низкая энергия адсорбции паров воды. Это свидетельствует о низкой полярности поверхности образца и способствует протеканию мономолекулярной сорбции молекул воды.*

**Ключевые слова:** каменный уголь, нефтяной кокс, полиэтилентерефталат, активация, адсорбент, сорбция паров воды, очистка воды.

**Введение.** Интенсивная антропогенная деятельность приводит к загрязнению водных ресурсов широким спектром веществ, включая нефтепродукты, тяжелые металлы, органические соединения и различные промышленные выбросы, снижая доступность воды в пригодном для использования качестве. В связи с этим процессы очистки воды в настоящее время имеют важнейшее научно-практическое значение.

Среди множества методов очистки (механических, химических, биологических) сорбционная технология занимает особое место благодаря своей универсальности, высокой эффективности, относительной простоте аппаратного оформления и возможности извлечения ценных компонентов<sup>1</sup> [1; 2]. Качество и экономика процесса сорбционной очистки в решающей степени определяются свойствами применяемого сорбента. Идеальный сорбент должен сочетать высокую емкость и селективность, хорошую кинетику, механическую прочность, доступность сырья и низкую стоимость. В свете принципов устойчивого развития и циркулярной экономики особый интерес представляют материалы, получаемые из возобновляемого или вторичного сырья.

В связи с этим разработка новых эффективных углеродных сорбентов на основе доступного сырья, в частности остатков нефтепереработки и отходов полимерных материалов, и комплексное исследование их адсорбционных свойств для оценки потенциала применения в процессах очистки воды является актуальной задачей.

*Цель проведенных исследований* – сравнительное изучение сорбции паров воды и поверхностных свойств ряда углеродных материалов (каменного угля марки Д (длиннопламенный), высокосернистого нефтяного кокса и его смеси с измельченным бутылочным полиэтилентерефталатом (ПЭТФ), активированной в инертной атмосфере) для оценки их перспектив в качестве сорбентов в водоочистных технологиях.

**Исследовательская часть.** В эксперименте использовались каменный уголь ООО «УЛК «Разрез Аршановский» марки Д, высокосернистый нефтяной кокс процесса замедленного коксования (фракция 1–2,5 мм) и смесь нефтяного кокса с ПЭТФ (30% масс.), активированная в токе азота при 500 °С.

Примененный для эксперимента уголь ООО «УЛК «Разрез Аршановский» марки Д имел содержание общей влаги 13,7% масс., определенное по ГОСТ 11014<sup>2</sup>, зольность 9,4% масс., определенную по ГОСТ 11022<sup>3</sup>, выход летучих веществ 36,9% масс., определенный по ГОСТ 6382<sup>4</sup>, содержание общей серы 0,41% масс., определенное по ГОСТ 8606<sup>5</sup>.

<sup>1</sup> Трусова В.В. Очистка оборотных и сточных вод предприятий от нефтепродуктов сорбентом на основе бурых углей: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / Трусова Валентина Валерьевна. – Пенза, 2014. – 132 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 11014-Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы. Ускоренные методы определения влаги. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 7 с.

<sup>3</sup> ГОСТ 11022-95. Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности. – Мн.: Стандартиформ, 2006. – 8 с.

<sup>4</sup> ГОСТ 6382-2001. Топливо твердое минеральное. Методы определения выхода летучих веществ. – Мн.: Стандартиформ, 2008. – 16 с.

<sup>5</sup> ГОСТ 8606-2015. Топливо твердое минеральное. Определение общей серы. Метод Эшка. – М.: Стандартиформ, 2019. – 22 с.

Образец нефтяного кокса имел свойства, аналогичные образцу, использованному в работе [3]. Элементный состав образцов представлен в таблице 1.

Таблица 1. – Элементный состав образца нефтяного кокса процесса замедленного коксования и каменного угля ООО «УЛК «Разрез Аршановский», марки «Д» (рабочее состояние)

Элемент	Нефтяной кокс, % масс.	Каменный уголь <sup>6</sup> , % масс.
Углерод	90,24	62,34
Водород	3,9426	4,3
Азот	1,48	1,51
Кислород	–	9,22
Фосфор	–	0,78
Хлор	–	0,47
Мышьяк	–	0,002
Марганец	–	0,02
Сера	4,06	0,41
Кремний	0,0301	+
Ванадий	0,0938	–
Железо	0,063	+
Кальций	0,0153	+
Никель	0,0245	–
Медь	0,001	–
Натрий	0,0097	+
Остальное	Микропримеси	Магний, титан, калий и другие микропримеси

Образец смеси нефтяного кокса с ПЭТФ готовился следующим образом. Исходный измельченный нефтяной кокс (с размером частиц менее 100 мкм) смешивался до однородной массы с измельченным бутылочным ПЭТФ с содержанием последнего в смеси 30% масс. при температуре  $(260 \pm 20)$  °С с последующей горячей грануляцией смеси методом экструзии. Затем полученные гранулы подвергались термообработке в трубчатой печи при температуре  $(500 \pm 1)$  °С в среде азота.

ПЭТФ в процессе горячей грануляции смеси с измельченным нефтяным коксом выступает в качестве вяжущего. При активации гранул происходит частичная термическая деструкция ПЭТФ, что приводит к формированию пор в объеме гранул и изменению их термической стабильности. Результаты дифференциального термогравиметрического (ДТГ) анализа образцов в среде воздуха при скорости изменения температуры 10 °С в минуту представлены на рисунке 1.

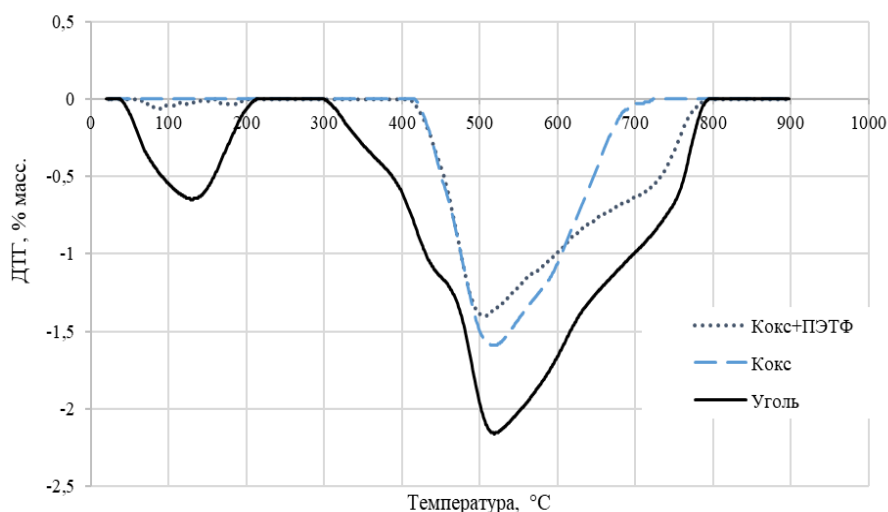


Рисунок 1. – Дифференциальная термогравиметрия (ДТГ) образцов угля, нефтяного кокса и активированной смеси кокса с ПЭТФ

Исследования показали, что наибольшей термической стабильностью обладает нефтяной кокс. Это объясняется тем, что он является продуктом процесса замедленного коксования, проводимого при температуре

<sup>6</sup> Сертификат качества угля. – URL: <https://ra19.ru/wp-content/uploads/2014/09/DPK-70-200-300-r.pdf>

около 500 °С. Наименьшую термическую стабильность имеет образец исследуемого каменного угля, у которого потеря массы наблюдается уже в диапазоне (40–200) °С. Наиболее интенсивная потеря массы угля находится в области (400–750) °С с экстремумом при 520 °С. Общая потеря массы угля объясняется не только высоким содержанием влаги и летучих веществ, но также протеканием процессов окислительного термоллиза угля с выделением дополнительного количества летучих веществ, с получением остатка, который стабилен в области температур (800–900) °С (масса угля не изменяется). При этом общая потеря массы для угля является наибольшей среди трех образцов. Термическая стабильность активированной смеси кокса с ПЭТФ практически идентична нефтяному коксу, т.к. ее активация проводилась при 500 °С. Изменение кривой потери массы активированной смеси нефтяного кокса с ПЭТФ по сравнению с исходным коксом свидетельствует о значительном влиянии продукта термодеструкции ПЭТФ на термическую стабильность образца в воздушной среде. Вероятно, увеличение температуры окончания термоокислительной деструкции кокса при введении в него ПЭТФ связано с высокой термической стабильностью формирующегося при активации гранул продукта карбонизации ПЭТФ.

Проведенный анализ дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) образцов в среде воздуха (рисунок 2) показал для угля наиболее интенсивный, но кратковременный эндотермический процесс, связанный в первую очередь с испарением влаги и десорбцией легких летучих веществ. Наиболее интенсивное поглощение тепла наблюдается около 140 °С. Уже после 230 °С его кривая ДСК переходит в область экзотермических эффектов, что совпадает с началом активной потери массы на кривой ДТГ. Это указывает на низкую термическую стабильность угля, т.е. основные экзотермические реакции окисления начинаются относительно рано.

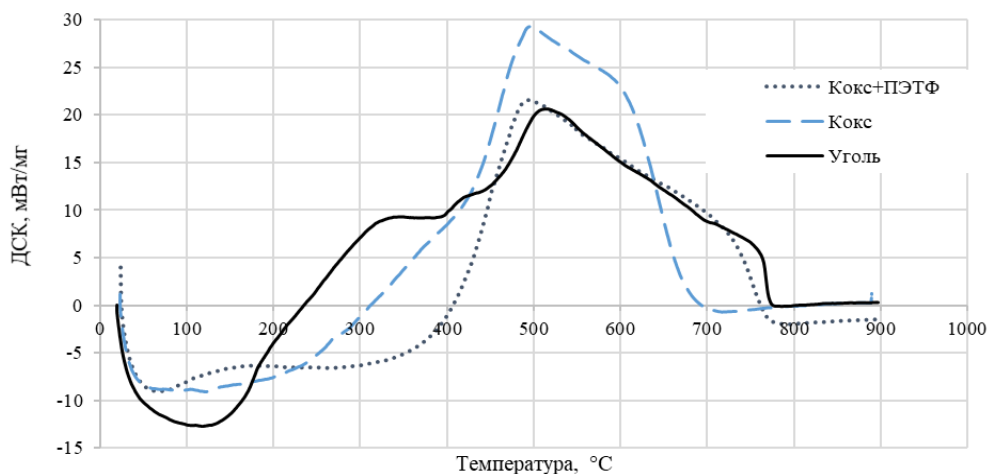


Рисунок 2. – Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) образцов угля, нефтяного кокса и активированной смеси кокса с ПЭТФ

Для нефтяного кокса после незначительного начального экзотермического эффекта наблюдается продолжительный и устойчивый эндотермический процесс, охватывающий диапазон до 300 °С. Хотя абсолютная величина эндотермического эффекта у кокса меньше, чем у угля, его длительность выше. Поскольку потеря массы кокса начинается после 400 °С (согласно кривой ДТГ), при этом количество необходимого тепла для нагрева образца не остается постоянным, а снижается, то, возможно, это соответствует этапу глубокой десорбции остаточных веществ и перестройки углеродной структуры кокса. Последующий экзотермический эффект достигает максимальной интенсивности около 500 °С.

Введение в нефтяной кокс ПЭТФ, с последующей активацией смеси, изменяет характер ее термостабильности, добавляя в среднетемпературную область стадию эндотермической деструкции полимера, что делает общий процесс разложения смеси более сложным по сравнению с коксом. Начальный экзотермический пик может быть следствием реакций на активированной поверхности. В области (300–350) °С наблюдается эндотермический эффект, соответствующий плавлению кристаллической фазы ПЭТФ. Основной экзотермический процесс, интенсивность которого резко возрастает после 400 °С и достигает максимума около 500 °С, соответствует термоокислительной деструкции полимерной составляющей, что согласуется с началом потери массы по ДТГ. Экзотермический эффект у активированной смеси меньше, чем у кокса, однако его длительность выше, что, предположительно, связано с изменением физической структуры и условий протекания реакции окисления после введения в кокс ПЭТФ и последующей активации.

Сорбция паров воды исследуемыми образцами изучалась на приборе BELSORP MAX производства компании MicrotracBEL Corp. (Япония) при температуре 20 °С и давлении ниже давления насыщенного пара  $p_0 = 2,317$  кПа по методике [4].

Полученные изотермы адсорбции/десорбции паров воды свидетельствуют об относительно слабом взаимодействии паров воды с поверхностью образцов. Из рисунка 3 видно, что каменный уголь имеет более высокую емкость по адсорбции паров воды на грамм исследуемого образца, чем нефтяной кокс и его активированная смесь с ПЭТФ.

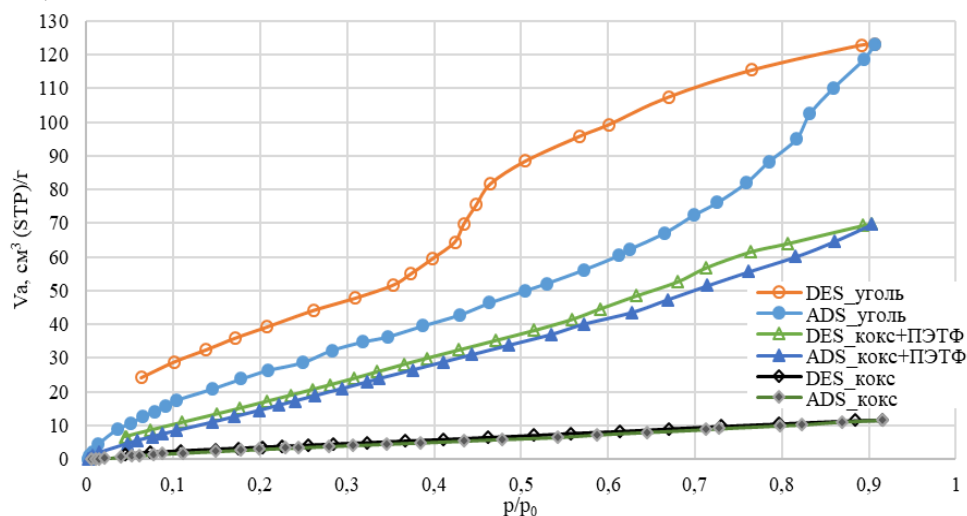


Рисунок 3. – Изотермы адсорбции (ADS) и десорбции (DES) паров воды при 20 °С образцов угля, нефтяного кокса и активированной смеси кокса с ПЭТФ

Обработка изотерм адсорбции/десорбции исследуемых образцов проводилась с использованием аналитического программного обеспечения BELMaster MicrotracBEL Corp. Результаты анализа представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Характеристики исследуемых образцов

Показатель	Наименование образца		
	Уголь	Кокс	Кокс + ПЭТФ
Удельная поверхность по методу БЭТ, м <sup>2</sup> /г	92,41 (R <sup>2</sup> =0,99)	13,544 (R <sup>2</sup> =0,99)	77,07 (R <sup>2</sup> =0,99)
Объем пор (БЭТ), см <sup>3</sup> (STP)/г	27,516	4,033	22,949
Средний диаметр пор, нм	4,3	2,8	2,9
Коэффициент C в уравнении БЭТ	11,63	5,82	4,15
Удельная поверхность по методу Ленгмюра, м <sup>2</sup> /г	211,24 (R <sup>2</sup> =0,98)	44,93 (R <sup>2</sup> =0,96)	842,35 (R <sup>2</sup> =0,96)
Объем пор (Ленгмюр), см <sup>3</sup> (STP)/г	62,899	13,379	250,82
Константа B в уравнении Ленгмюра	1,6323	0,6363	0,0133
Энергия адсорбции по методу Дубинина–Астахова (ДА), кДж/моль	9,392	5,382	2,1433

Примечание. STP (Standard temperature and pressure) – 273,15 К, 101,3 кПа.

Установлено, что исследуемый нефтяной кокс обладает низкой сорбционной способностью по отношению к парам воды и имеет средний размер пор по методу БЭТ около 2,8 нм. У активированной смеси нефтяного кокса с ПЭТФ наблюдаются высокая удельная поверхность и объем пор по методу Ленгмюра, но низкие энергия адсорбции паров воды по методу Дубинина–Астахова и константа B в уравнении Ленгмюра, характеризующая энергию взаимодействия адсорбата с адсорбентом. Это свидетельствует о низкой полярности поверхности данного образца, что способствует протеканию мономолекулярной сорбции молекул воды. У каменного угля удельная поверхность и объем пор выше по методу БЭТ. При этом у угля больше средний размер пор, равный 4,3 нм, и высокая энергия адсорбции. Учитывая вышесказанное и величины коэффициента C в уравнении БЭТ, характеризующем отношение констант адсорбционного равновесия в первом слое и константы конденсации адсорбата, и коэффициента B в уравнении Ленгмюра, можно утверждать, что поверхность каменного угля обладает большей полярностью по сравнению с образцами на основе нефтяного кокса. Сорбция воды образцом исследуемого каменного угля, вероятнее всего, протекает с конденсацией паров воды в мезопорах.

**Закключение.** Введение в нефтяной кокс ПЭТФ, с последующей активацией смеси в инертной среде, изменяет характер ее термостабильности, добавляя в среднетемпературную область стадию эндотермической деструкции полимера. Нефтяной кокс обладает низкой сорбционной способностью по отношению к парам воды в связи с малыми удельной поверхностью и объемом пор. Высокой удельной поверхностью по методу БЭТ

и энергией адсорбции паров воды обладает каменный уголь. Его поверхность имеет большую полярность по сравнению с образцами на основе нефтяного кокса. Активированная смесь нефтяного кокса с ПЭТФ обладает высокой удельной поверхностью по методу Ленгмюра, но низкой энергией адсорбции паров воды. Это свидетельствует о низкой полярности поверхности образца и способствует протеканию мономолекулярной сорбции молекул воды. Перспективным направлением повышения сорбционной емкости и полярности смеси нефтяного кокса с ПЭТФ, активированной в среде азота, является ее дополнительная активация путем введения полярных функциональных групп.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пашаян А.А., Нестеров А.В. Проблемы очистки загрязненных нефтью вод и пути их решения // Экология и промышленность России. – 2008. – № 5. – С. 32–35.
2. Родионов А.И., Клушин В.Н., Торочешников Н.С. Техника защиты окружающей среды: учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1989. – 512 с.
3. Южно Д.С. Углеродный материал, полученный из нефтяного кокса и отходов полиэтилентерефталата // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2025. – № 2(52). – С. 98–104. DOI 10.52928/2070-1616-2025-52-2-98-104
4. Ермак А.А., Южно Д.С., Гришин П.Ф. Методы активации и изучения свойств сорбентов на основе высокосернистого нефтяного кокса [Электронный ресурс]: метод. указания. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2025. – 106 с.

Поступила 08.01.2026

**STUDY OF WATER VAPOR SORPTION BY SAMPLES  
OF COAL AND PETROLEUM COKE**

**D. YUKHNO, A. YERMAK**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*The article presents the results of a study of the elemental composition and properties of coal, high-sulfur petroleum coke, and a mixture of petroleum coke with 30% by weight of polyethylene terephthalate (PET) activated in a nitrogen stream at  $(500 \pm 1)$  °C. Thermogravimetric analysis data for the samples, are presented. It is shown, that the introduction of PET into petroleum coke, followed by activation of the mixture, changes the nature of its thermal stability, adding a stage of endothermic destruction of the polymer to the mid-temperature region. Water vapor adsorption/desorption isotherms at 20 °C ( $p_0 = 2,317$  kPa) are presented for the studied samples. It was established, that the studied petroleum coke has a low sorption capacity with respect to water vapor. Coal has a high specific surface area according to the BET method and water vapor adsorption energy. The activated mixture of petroleum coke and PET has a higher specific surface area according to the Langmuir method, but a low water vapor adsorption energy. This indicates low polarity of the sample surface and facilitates monomolecular sorption of water molecules.*

**Keywords:** coal, petroleum coke, polyethylene terephthalate, activation, adsorbent, water vapor sorption, water purification.

**CHEMISORPTION-TYPE AMIDE-BASED CORROSION INHIBITORS:  
A REVIEW<sup>1</sup>**

*Doctor of Philosophy, Professor LI YUFENG*

*ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7436-2667>*

*Doctor of Philosophy, lecturer ZENG LIYUN*

*ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9297-9900>*

*(Panzhuhua University, China)*

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor A. YERMAK*

*ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4398-1796>*

*(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)*

*Corrosion, a pervasive phenomenon in both natural environments and industrial processes, poses significant safety hazards and incurs substantial economic losses. Consequently, the study of corrosion mechanisms and anti-corrosion strategies has become a focal point of research. The article discusses metal corrosion inhibitors based on organic amides. The article examines the features of the chemical structure and the presumed mechanism of anticorrosive action on metal surfaces of corrosion inhibitors such as imidazoline, its quaternary ammonium salts, polyamide corrosion inhibitors, and compounds with heterocyclic nitrogen-containing structures. It has been shown, that a promising direction in the development of technology for obtaining metal corrosion inhibitors based on amides is their modification with naturally occurring products.*

**Keywords:** *corrosion, corrosion inhibitor, amide, imidazoline, method of preparation, natural modifiers.*

**Introduction.** Metal materials are extensively utilized in the construction, petroleum, metallurgical, and aerospace industries as a result of their excellent physical-chemical properties and high ductility [1]. Metals are highly active, resulting in an oxide film on the metal surface under the action of an aerobic environment. Metal corrosion is the process by which the action of the surrounding media damages metal materials. Corrosion is a spontaneous chemical reaction that can be divided into chemical corrosion and electrochemical corrosion, according to the reaction mechanism. Whether chemical corrosion or electrochemical corrosion occurs, metallic materials and chemical substances in the environment, such as acids and alkalis, are subject to redox reactions. The oxidation-reduction reactions of metals become stronger over time, and eventually, metals lose their original capacity. Every year, about a quarter of the world's metal products are scrapped due to corrosion. The loss caused by metal corrosion accounts for 30% of its annual output. In industrialized countries, the loss caused by corrosion accounts for about one tenth of the national income, and the maintenance and replacement costs of equipment and pipelines are far more than the cost of materials [2]. Therefore, the study of corrosion and anti-corrosion has important economic significance.

The second important aspect of studying corrosion and corrosion resistance is based on safety. Corrosion has caused many serious casualties, and many accidents involving cars, ships, and airplanes are more or less related to corrosion.

The third area of the importance of studying corrosion and corrosion-proofing is the conservation of resources and the protection of the environment. Because of corrosion, a lot of precious earth resources are wasted. It has been estimated that the world's metal resources are becoming increasingly depleted, and even with an optimistic estimate of 10 times the current reserves plus 50% recycling, the years of maintenance will not be long. The waste of materials is also a waste of energy, because the extraction of metals from ore consumes a lot of energy [3].

Studying corrosion, mastering corrosion, and being expert in anti-corrosion can effectively reduce economic losses, powerfully prevent disasters, and save resources and energy further.

There are many kinds of corrosion inhibitors, which can be classified in different ways. From the perspective of composition and structure, corrosion inhibitors can be divided into organic and inorganic categories. Organic compounds used as inhibitors, occasionally, they act as cathodic, anodic, or together, as cathodic and anodic inhibitors; nevertheless, as a general rule, they act through a process of surface adsorption, designated as a film-forming process. Naturally, the occurrence of molecules exhibiting a strong affinity for metal surfaces compounds showing good inhibition efficiency and low environmental risk. These inhibitors build up a protective hydrophobic film adsorbed molecules on the metal surface, which provides a barrier to the dissolution of the metal in the electrolyte. They must be soluble or dispersible in the medium surrounding the metal [4].

Organic corrosion inhibitors can be classified into nitrogen-containing corrosion inhibitors, sulfur-containing corrosion inhibitors, oxygen-containing corrosion inhibitors, and other types. Nitrogen-containing organic corrosion inhibitors show excellent corrosion inhibition activity because there is an unshared electron pair on the nitrogen atom, so the research on nitrogen-containing organic corrosion inhibitors is in full swing.

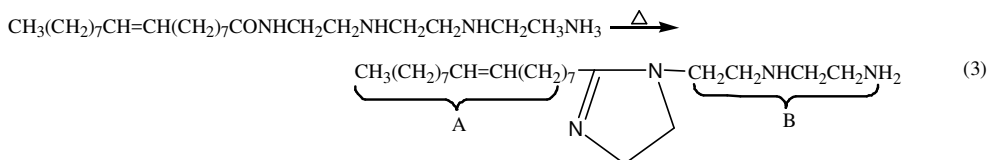
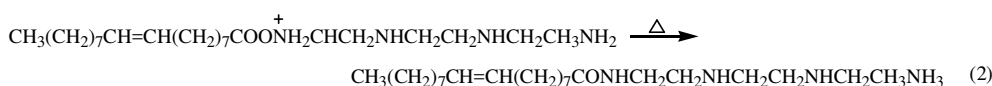
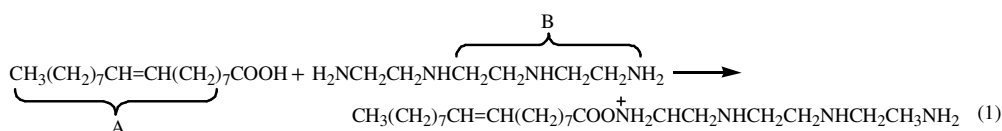
---

<sup>1</sup> This research project has been supported by a grant from the China Scholarship Council (CSC).

**Main part.** The use of corrosion inhibitors is an important means of corrosion protection. It plays an important role in the production, storage, and transportation of oil and gas. Amide-based corrosion inhibitors are widely used because of their superior performance. They can be classified into many types according to their molecular structure and active groups, and each type has unique structural characteristics and corrosion inhibition properties. Understanding these molecular structural characteristics is crucial for the rational design of high-performance corrosion inhibitors.

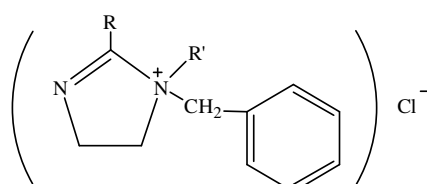
**Imidazoline corrosion inhibitors.** Imidazoline and its derivatives are the most widely used corrosion inhibitors in oil and gas fields, accounting for about 90% of the total corrosion inhibitors [5]. These kinds of corrosion inhibitors are characterized by non-irritating odor, low toxicity, good thermal stability, and easy biodegradation. They can effectively inhibit the overall corrosion and local corrosion of metal in the corrosion environment. The nitrogen atom in the imidazolin ring of its molecular structure, along with adjacent functional groups such as hydroxyl and amino-group, collectively form multiple adsorption centers, which enhance their binding capacity to the metal surface.

Imidazoline corrosion inhibitors are generally formed by the condensation of fatty carboxylic acid and polyamine. First, the fatty carboxylic acid reacts with one of the amino groups in the polyamine and forms a salt. Then, this salt will lose a molecule of water and form an amide when the temperature is above 100°C. At last, the other nitrogen atoms in the polyamine undergo nucleophilic addition reaction to the carbonyl group in the amide group when the temperature rises continuously, and generate nitrogen-containing heterocyclic compounds, that is, substituted imidazoline derivatives. Their structure is related to the structure of fatty groups in carboxylic acids and polyamines. The substituent groups play an important role in determining the corrosion inhibition effect of corrosion inhibitors [6]. Taking oleic acid and triethyltetramine as an example, the reaction process can be expressed as follows:

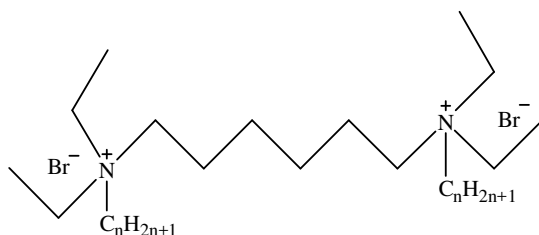


In the example reaction, the product obtained is a derivative of substituted imidazoline. The structure of the substituted imidazoline is influenced by group A in carboxylic acid and group B in polyamines. While group A does not participate in adsorption, its length and structure significantly influence the molecule's water solubility. Group B also contains a nitrogen atom, which not only has an unshared electron pair that can participate in adsorption but also serves as an active center for substitution or nucleophilic addition reactions. A functional group with strong adsorption activity can be introduced onto the nitrogen atom of group B, thereby forming a stronger and more stable adsorption effect with the metal surface.

**Quaternary ammonium salt corrosion inhibitors.** An imidazoline quaternary ammonium salt is formed by quaternization modification treatment through changing the valence of the nitrogen atom on the imidazoline ring to five valence. Imidazolium quaternary ammonium salts exhibit superior corrosion inhibition performance compared to unmodified imidazoline due to the stronger adsorption of N<sup>+</sup> ions on metal surfaces [6]. The quaternary ammonium cation can be strongly adsorbed by the negatively charged metal surface. They are arranged on the metal surface just like they are making the metal surface positively charged, and this makes it difficult for hydrogen ions to approach the metal surface, enhancing isolation, obstructing charge transfer, and decreasing cathodic reaction rate significantly [7]. The basic structure of imidazoline quaternary ammonium salt corrosion inhibitors is shown below [8]:



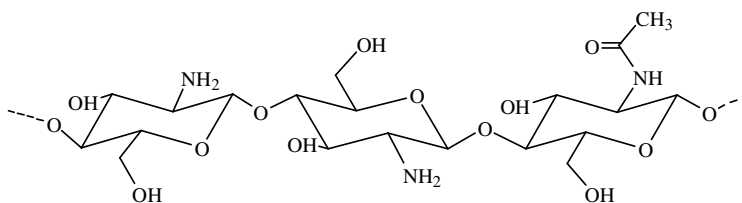
Quaternary ammonium corrosion inhibitors can also be composed of positively charged nitrogen atoms and amphiphilic structures without imidazoline:



They still exhibit relatively good corrosion inhibition effects. In addition, a new type of twin quaternary ammonium salt contains two hydrophilic head groups and two hydrophobic tail groups, connected by the head groups or the spacer groups connected to the head groups. The spacer may have different structures, rigid or flexible, hydrophobic or hydrophilic. The neutral charge of the molecule is maintained by the presence of organic or inorganic anions. Twin quaternary ammonium salts exhibit an exceptionally low critical micelle concentration (cmc), hundreds of times lower than that of their corresponding monomeric surfactants. Twin quaternary ammonium salts have a larger molecular area than monomeric analogues, which makes them more effective as corrosion inhibitors [9].

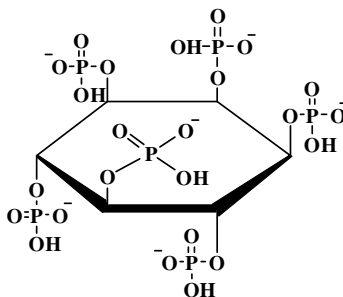
**Natural product modified amide corrosion inhibitors.** According to the chemical structure, the commonly used corrosion inhibitors include inorganic corrosion inhibitors and synthetic organic corrosion inhibitors. These two kinds of corrosion inhibitors are easy to synthesize and apply, and have high corrosion inhibition efficiency at low concentration [10]. But they are highly toxic, not biodegradable, and they will cause potential pollution to the environment. For example, phosphate corrosion inhibitors can lead to eutrophication of water bodies, and this disadvantage greatly limits their development and application prospects [11]. In recent years, global attention has increasingly focused on environmental protection and green development, and researchers have started to explore the anti-corrosion effects of plant and natural product extracts [12]. Plant and natural product corrosion inhibitors are naturally effective components extracted from natural products. Compared with traditional metal corrosion inhibitors, they have the characteristics of being easy to obtain, low cost, green, and environmentally friendly, and have a broad development prospect. Using common analytical methods such as high-performance liquid chromatography (HPLC), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and ultraviolet spectroscopy (UV), it can be known that these natural products are rich in triterpenoid saponins, Gynostemma pentaphyllum alkaloids, flavonoids, and other bioactive components [13]. These compounds contain polar groups centered on nitrogen (N) and oxygen (O), such as -O-H, -C=O, -N-H, -C-O, benzene rings, and aromatic heterocycles, which possess corrosion-resistant functional groups [14]. For example, garlic contains allyl propyl disulphide, mustard seeds contain an alkaloid berberine, which has a long chain of aromatic rings and an N atom in the ring, and, at several places, carrot contains pyrrolidine and castor seed contains the alkaloid ricinine. Eucalyptus oil contains monomentrene-1,8-cineole. Lawsonia extract contains 2-hydroxy-1,4-naphthoquinone resin and tannin, coumarin, gallic acid, and sterols. Gum exudate contains hexuronic acid, neutral sugar residues, volatile monoterpenes, canaric and related triterpene acids, and reducing and nonreducing sugars. Garcinia kola seed contains primary and secondary amines, unsaturated fatty acids, and bioflavonoids. Calyx extract contains ascorbic acid, amino acids, flavonoids, pigments, and carotene. Many of these active ingredients have been used as corrosion inhibitors [15].

Chitosan is a linear polysaccharide of randomly distributed N-acetyl-D-glucosamine and D-glucosamine connected together by a  $\beta$ -1,4-glycosidic linkage:



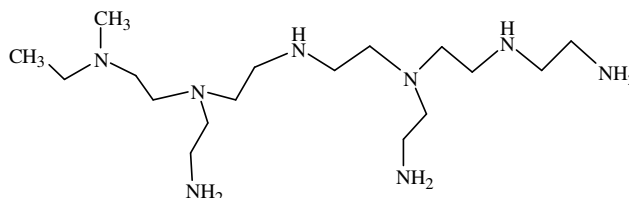
N-Acetyl-D-glucosamine and D-glucosamine are called acetylated and deacetylated units, respectively. Generally, the synthesis of chitosan is achieved by deacetylation of chitin. Chitin is primarily derived from the shells of crustaceans such as shrimp and crabs, the cuticle of insects, and the cell walls of fungi like mushrooms. The anticorrosive effect of chitosan for metals and alloys is widely reported. Because of their natural origin, chitosan-based corrosion inhibitors are considered friendly. Generally, chitosan modified with various organic compounds exhibits a higher corrosion inhibition efficiency than pure chitosan [16].

Phytic acid, which is the hexaphosphate of inositol, is a kind of organic phosphorus compound that exists naturally and widely in the seeds and rhizomes of higher plants:

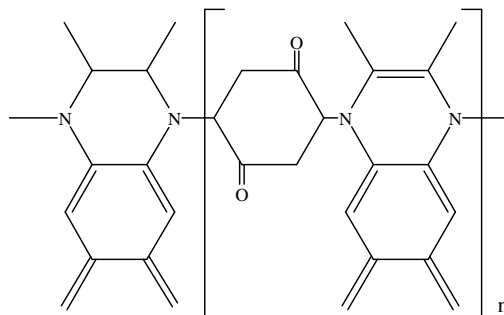


It has the characteristic of chelating metal ions, and it can be used as a corrosion inhibitor. Six phosphate anions linked to inositol can accept or donate up to 12 protons [17], so that it can effectively shield  $H^+$  from metal in the corrosion environment to achieve the effect of corrosion protection. The mixture of phytic acid 13~15g/L, sodium benzoate 11~13g/L, sodium gluconate 11~13g/L, and sodium citrate 3~5g/L was prepared and used as a corrosion inhibitor. This corrosion inhibition rate on carbon steel can reach 95%. [18]

**Polymer corrosion inhibitors.** Polyethyleneimine (PEI) is one of the earliest discovered organic polymers with notable corrosion inhibition properties. The number of methylene groups in its molecular structure influences the bond angles of the  $-C-N-C-$  bonds, thereby affecting its corrosion inhibition capability [19, 20]:

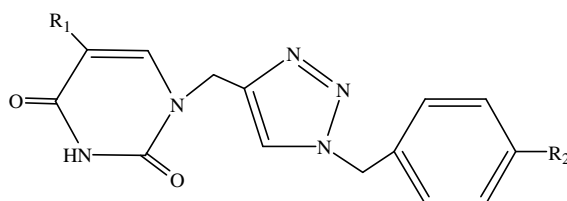


Polyvinylpyrrolidone (PVP) also exhibits excellent corrosion inhibition properties, effectively suppressing the corrosion of aluminum in hydrochloric acid, iron in sulfuric acid, and copper in nitric acid. Polyamine-based benzochinone polymers can be synthesized through the homopolymerization of diamines, triamine, and p-benzoquinone (PAQ). PAQ is a hybrid corrosion inhibitor that significantly reduces the surface penetration current of steel in acidic solutions. It can form a protective film on metal surfaces, with its effectiveness increasing over time. PAQ is suitable for industrial acid washing and secondary oil recovery processes [19]. The structure is as follows:



**Other amide corrosion inhibitors.** In recent years, many novel corrosion inhibitors have been designed and synthesized by researchers. These inhibitors exhibit excellent corrosion inhibition effects, but their structures are complex, and their synthesis routes are intricate.

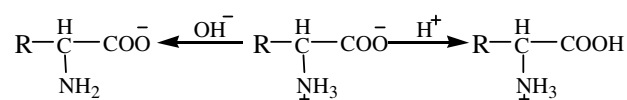
1,2,3-triazoles are present in a number of compounds with assorted biological activities such as anticancer, antibacterial, antifungal, anti-tubercular, and anti-HIV properties. In the last years, the corrosion inhibition of steel in acid solutions by nitrogen-containing heterocyclic compounds has been extensively studied. In this regard, 1,2,3-triazole derivatives are considered to be effective acidic corrosion inhibitors:



New mono-1,2,3-triazole pyrimidine nucleobases were synthesized by copper(I)-catalyzed 1,3-dipolar cycloaddition reactions between N-1-propargyluracil and thymine, sodium azide, and benzyl halides. This compound was investigated as a corrosion inhibitor for steel in 1 M HCl solution, using the electrochemical impedance spectroscopy (EIS) technique. The results indicate that these heterocyclic compounds are promising acidic corrosion inhibitors for steel [21].

Polyamides, which are based on tartaric acid as well as thiourea, are considered promising corrosion inhibitors, with efficiency up to 90.6 % at 250 wppm. Factors affecting the inhibition mechanism are: (i) polyamide with 3 categories of high electron density atoms which are active centers and they donate lone pairs of electrons, hence, polyamide molecules show easy adsorption on the metal surface; (ii) these polyamides show easy production in pure state; and (iii) the polymeric compounds with comparatively high molecular weight are more inhibition efficient than the monomeric compounds [22].

Amino acids have become the research object of metal corrosion because they are non-toxic, non-polluting, and strong corrosion inhibitors. There are approximately 200 types of amino acids in nature, all with the amino and carboxyl groups attached to the same carbon. In neutral solutions, amino acids exist as zwitterions. When the pH of the solution changes, the molecular form of amino acids undergoes corresponding transformations as follows [23]:



In neutral and acidic solutions, amino acid molecules adsorb onto the electrode surface via  $+\text{NH}_3$  (in the cathodic region of a galvanic cell), slowing the cathodic reaction rate and consequently reducing the anodic reaction rate (metal dissolution). In alkaline solutions, amino acid molecules adsorb on the metal surface, suppressing corrosion active sites, decreasing exposed metal surface area, increasing the corrosion potential, and reducing the corrosion current density. Under normal circumstances, the adsorption of amino acid molecules on the metal surface is divided into two steps: first, the amino acid molecules replace the water molecules on the metal surface, and then the amino acid molecules combine with the metal ions formed on the surface to form a metal-corrosion inhibitor clathrate [24].

**Conclusion.** With the attention of human beings to the living environment, the harmlessness of production and life has become a hot topic. Therefore, the production process of corrosion inhibitors and the inhibitors themselves also need to be harmless. In other words, the corrosion inhibitor products themselves are low-toxic and harmless, unpolluting the environment. The production process should not use toxic raw materials and should not discharge by-products that pollute the environment. The whole process is environment friendly and is not harmful to people or living things. Making full use of natural products and rational utilization of industrial wastes is an important way. Another crucial point is to achieve an outstanding product with high effectiveness and considerable economic benefits. A promising direction for the development of technology for obtaining metal corrosion inhibitors based on amides is their modification with products of natural origin.

#### REFERENCES

1. Wang, Q., Wang, R., Zhang, Q., Zhao, Ch., Zhou, X., Zheng, H. & Yan, Z. (2023). Application of Biomass Corrosion Inhibitors in Metal Corrosion Control: A Review. *Molecules*, 28(6), 2832. DOI: 10.3390/molecules28062832
2. Kozlova, L.S. Sibileva, S.V., Chesnokov, D.V. & Kuttyrev, A.E. (2015). Corrosion Inhibitors (Review). *Aircraft Materials and Technologies*, (2), 67–75. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-67-75
3. Weng, Y. (2004). *General theory of material corrosion: fundamentals of corrosion science and engineering*. China: Petroleum Industry Press.
4. Galio, A. & Dariva, C. (2014). *Developments in Corrosion Protection (pp.365–380) 1st Chapter: Corrosion Inhibitors – Principles, Mechanisms and Applications*. London: InTech.
5. Li, Q., Lu, Z.-B. & Zhao, S.-L. (2009). Preparation and Performance Evaluation of Imidazoline Corrosion Inhibitor. *Corrosion and Protection*, 30(5), 303–305+311.
6. Molodkin, S.V., Vinogradov, A.V., Borisov, I.M. & Badikova, A.D. (2025). Study of the Reaction of Fatty Acid Amidation with Polyethylenepolyamines Selection of the Technology for the Production of Substituted Alkylimidazoline. *Bashkir Chemical Journal*, 32(1), 61–66. DOI: 10.17122/bcj-2025-1-61-66
7. Bai, Haitao, Li, Xiangyang & Cui, Yan. et al. (2025). Research progress of organic corrosion inhibitors in CO<sub>2</sub> environment[J]. *Science Technology and Engineering*, 25(16), 6587–6597. DOI: 10.12404/j.issn.1671-1815.2402193
8. Chen, Zhang & Jing-Mao, Zhao. (2014). Synergistic Inhibition Effect of Imidazoline Ammonium Salt and Sodium Dodecyl Sulfate in CO<sub>2</sub> System. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 30(4), 677–685. DOI: 10.3866/PKU.WHXB201402111
9. Brycki, B. E., Kowalczyk, I. H., Szulc, A., Kaczerewska, O. & Pakiet, M. (2018). Organic Corrosion Inhibitors. *Corrosion inhibitors: principles and latest applications*. Poland: Intech Press. DOI:10.5772/intechopen.72943
10. Verma, C., Ebenso, E.E., Bahadur, I. & Quraishi, M.A. (2018). An Overview on Plant Extracts as Environmental Sustainable and Green Corrosion Inhibitors for Metals and Alloys in Aggressive Corrosive Media. *Journal of Molecular Liquids*, (266), 577–590. DOI: 10.1016/j.molliq.2018.06.110

11. Haque, J., Srivastava, V., Verma, C. & Quraishi, M.A. (2017). Experimental and Quantum Chemical Analysis of 2-Amino-3-((4-((S)-2-Amino-2-Carboxyethyl)-1h-Imidazol-2-Yl)thio) Propionic Acid as New and Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in 1M Hydrochloric Acid. Solution. *Journal of Molecular Liquids*, (225), 848–855. DOI: 10.1016/j.molliq.2016.11.011
12. Li, J., Cao, Fengting & Wang, Tiegang, et al. (2024). Current Research Status of Green and Efficient Corrosion Inhibitors. *Materials Protection*, 57(9), 84–96. DOI: 10.16577/j.issn.1001-1560.2024.0205
13. Zhan, Jixu. (2022). Research on Carbon Steel Corrosion Inhibitors Using Gouteng Stem Extract [D]. *Master's Thesis*. Harbin: Harbin Institute of Technology.
14. Wen Chen, Dexing Huang & Feng Wei. (2021). Inhibition Effect of Brainea Insignis Extract Against Carbon Steel Corrosion in HCl Solution. *Journal of Chinese Society for Corrosion and protection*, 41(3), 376–382. DOI: 10.11902/1005.4537.2020.058
15. Chigondo, M. & Chigondo, F. (2016). Recent natural corrosion inhibitors for mild steel: An overview. *Journal of Chemistry*, (1), 6208937. DOI: 10.1155/2016/6208937
16. Verma, C., Ebenso, E. E., Quraishi, M. A. & Hussain, C. M. (2021). Recent developments in sustainable corrosion inhibitors: design, performance and industrial scale applications. *Materials Advances*, 2(12), 3806–3850. DOI: 10.1039/d0ma00681e
17. Brown, E. C., Heit, M. L. & Ryan, D. E. (1961). Phytic Acid: An Analytical Investigation. *Can. J. Chem.*, (39): 1290–1297.
18. Song, Haiyan, Lang, Jifeng & Liu, Guangfa. (2023). A Preparation Method of Green and Efficient Gas Phase Corrosion Inhibitor for Carbon Steel. *CN115584506A*.
19. Qiu, Wen-ge & Chang, Xi-liang. (2003). Development of Polymeric Corrosion Inhibitors. *Journal of Beijing University of Technology*, 29(2), 210–214. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0037.2003.02.022
20. Desai, P. D., Pawar, C. B., Avhad, M. S., & More, A. P. (2023). Corrosion inhibitors for carbon steel: A review. *Vietnam Journal of Chemistry*, 61(1), 15–42. DOI: 10.1002/vjch.202200111
21. González-Olvera, R., Espinoza-Vázquez, A., Negrón-Silva, G. E., Palomar-Pardavé, M. E., Romero-Romo, M. A. & Santillan, R. (2013). Multicomponent Click Synthesis of New 1,2,3-Triazole Derivatives of Pyrimidine Nucleobases: Promising Acidic Corrosion Inhibitors for Steel. *Molecules*, 18(12), 15064–15079. DOI: 10.3390/molecules181215064
22. Migahed, M. A., Aly, R.O. & Al-Sabagh, A.M. (2004). Impact of gamma-ray-pre-irradiation on the efficiency of corrosion inhibition of some novel polymeric surfactants. *Corros. Sci.*, 46(10), 2503–16. DOI: 10.1016/J.CORSCI.2004.01.013
23. Oguzie, E. E., Li, Y. & Wang, F.H. (2007). Corrosion inhibition and adsorption behavior of methionine on mild steel in sulfuric acid and synergistic effect of iodide ion[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, (310), 90–98. DOI: 10.1016/J.JCIS.2007.01.038
24. Tian, Hui-juan, Liu, Xin-hua & Rui Yu-lan. (2009). Progress in Research on Amino Acids as Corrosion Inhibitors in Acid Solutions[J]. *Corrosion & Protection*, 30(3), 186–189.

Поступила 13.01.2026

## ИНГИБИТОРЫ КОРРОЗИИ ХЕМОСОРБЦИОННОГО ТИПА НА ОСНОВЕ АМИДОВ (ОБЗОР)

ЛИ ЮФЭН, ЦЗЭН ЛИЮНЬ  
(Университет Паньчжисхуа, Китай)  
А.А. ЕРМАК

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Коррозия, широко распространенное явление как в природных средах, так и в промышленных процессах, представляет значительную угрозу безопасности и влечет за собой существенные экономические потери. В связи с этим изучение механизмов коррозии и способов борьбы с ней является актуальной задачей. В статье приведен обзор современных ингибиторов коррозии металлов на основе органических амидов, таких как имидазолин, его четвертичные аммониевые соли, полиамидные ингибиторы коррозии и соединения с гетероциклическими азотсодержащими структурами. Рассмотрены особенности их химической структуры и предполагаемый механизм антикоррозионного действия на металлические поверхности. Показано, что перспективным направлением в разработке технологии получения ингибиторов коррозии металлов на основе амидов является их модифицирование продуктами природного происхождения.

**Ключевые слова:** коррозия, ингибитор коррозии, амид, имидазолин, способ получения, природные модификаторы.

## НЕДОСТАТОЧНАЯ ОСВЕДОМЛЕННОСТЬ ВОДИТЕЛЕЙ О МЕРАХ БЕЗОПАСНОСТИ КАК ФАКТОР РИСКА ДЛЯ ЖИЗНИ И ЗДОРОВЬЯ ПРИ ОБРАЩЕНИИ С НЕФТЕПРОДУКТАМИ НА АВТОЗАПРАВОЧНЫХ СТАНЦИЯХ

**И.Н. КУЗЬМЕНОК**

*(Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Минск)*

*канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА*

*ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5025-7419>*

*(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

*Обозначены основные факторы повышенного уровня риска для жизни и здоровья сотрудников, посетителей (водителей и других клиентов) автозаправочных станций при обращении с нефтепродуктами. Представлены результаты комплексного анализа причин аварийных ситуаций, возникающих на автозаправочных станциях; подтверждена их связь с недостаточной осведомленностью водителей транспортных средств о правилах и нормах безопасности при передвижении по территории автозаправочных станций, заправке автомобилей нефтепродуктами. Проанализировано содержание программ подготовки водителей механических транспортных средств в автошколах. Определено, что существующие программы подготовки водителей механических транспортных средств категории «А», «В», «В» и «С», «С», «С» (международные перевозки) требуют внесения изменений в целях повышения компетенций водителей по обеспечению безопасности при заправке транспортного средства. Предложены направления актуализации нормативно-правового обеспечения, нацеленные на повышение безопасности автозаправочных и электрозарядных станций.*

**Ключевые слова:** автозаправочная станция, аварийная ситуация, происшествия, обучение водителей.

**Введение.** В современном мире, где количество автомобилей постоянно растет, развитие рынка автозаправочных станций (АЗС) является актуальной задачей для всех стран. За последнее двадцатилетие количество АЗС общего пользования в Беларуси выросло более чем в два раза и продолжает расти, вместе с тем увеличение оборота топлива на АЗС способствует росту рисков реализации взрывоопасных ситуаций [1; 2].

Сеть АЗС в стране представлена как государственными, так и коммерческими структурами. Для дальнейшего управления процессом развития сети АЗС всех субъектов хозяйствования, а также в целях стабильного обеспечения нефтепродуктами организаций и населения страны правительство Беларуси утвердило Программу развития сети автозаправочных станций в Республике Беларусь, которая предусматривает планомерный количественный рост АЗС – 10...11 ежегодно. С другой стороны, с целью замедлить развитие парникового эффекта, способствующего изменению климата, правительства по всему миру работают над сокращением выбросов углекислого газа, значительная доля которых приходится на автомобильный транспорт.

Электромобили неизбежно проникают в жизнь общества благодаря их эффективности, экономичности и льготам для владельцев таких машин. Электрический транспорт постепенно захватывает автомобильные рынки и Беларуси. Первая электрозарядная станция (ЭЗС) появилась в Минске в 2013 г., а в настоящее время их насчитывается уже более 1000 единиц. С целью создания развитой зарядной инфраструктуры по предоставлению качественных и доступных услуг по зарядке электромобилей Советом Министров Республики Беларусь утверждена Программа создания государственной зарядной сети для электромобилей с учетом увеличения электромобилей в Республике Беларусь до уровня более 25 тыс. единиц и сроком реализации до 2030 г.

Основные тенденции в развитии сети белорусских АЗС аналогичны мировым. Как и во всех развитых странах, в Республике Беларусь основным направлением в их развитии стало создание многофункциональных комплексов, обеспечивающих комфортное, доступное и безопасное обслуживание клиентов в соответствии с мировыми стандартами. Современная АЗС в настоящее время представляет собой сложный автозаправочный комплекс с широким спектром дополнительных услуг для клиентов (станции технического обслуживания автомобилей, подкачки шин, автомойки, магазины, кафе). Расширение функциональности автозаправочных комплексов позволяет повысить экономическую эффективность предприятия и более полно удовлетворить потребности автовладельцев, однако основой таких комплексов продолжает оставаться автозаправочная станция – объект, эксплуатация которого сопряжена с повышенной опасностью возникновения очага возгорания. Функционирование АЗС невозможно без осуществления технологических операций по приему, хранению и выдаче (отпуску) нефтепродуктов, являющихся легковоспламеняющимися либо горючими жидкостями, что обуславливает высокий риск возникновения взрыво- и пожароопасных чрезвычайных ситуаций, способных привести к травмированию, гибели людей и значительному материальному ущербу как на самой АЗС, так и на объектах, прилегающих к ее территории [3].

Большое количество хранимого в резервуарах топлива повышает взрывопожароопасность АЗС. Суммарный объем нефтепродуктов зависит от типа АЗС и колеблется от 120 до 250 тыс. л. Разветвленная система тру-

бпроводов, как и разветвленная система электрических проводов, связывает резервуары с топливораздаточными колонками (ТРК). Опасность для клиентов и сотрудников при пользовании ЭЗС, установленных на территории АЗС, усугубляется повышенным риском воздействия электрического тока, т.к. питание электрорядных устройств осуществляется от общей электросети АЗС, а также фактором «движущийся автотранспорта», воздействие которого может привести как к травматизму, так и к повреждению оборудования.

В настоящее время применяется комплекс мер обеспечения безопасности на АЗС, определяющих порядок действия работников при возникновении аварии, а также способы предупреждения чрезвычайных ситуаций. Безопасность производственного процесса на АЗС обеспечивается выбором конструкции технологического оборудования и его размещения, регулированием режима работы, а также организационными методами: профессиональным отбором и обучением работающих, осуществлением контроля за соблюдением персоналом АЗС требований локальных нормативно-правовых актов [1; 2].

Вместе с тем автовладельцы (водители) не проходят специального обучения по основам обеспечения безопасности на АЗС, учитывающего специфику заправки автомобиля бензином, дизельным топливом или сжиженным углеводородным газом (СУГ), зарядки электромобиля, а также выполнения дополнительных операций (по обслуживанию автомобилей, подкачки шин и т.п.). Данное направление не предусмотрено программой подготовки водителей механических транспортных средств в автошколах. Большая часть автовладельцев регулярно посещающих АЗС, не воспринимает их как объекты повышенной опасности и не задумывается о существующих факторах риска для их жизни и здоровья. Данное обстоятельство определило цель настоящего исследования, которая заключается в анализе причин аварийных ситуаций, возникающих на АЗС, вследствие недостаточной осведомленности водителей транспортных средств о правилах и нормах безопасности при передвижении по территории АЗС, заправке автомобилей нефтепродуктами, зарядке автомобилей электроэнергией.

**Методы исследований.** Для обработки массива статистических данных белорусского предприятия нефтепродуктообеспечения использовались методы математической статистики, метод экспертных оценок и причинно-следственный анализ.

**Результаты и их обсуждение.** По результатам предварительных исследований проблем обеспечения безопасности на АЗС выявлены ведущие факторы повышенного уровня риска для жизни и здоровья сотрудников и пользователей (водителей и клиентов) АЗС [1; 2]. В таблице 1 приведена группировка условий негативного воздействия факторов, которые могут привести к аварийной ситуации, травмированию людей, в т.ч. смертельному, и (или) повреждению технологического оборудования АЗС, транспортных средств автовладельцев.

Таблица 1. – Факторы повышенного уровня риска для жизни и здоровья пользователей на АЗС

Фактор	Условия негативного воздействия фактора
Взрывопожароопасность нефтепродуктов	курение; применение открытого огня; заправка транспортного средства с работающим двигателем; оставление без присмотра заправочного пистолета в горловине бака; невозвращение топливораздаточного крана в ТРК после заправки; разрыв топливного шланга при подъезде к ТРК не со стороны топливного бака; возникновение искры в результате столкновения автомобилей; возникновение искры в результате ремонта автомобиля на АЗС
Взрывоопасность оборудования работающего под избыточным давлением	использование газовых баллонов с истекшим сроком их периодического освидетельствования; нарушение крепления компонентов газобаллонного оборудования; утечка газа из элементов газобаллонного оборудования и в местах их соединений; неиспользование СИЗ защиты рук
Движущийся автотранспорт	превышение установленной скорости движения; несоблюдение дистанции между транспортными средствами в очереди на заправку; нарушение одностороннего движения; подъезд к ТРК не со стороны топливного бака
Повышенное значение напряжения в электрической цепи	эксплуатация ЭЗС: при наличии видимых повреждений корпуса или встроенного зарядного кабеля; при наличии посторонних шумов; во время грозы, дождя; касание неизолированных частей входного соединителя ЭЗС, соединителя батареи или полюсов батареи; использование соединителя ЭЗС с трещинами, коррозией и недостаточным электрическим контактом; распыление воды на оборудование; мытье электромобиля во время зарядки
Повышенный уровень статического электричества	использование под заправку полимерной тары без антистатических свойств; заправка во время грозы; использование под заправку стеклянной тары; использование синтетической одежды

Скоростное ограничение на территории АЗС связано не только с риском наезда на людей, но обеспечением требований правил пожарной безопасности. Столкновение автомобилей может спровоцировать возникновение искры – потенциального источника воспламенения нефтепродуктов. Несоблюдение дистанции между транспортными средствами, стоящими под заправкой, при возникновении чрезвычайной ситуации не позволит

совершить маневр для быстрой эвакуации автомобилей с территории АЗС. Обязательным требованием по эксплуатации АЗС является наличие согласованной с ГАИ схемы движения. Маневры, не предусмотренные имеющейся разметкой и организацией одностороннего движения, приводят к сложности управления транспортом, заторам и аварийно-опасным ситуациям.

Разряд статического электричества способен вызвать воспламенение паров нефтепродуктов при заправке автомобиля, т.к. процесс обеспечения герметичности технологического оборудования, применение существующей системы рекуперации не могут полностью исключить их выделение. Этим обосновывается запрет использования под заправку полимерной тары без антистатических свойств либо стеклянной емкости. Непроводящая ток одежда пользователей АЗС также может привести к накоплению зарядов статического электричества. Также опасен удар молнии, в связи с чем заправка во время грозы транспортного средства категорически запрещена. Кроме того, ремонт автомобиля на АЗС может стать причиной образования искры при трении и накопления заряда статического электричества, неисправная машина сама по себе может представлять угрозу блокирования путей эвакуации. Заправка автомобиля с работающим двигателем увеличивает риск случайного появления искр. Наиболее вероятен риск возникновения искры у длительно эксплуатируемых транспортных средств с удаленным катализатором либо установленным прямоточным глушителем. Пары нефтепродуктов, в частности, бензина с крайне низким нижним концентрационным пределом распространения пламени (около 0,8% об.), способны воспламениться не только от разряда статического электричества, искр, удара молнии, но и от открытого источника огня на АЗС (незатушенная сигарета, спичка, зажигалка и т.п.).

Оставленный без присмотра в горловине бака заправочный пистолет с зафиксированным рычагом способен создать условия для аварийных ситуаций, связанных с проливом нефтепродукта. Если пистолет вставлен в горловину неплотно или топливо подается под повышенным давлением, шланг может выскочить из бака. В результате возникает опасность возгорания залитого нефтепродуктом автомобиля и пролитого под машину топлива. Для заправки автомобиля, установленного у ТРК не со стороны топливного бака, водителям приходится тянуть заправочный шланг, пускать его над крышей, либо «опоясывать» автомобиль. Результатом излишнего натяжения шланга является повреждение и износ оборудования ТРК, а его разрыв влечет утечку топлива, и, как следствие, развитие взрыво- и пожароопасной ситуации. К аналогичной аварийной ситуации приводит забывчивость клиента после заправки автомобиля установить топливораздаточный кран обратно в колонку. Следует отметить, что любое повреждение оборудования на АЗС с участием автомобиля клиента классифицируется как дорожно-транспортное происшествие (ДТП) и документально оформляется инспекторами ГАИ и представителями страховых компаний, которые компенсируют ущерб. В таблице 2 приведена выборка данных по повреждениям оборудования АЗС в результате ДТП белорусского предприятия нефтепродуктообеспечения (статистические данные по ДТП проанализированы по 66 АЗС и фиксировались за период с ноября 2023 г. по ноябрь 2024 г.).

Таблица 2. – Повреждение оборудования на белорусских АЗС в результате ДТП

№	Наименование вида повреждения оборудования	Количество	% от общего
1	Обрыв топливораздаточного пистолета ТРК	508	72,4
2	Повреждение корпуса ТРК	112	16,0
3	Обрыв пистолета ГРК	54	7,8
4	Обрыв топливораздаточного шланга ТРК	6	0,9
5	Срыв муфты топливораздаточного крана ТРК	4	0,6
6	Повреждение поста подкачки шин	3	0,4
7	Повреждение стационарного пылесоса	3	0,4
8	Вывернута катушка топливораздаточного шланга ТРК	2	0,3
9	Повреждение крышки резервуара с нефтепродуктами	2	0,3
10	Повреждение топливораздаточного пистолета ТРК	2	0,3
11	Повреждение носика топливораздаточного пистолета ТРК	1	0,1
12	Повреждение дорожного знака	1	0,1
13	Повреждение корпуса резервуара с нефтепродуктами	1	0,1
14	Повреждение ограждения АЗС	1	0,1
15	Повреждение отбойника возле ТРК	1	0,1
16	Повреждение флагштока	1	0,1
	Итого:	702	100

Анализ повреждений оборудования в результате ДТП показал, что на одной АЗС в среднем ежегодно происходит более 10 происшествий, связанных с повреждением клиентами технологического оборудования, в большинстве случаев (72,4%) связанных с обрывом топливораздаточного пистолета ТРК. Все это подтверждает гипотезу о недостаточной осведомленности водителей транспортных средств о правилах и нормах безопасной эксплуатации АЗС при заправке автомобилей.

В Республике Беларусь ранее осуществлялось обучение только водителей автомобилей, работающих на газовом топливе, по программе курсов целевого назначения по изучению методов безопасной эксплуатации

газового оборудования автомобилей, работающих на сжиженном углеводородном или сжатом природных газах (СУГ)<sup>1,2</sup>. В результате освоения программы слушатель приобретает компетенции, необходимые водителю газобаллонного автомобиля. В соответствии с требованиями<sup>1</sup> перед заправкой автомобильных баллонов оператор автомобильной газозаправочной станции (АГЗС) обязан проверить у водителя наличие документов об установке газового оборудования на автомобиле, права работы на СУГ, обязательного клейма и срока очередного освидетельствования автомобильного баллона. Однако сегодня законодательство не устанавливает требований к подготовке указанных лиц и документам, предъявляемым водителями при заправке автомобилей газовым топливом на АГЗС. Более того, на основании<sup>3</sup> водителям разрешена самостоятельная заправка автомобилей СУГ под визуальным контролем со стороны оператора заправочной станции, рабочее место которого находится в здании АЗС. Определено, что большинство происшествий и аварийных ситуаций в результате самостоятельной заправки газобаллонного оборудования связаны с небрежной или неправильной эксплуатацией данного оборудования ввиду отсутствия у водителя элементарных знаний правил промышленной и пожарной безопасности, а дистанционный контроль оператором АГЗС не позволяет своевременно и быстро реагировать на небезопасные действия водителя.

Кроме того, в Республике Беларусь не определены требования к обучению правилам безопасной эксплуатации ЭЭС водителей электромобилей. В настоящее время значение выходных параметров стандартных ЭЭС составляет: напряжение постоянного тока – 450 В, сила тока – 125 А, что многократно превышает опасные значения пороговых величин поражения электрическим током организма человека. Развитие электромобилей прогнозирует увеличение рабочего напряжения в системе зарядки до 1000 В, что обуславливает необходимость разработки специальных целевых программ обучения владельцев электромобилей.

**Заключение.** Таким образом, безопасность эксплуатационных режимов на АЗС в настоящее время определяется не только неукоснительным соблюдением работниками объекта норм и правил охраны труда, пожарной, промышленной, электробезопасности, дорожного движения, своевременностью обнаружения и устранения неисправностей, но и достаточностью компетенций безопасного поведения на АЗС самих клиентов. Результаты анализа причин происшествий и аварийных ситуаций, возникающих на АЗС, подтвердили их связь с недостаточной осведомленностью водителей транспортных средств о правилах и нормах безопасности при передвижении по территории АЗС, заправке автомобилей нефтепродуктами, что обусловлено отсутствием специальной подготовки и необученностью водителей транспортных средств основным составляющим безопасной эксплуатации АЗС. Названные причины обуславливают необходимость разработки учебно-методических материалов для включения в единые программы подготовки водителей механических транспортных средств и организации и проведения дополнительного обучения водителей основным требованиям безопасности на автозаправочных станциях. Предлагается внести изменения в единые программы подготовки водителей механических транспортных средств категории «А», «В», «В» и «С», «С», «С» (международные перевозки), дополнив:

- тему «Пешеходные переходы и остановочные пункты маршрутных транспортных средств. Преимущество маршрутных транспортных средств. Железнодорожные переезды. Особые условия движения» тематического плана по предмету «Правила дорожного движения» учебного плана подготовки водителей механических транспортных средств направлением «Безопасность на АЗС»;

- текстовую часть раздела «Теоретические занятия» темы «Пешеходные переходы и остановочные пункты маршрутных транспортных средств. Преимущество маршрутных транспортных средств. Железнодорожные переезды. Особые условия движения» абзацем следующего содержания «Движение по территории АЗС. Требования безопасности при заправке транспортного средства моторным топливом. Требования безопасности при зарядке электромобиля»;

- минимальный перечень учебного оборудования кабинетов (классов) и автодрома (мотодрома) для подготовки водителей стендом «Безопасность на АЗС», предусмотрев в комплекте планшетов (плакатов) или визуальных технических средств обучения для проведения занятий по предмету «Правила дорожного движения» наглядные пособия по теме «Безопасность на АЗС».

Для оказания методической помощи преподавателям организаций по подготовке водителей механических транспортных средств и мастерам производственного обучения управлению механическими транспортными средствами категории «А», «В», «В» и «С», «С», «С» (международные перевозки) разработано учебно-методическое пособие по теме «Обеспечение безопасности при заправке транспортного средства».

<sup>1</sup> Эксплуатация автозаправочных станций: Сборник нормативных правовых актов / сост.: В.И. Грушевич. – Минск: ЦОТЖ, 2004. – 135 с.

<sup>2</sup> Об утверждении Положения о порядке выдачи разрешений на право производства работ по переоборудованию автотранспортных средств для работы на газовом топливе: постановление Комитета по надзору за безопасным ведением работ в промышленности и атомной энергетике при МЧС // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2000. – 8/3399.

<sup>3</sup> Об утверждении Правил по обеспечению промышленной безопасности в области газоснабжения: постановление МЧС // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2023. – 8/39537.

Дополнительное обучение водителей транспортных средств позволит предотвратить несчастные случаи с персоналом и клиентами АЗС, повреждение технологического оборудования и транспортных средств в результате ДТП, поражение эклектическим током, снизить риски возникновения пожаро- и взрывоопасных чрезвычайных ситуаций<sup>1</sup>.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьменок И.Н., Булавка Ю.А. Предупреждение аварий при обращении с нефтепродуктами на автозаправочных станциях // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2024. – № 2(56). – С. 72–80.
2. Кузьменок И.Н., Булавка Ю.А. Проблемы обеспечения безопасности при обращении с нефтепродуктами на автозаправочных станциях // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2021. – № 3. – С. 86–91.
3. Поляков В.И. Взрывопожароопасность автомобильных заправочных станций // Охрана и безопасность труда. Практикум. – 2023. – № 02(32). – С. 45–49.

Поступила 16.02.2026

**DRIVERS' LACK OF AWARENESS OF SAFETY MEASURES  
AS A RISK FACTOR TO LIFE AND HEALTH  
WHEN HANDLING PETROLEUM PRODUCTS AT GAS STATIONS**

**I. KUZMENOK**

*(The University of Civil Protection*

*of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk)*

**Y. BULAUKA**

*(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)*

*The article identifies the key factors posing an increased risk to the life and health of employees and visitors (drivers and other customers) at petrol stations when handling petroleum products. The article presents the results of a comprehensive analysis of the causes of accidents occurring at petrol stations; their connection with a lack of driver awareness of safety rules and regulations when navigating petrol stations and refueling vehicles with petroleum products is confirmed. The content of driver training programs for motor vehicles in driving schools is analyzed. It is determined that existing training programs for drivers of motor vehicles of categories "A", "B", "B" and "C", "C", "C" (international transportation) require amendments in order to enhance drivers' competencies in ensuring safety when refueling vehicles. Directions for updating regulatory frameworks aimed at improving the safety of petrol stations and electric charging stations are proposed.*

**Keywords:** gas station, emergency, incident, driver training.

## ПОЗДРАВЛЯЕМ С ЮБИЛЕЕМ

*кандидата технических наук, профессора*  
**АНАТОЛИЯ ИОСИФОВИЧА ГОЛЕМБИЕВСКОГО**



Анатолию Иосифовичу Голембиевскому, профессору кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой 13 октября 2025 года исполнилось 90 лет. И он по-прежнему в строю. Регулярно, исключительно пешком, ходит на работу, преподает, пишет статьи и книги, принимает участие в мероприятиях кафедры и факультета, научных собраниях по защите диссертаций, обсуждении текущих вопросов.

Задумываясь об истоках такого творческого долголетия, надо признать, что, скорее всего, они кроются в его жизненной закалке, целеустремленности и огромном желании постоянно учиться.

Рано осиротев, Анатолий Иосифович воспитывался бабушкой, а затем в Волоколамском детском доме. В связи с этим вспоминается повесть А. Бека «Волоколамское шоссе», написанная в 1942–1944 гг. со слов участников сражений, стоявших насмерть на подступах к Москве. Можно только представить, что пережили свидетели этих сражений и какие последствия они оказали на неокрепшие души тех, кто воспитывался в Волоколамском детском доме.

Окончив ремесленное училище и получив профессию токаря, работал на заводе в г. Долгопрудном Московской области. После срочной службы на Тихоокеанском флоте остался в г. Калининграде. Трудился токарем в порту, на предприятии, учился на вечернем отделении Калининградского технического института (КТИ).

Ключевым стали переход в конце 1960-х гг. на преподавательскую работу в Калининградский технический институт и последующая аспирантура под руководством известного ученого в области технологии машиностроения и металлообработки, члена-корреспондента АН БССР Е.Г. Коновалова. Защита кандидатской диссертации в 1971 г. на материале 14 научных работ и 7 авторских свидетельств обозначила его как ученого-изобретателя. Повышение квалификации в Московском станкоинструментальном институте («Станкин») в 1973–74 гг. познакомило его с передовой научной теорией станков, разработанной школами Г.М. Голвина и А.А. Федотёнка.

В 1975 г. семья Голембиевских переехала в г. Новополоцк. В НИИ, а позднее в Полоцком государственном университете (ПГУ), открылись и были реализованы таланты и способности Анатолия Иосифовича. Прежде всего, как изобретателя СССР, имеющего более 100 авторских свидетельств и патентов. Именно деятель-



ность изобретателя позволила Анатолию Иосифовичу сформировать научное направление по систематизации металлорежущих станков, по которому он работал все последующее время.

Основываясь на научных подходах к формообразованию поверхностей деталей, прежде всего Е.Г. Конова, Г.И. Грановского и А.А. Федотёнка, А.И. Голембиевский исследовал методы и способы ротационной обработки, поверхностного пластического деформирования, тангенциального течения и зубодолбления. Он внес существенный вклад в систематизацию формообразующей обработки на основе фундаментальных математических понятий «образующая» и «направляемость» и классификацию методов обработки по таким признакам, как «касание», «след» и «обкат». Результаты исследований эффекта затирания при зубодолблении позволили предложить ряд технических решений по его устранению. Важно также отметить, что в разработках профессора А.И. Голембиевского предлагаются новые решения с использованием в структурах металлорежущих станков так называемой «укороченной кинематики», замены механических передач на электрические и электронные связи. В конечном итоге, результаты исследований привели А.И. Голембиевского к философскому осмыслению процессов формообразования деталей и к парадигме познаний в области создания металлорежущих станков.

Анатолий Иосифович проявил себя и как опытный методист образовательного процесса. Поэтому в 1997 г. он возглавил учебно-методический отдел университета, а также стоял у истоков создания в университете магистратуры и методического обеспечения образовательного процесса магистрантов.

#### *Анализ ключевых научных и методических концепций*

1. Системология и синергетика в машиностроении. Основным научным достижением А.И. Голембиевского является разработка основ системологии способов формообразующей обработки. В монографиях (2017, 2021 гг.) он представил многообразие способов обработки как большую развивающуюся систему, анализируемую с позиций синергетики (Г. Хакен) и общей теории систем (Л. фон Бергаланфи). Это позволяет применять для анализа и решения новые методы проектной геометрии и теории множеств.

2. Интеграция изобретательства в педагогический процесс. Будучи автором 111 авторских свидетельств и патентов, профессор А.И. Голембиевский применил методологию научно-технической экспертизы изобретений в обучении. Его учебно-методическое пособие (2012) построено на последовательном «изобретении» студентами новых решений, что развивает творческое мышление. Его знаменитый принцип – «Мы должны готовить не статиста, а инженера-творца, инженера-изобретателя!» – стал лейтмотивом педагогической философии.

3. Роль в институциональном развитии вуза. На посту первого начальника учебно-методического отдела (1997–2004) он был основным организатором магистратуры в ПГУ. В условиях отсутствия готовых нормативных документов им была разработана и успешно апробирована модель магистерской подготовки, сочетающая научно-исследовательский компонент (по типу «предаспирантуры») и фундаментальную подготовку по философии и иностранному языку. Его опыт стал тиражируемым для других вузов страны. Он также сыграл значительную роль в успешном прохождении вузом первой аккредитации на университетский статус в 1999 г.

*Педагогическая философия.* Педагогика А.И. Голембиевского основана на нескольких непреходящих принципах:

- преемственность научных парадигм: в лекциях он напрямую связывает развитие станкостроения (от ДИП-200 до станков с ЧПУ) с действием философского закона «отрицания отрицания»;
- опора на фундамент: он подчеркивает необходимость чтения профильных дисциплин учеными, активно работающими на переднем крае своей науки, чтобы знания студентов не устаревали;
- морально-этический императив: критикует «липовое соавторство» и размывание этических рамок, отстаивая чистоту научного творчества.

Его научные монографии опубликованы в Беларуси, России и Германии:

- А.И. Голембиевский. Основы системологии способов формообразующей обработки в машиностроении. – Мн.: Наука и техника, 1986.
- А.И. Голембиевский. Системный анализ процесса зубодолбления. – Мн.: Наука и техника, 1993.
- А.И. Голембиевский. Системология способов формообразующей обработки в машиностроении. – Новополоцк: РИО ПГУ, 2017.
- Голембиевский А. Системология способов формообразующей обработки в машиностроении. – Саарбрюккен (Германия): Academic publishing LAP LAMBERT, 2018.
- Голембиевский А. Эволюция парадигмы познания металлорежущих станков. – Саарбрюккен (Германия): Academic publishing LAP LAMBERT, 2019.

А.И. Голембиевский является лауреатом международной выставки-конкурса научных, технических, учебно-методических изданий и награжден медалью «За верность традициям национального образования» (11 октября 2023 г.).

На Московской международной выставке-презентации в ноябре 2023 г. монографии А.И. Голембиевского награждены медалью «За сохранение традиций национального образования» и дипломом «Лауреат выставки».

Преемственность традиций и современные методы подготовки кадров высоко оценены в университете и Республике Беларусь. Анатолий Иосифович награжден медалью Российской Академии Естествознания имени А. Нобеля за развитие изобретательства, дипломом «Опередивший время», медалью «Сократа» и удостоен награды «Честь и слава университета».



Но Анатолий Иосифович живет не только наукой и преподаванием. Он увлеченно занимается садом, выращиванием элитных сортов плодовых деревьев и растений. Именно в общении с природой он находит вдохновение к занятию наукой.

Научно-педагогический путь профессора Анатолия Иосифовича Голембиевского – это больше чем биография; это живой пример успешного сочетания личного мужества, практического опыта, фундаментальной науки и организаторского таланта. Его вклад в теорию системологии обработки, в становление системы высшего образования Беларуси и, главное, в формирование поколений инженеров-творцов является существенным наследием.

В 90 лет он продолжает выступать как активный проводник научно-образовательного процесса, доказывая, что научное долголетие – это не только протяженность во времени, но и непрерывность интеллектуального роста и актуальности выдвигаемых идей. Его принципы подготовки кадров, основанные на творчестве, изобретательстве и этической чистоте, остаются критически важными для ответа на вызовы новой технологической революции.

*Редакция журнала «Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки» желает уважаемому юбиляру крепкого здоровья и удачи во всех творческих начинаниях!*

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Голембиевский А.И.</i> Тесты способов формообразующей обработки резанием при изучении дисциплины «Металлорежущие станки» .....	2
<i>Попок Н.Н., Кукареко В.А., Хмельницкий Р.С., Кушнеров А.В., Анисимов В.С., Дмитриев С.И.</i> Формирование поверхностей деталей и режущих инструментов с регулярным микрорельефом и износостойким покрытием .....	14

### ТРАНСПОРТ

<i>Ду Сичжоу</i> Рекомендации по размещению зарядных станций для электромобилей .....	24
<i>Андреева Р.А., Дудан А.В., Вигерина Т.В.</i> Перспективы развития производства моторного топлива .....	28
<i>Рынкевич С.А.</i> Высокоавтоматизированные и автономные транспортные средства: перспективы, проблемы и вопросы ответственности .....	34
<i>Иванов В.П., Вигерина Т.В., Мирзатаев Л.С.</i> Оптимизация ремонтного цикла автомобильных агрегатов .....	40
<i>Иванов В.П., Зеньков В.А.</i> Определение технического состояния агрегатов по результатам обследования отдельных деталей .....	46
<i>Фруцкий В.А., Штемпель О.П., Филиппок И.И.</i> Технологии заварки дефектов корпусных деталей двигателей из чугуна .....	51
<i>Богданович С.В., Балтрукович П.И.</i> Разработка алгоритмов когнитивной поддержки принятия решений операторами интеллектуальных транспортных систем на основе анализа типичных стратегий и ошибок мышления .....	56
<i>Шорох Д.В., Шуть В.Н.</i> Применение кассетно-конвейерной технологии скоростных систем городского общественного транспорта для связи городов-спутников с Минском .....	62
<i>Лю Юйвэй</i> Социально-ориентированный подход к выбору приоритетных мер организации движения маршрутного пассажирского транспорта .....	70
<i>Лю Юйвэй</i> Совершенствование метода обеспечения пространственно-временного приоритета маршрутных пассажирских транспортных средств на регулируемых перекрестках .....	77

### ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

<i>Зильберглейт М.А., Морозов Г.А.</i> Практические аспекты применения нейронных сетей и генеративных моделей в обучении студентов химико-технологического профиля (на примере Microsoft Copilot) .....	83
<i>Аннаев Г., Ермак А.А.</i> Закономерности изменения антикоррозионной активности низко- и высокощелочных сульфонатных присадок под действием ультразвуковой обработки в базовых маслах различного происхождения .....	89
<i>Юхно Д.С., Ермак А.А.</i> Изучение сорбции паров воды образцами каменного угля и нефтяного кокса .....	97
<i>Li Yufeng, Zeng Liyun, Yermak A.</i> Chemisorption-type amide-based corrosion inhibitors: a review .....	102
<i>Кузьменок И.Н., Булавка Ю.А.</i> Недостаточная осведомленность водителей о мерах безопасности как фактор риска для жизни и здоровья при обращении с нефтепродуктами на автозаправочных станциях .....	108
<i>Поздравление Анатолию Иосифовичу ГОЛЕМБИЕВСКОМУ</i> .....	113