

MIESIĘCZNIK  
POŁOCKI.

Т о м I.  
Р о к 1818.

№ 10(46), 2022

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

---

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 ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА  
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.

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

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

Подписано к печати 31.08.2022. Бумага офсетная 80 г/м<sup>2</sup>. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Цифровая печать.  
Усл. печ. л. 15,81. Уч.-изд. л. 19,06. Тираж 100 экз. Заказ 503.

## МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9.04:621.833.06-529.001

### СТАНОК С ГИБРИДНЫМИ ФОРМООБРАЗУЮЩИМИ ГРУППАМИ ДЛЯ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС С НАКЛОННЫМИ ЗУБЬЯМИ

*канд. техн. наук, проф. А.И. ГОЛЕМБИЕВСКИЙ*  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

*Рассмотрена структурная схема универсального зубофрезерного станка с гибридными формообразующими группами для обработки цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями. Управляемые координаты (исполнительные органы станка) оснащены индивидуальными управляемыми электродвигателями. Предложена система синхронизации управляемых координат станка на базе типовых интегральных схем. Блок-схема системы синхронизации выполнена на основе принципа равнозначности управляемых координат в обеих формообразующих группах, воспроизводящих соответственно профиль зуба и линию зуба по длине обрабатываемого колеса. Рассмотрена автоматическая двухсторонняя коррекция управляющего сигнала на управляемых координатах, воспроизводящих линию зуба по длине.*

**Ключевые слова:** *структурная схема зубофрезерного станка, станочное зацепление, гибридные формообразующие группы, синхронизация управляемых координат.*

**Введение.** Конструктивная особенность цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями – использование делительного конуса вместо делительного цилиндра, характерного для традиционных зубчатых колес. При использовании делительного конуса толщина зуба вдоль линии зуба равномерно уменьшается от большего основания делительного конуса к его меньшему основанию. Эта конструктивная особенность позволяет регулировать боковой зазор в зубчатых передачах посредством осевого смещения колес. В итоге обеспечиваются в пределах срока службы передачи минимальные величины бокового зазора и циклической ошибки. Такие зубчатые колеса, как с прямыми, так и с винтовыми зубьями, используются в передачах, от которых требуются высокая кинематическая точность и минимальные боковые зазоры.

**Постановка задачи.** Колеса с наклонными зубьями при профилировании обкатом обрабатывают, как правило, на специализированных зубодолбежных и зубофрезерных станках. Для этого на этапе конструирования изменяют компоновку базовых моделей станков данного типа. В частности, изменение компоновки базовой модели зубофрезерного станка выполняется посредством установки вертикальных направляющих для движения суппорта фрезы под углом к оси делительного стола.

Специализация посредством изменения компоновки снижает коэффициенты универсальности и мобильности базовых моделей зубообрабатывающих станков, т.к. их переналадка на иной угол наклона зубьев или обработку традиционных цилиндрических зубчатых колес практически невозможна. Поэтому целесообразно на этапе конструирования использовать кинематического принципа воспроизведения траектории движения червячной по делительному конусу при обработке цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями.

На рисунке 1 приведена схема способа зубофрезерования червячной фрезой цилиндрических колес с наклонными зубьями<sup>1</sup>. По этому способу заготовку  $I$  устанавливают в исходное положение относительно червячной фрезы  $2$ . Причем начальное и конечное положения фрезы в движении  $P_3$  устанавливаются с учетом величины пути  $L$ , который складывается из высоты  $H$  зубчатого венца заготовки, верхнего  $K_1$  и нижнего  $K_2$  перебегов фрезы. Для воспроизведения линии зуба, являющейся направляющей при нарезании червячной фрезой, на делительном конусе  $5$  фрезе  $2$  необходимо сообщать два движения: традиционное для зубофрезерования цилиндрических прямозубых колес с линией зуба на цилиндре движение  $P_3$  продольной подачи и дополнительное радиальное движение  $P_4$ , функционально связанное с движением  $P_3$ . При этом путь дополнительного движения  $P_4$  определяется по формуле

$$l = L \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $l$  – путь дополнительного движения  $P_4$ , мм;  
 $L$  – путь движения  $P_3$ , мм;  
 $\varphi$  – угол наклона зубьев обрабатываемого колеса, град.

<sup>1</sup> Способ нарезания цилиндрических зубчатых колес и станок для его реализации : пат. 6134 Респ. Беларусь / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 29.12.2003.

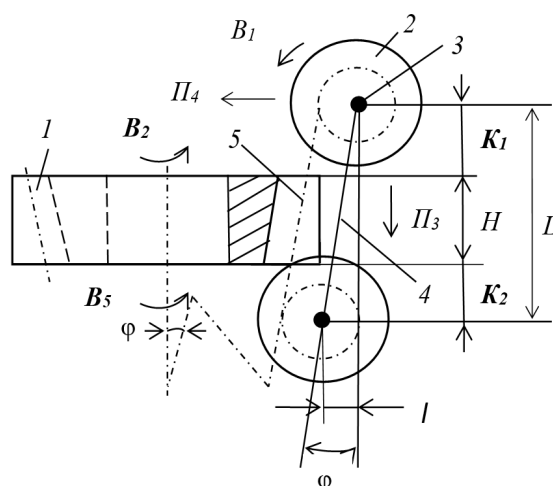


Рисунок 1. – Способ фрезерования цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями

Таким образом, при кинематическом воспроизведении линии зуба на делительном конусе в рассматриваемом способе зубофрезерования линия зуба прямозубого колеса должна воспроизводиться сложным двухэлементарным движением  $\Phi_s(P_3P_4)$  подачи. При этом движение обката  $\Phi_v(B_1B_2)$ , имитирующее зацепление червячной передачи, остается таким же, как в классическом способе зубофрезерования червячными фрезами.

При кинематическом воспроизведении линии зуба на делительном конусе винтового (косозубого) колеса сложное двухэлементарное движение подачи  $\Phi_s(P_3P_4)$  преобразуется в сложное трехэлементарное движение  $\Phi_s(B_5P_3P_4)$ , где дополнительное движение  $B_5$  заготовки в классическом способе обработки винтовых (косозубых) колес согласуется с движением  $P_3$  фрезы.

Структурные схемы зубофрезерных станков с механическими связями, реализующие рассмотренный способ формообразующей обработки, предложены в работах<sup>2</sup> [1; 2]. Кинематические формообразующие группы этих станков по условиям компоновки содержат механические передачи, включая органы настройки параметров исполнительных движений. Основными органами настройки, обеспечивающими функциональную связь между исполнительными органами при заданных передаточных отношениях червячная фреза–заготовка, являются гитары сменных зубчатых колес, расположенные во внутренних связях. Например, кинематическая структура зубофрезерного станка для обработки винтовых (косозубых) колес с наклонными зубьями содержит во внутренней связи двухэлементарной группы воспроизведения профиля зубьев колеса одну гитару сменных зубчатых колес, а во внутренней связи трехэлементарной группы воспроизведения линии зуба по длине – две гитары сменных зубчатых колес. Механические передачи этих связей являются основными источниками погрешностей обрабатываемых зубчатых поверхностей. Поэтому на зубофрезерных станках с механическими связями обработка зубчатых колес, более точная, чем 6-й квалитет точности, весьма проблематична. Это обстоятельство является причиной замены механических связей системами синхронизации на основе управляемых электроприводов и типовых интегральных схем.

**Разработки структурной схемы с гибридными формообразующими группами.** На рисунке 2 приведена обобщенная механическая составляющая обеих частных кинематических структур зубофрезерного станка, на рисунке 3 – обобщенная схема синхронизации управляемых приводов (объединение электронных валов формообразующих групп) для обеих частных структур станка. Данная схема является модификацией известной схемы<sup>3</sup>.

Общая компоновка базовых элементов выполнена аналогично компоновке универсальных зубофрезерных станков. Управляемые электродвигатели  $M_1, M_2, M_3, M_4$  кинематически связаны соответственно со шпинделем 1 червячной фрезы 2, шпинделем 3 делительного стола, несущего заготовку 4 обрабатываемого зубчатого колеса, тяговыми валами  $TB_1$  и  $TB_2$  типа передач винт–гайка. Гайка  $TB_1$  жесткой связью соединена с суппортом 5, несущим шпиндель 1 червячной фрезы 2, а гайка  $TB_2$  – с продольным столом 6, несущим шпиндель 3 делительного стола с заготовкой 4. Шпиндель червячной фрезы 1, шпиндель 3 делительного стола, суппорт 5 и продольный стол 6 являются исполнительными органами (управляемыми координатами) станка. Для обеспечения связи механики станка с системой синхронизации на винтах тяговых валов  $TB_1$  и  $TB_2$  установлены импульсные измерительные преобразователи соответственно  $ИП_1$  и  $ИП_2$ .

<sup>2</sup> Способ нарезания цилиндрических зубчатых колес и станок для его реализации : пат. 6134 Респ. Беларусь / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 29.12.2003.

<sup>3</sup> Устройство для синхронизации приводов исполнительных органов шлицефрезерного станка : пат. 16976 Респ. Беларусь / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 26.12.2012.

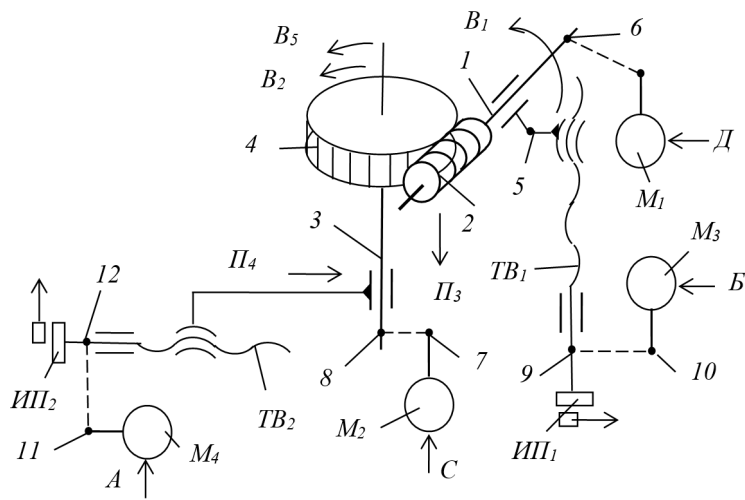


Рисунок 2. – Схема приводов зубофрезерного станка для обработки колес с наклонными зубьями

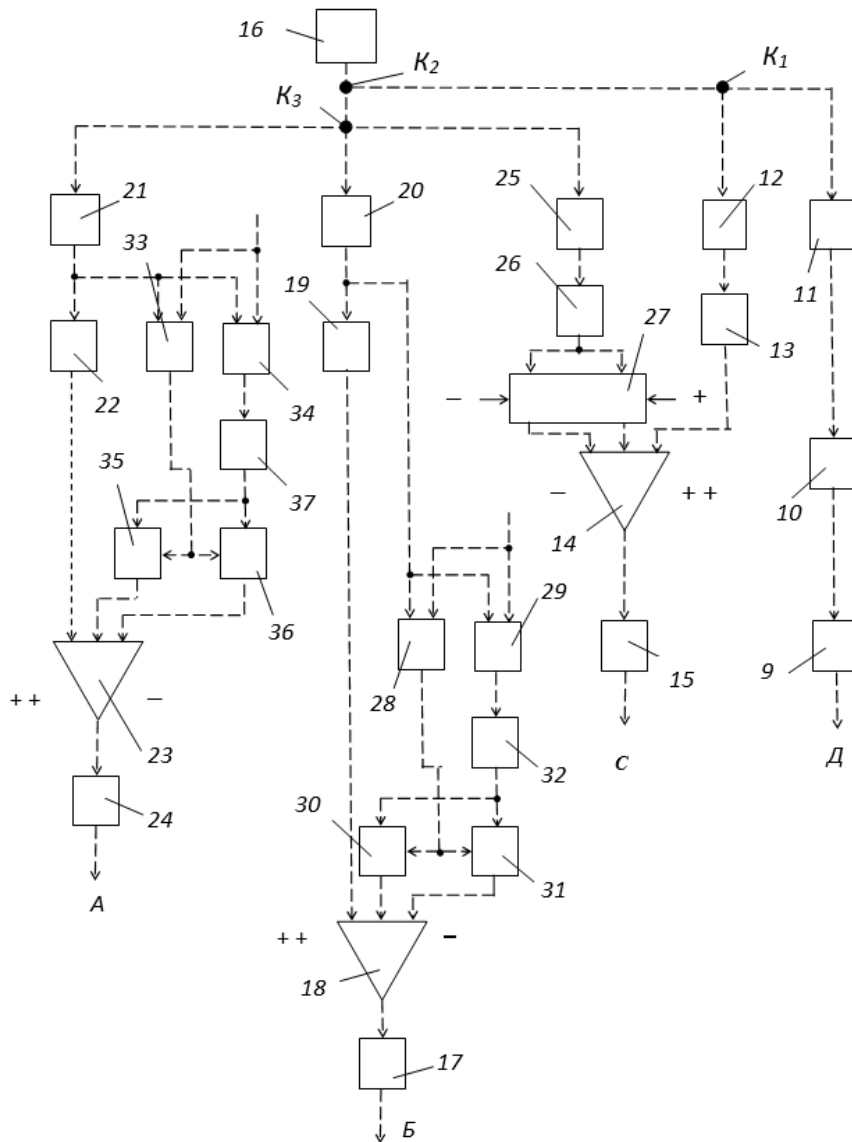


Рисунок 3. – Система синхронизации исполнительных органов станка по схеме равнозначных координат



Частная кинематическая структура станка для обработки цилиндрических винтовых (косозубых) колес включает две сложные гибридные группы:  $\Phi_v(B_1B_2)$  и  $\Phi_s(B_5П_3П_4)$ , связанные общим задатчиком – эталонным импульсным генератором.

Двухэлементарная группа  $\Phi_v(B_1B_2)$  скорости резания воспроизводит профиль зубьев винтовой зубчатой поверхности. Ее внутренняя связь – гибридная (мехатронная) цепь, соединяющая шпиндель 1 червячной фрезы 2 со шпинделем (делительным столом) 3 обрабатываемой заготовки 4 (см. рисунок 2):

$$B_1 \leftarrow 2 \leftarrow 1 \leftarrow 6 \leftarrow M_1 \leftarrow \text{электронный вал} \rightarrow M_2 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow B_2.$$

Электронный вал (см. рисунок 3):

$$\begin{aligned} & \text{усилитель мощности } 9 \leftarrow \text{импульсно-аналоговый преобразователь } 10 \leftarrow \text{делитель частоты } 11 \leftarrow \\ & \leftarrow \text{разъем } K_1 \rightarrow \text{делитель частоты } 12 \rightarrow \text{импульсно-аналоговый преобразователь } 13 \rightarrow \\ & \rightarrow \text{параллельный сумматор } 14 \rightarrow \text{усилитель мощности } 15. \end{aligned}$$

Внешняя связь:

$$\text{импульсный генератор } 16 \rightarrow \text{разъем } K_2 \rightarrow K_1 \text{ (звено соединения связей)}.$$

Движение  $\Phi_v(B_1B_2)$  имеет замкнутую траекторию. Поэтому группа настраивается на два параметра: на траекторию – делителем частоты 12; на скорость воспроизведения профиля зубьев (скорость резания) – делителем частоты 11.

Трехэлементарная группа  $\Phi_s(B_5П_3П_4)$  подачи воспроизводит направляющую – винтовую линию зубьев на делительном конусе. Эта группа во внутренней связи содержит две гибридные цепи. Первая цепь создает потенциальную возможность воспроизведения прямой линии зубьев на делительном конусе, вторая – потенциальную возможность преобразования прямой линии в винтовую.

Первая цепь обеспечивает функциональную связь суппорта фрезы 2 с продольным столом, несущим делительный стол (шпиндель) 3 обрабатываемой заготовки 4. Ее внутренняя связь (см. рисунок 2):

$$П_3 \leftarrow ТВ_1 \leftarrow 9 \leftarrow 10 \leftarrow M_3 \leftarrow \text{электронный вал} \rightarrow M_4 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow ТВ_2 \rightarrow П_4.$$

Электронный вал (см. рисунок 3):

$$\begin{aligned} & \text{усилитель мощности } 17 \leftarrow \text{параллельный сумматор } 18 \leftarrow \text{импульсно-аналоговый преобразователь } 19 \leftarrow \\ & \leftarrow \text{делитель частоты } 20 \leftarrow \text{разъем } K_3 \rightarrow \text{делитель частоты } 21 \rightarrow \\ & \rightarrow \text{импульсно-аналоговый преобразователь } 22 \rightarrow \text{параллельный сумматор } 23 \rightarrow \text{усилитель мощности } 24. \end{aligned}$$

Вторая цепь обеспечивает функциональную связь суппорта фрезы 2 со шпинделем (делительным столом) 3 обрабатываемой заготовки 4. Ее структура (см. рисунок 2):

$$П_3 \leftarrow ТВ_1 \leftarrow 9 \leftarrow 10 \leftarrow M_3 \leftarrow \text{электронный вал} \rightarrow M_2 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow B_5.$$

Электронный вал (см. рисунок 3):

$$\begin{aligned} & \text{усилитель мощности } 17 \leftarrow \text{параллельный сумматор } 8 \leftarrow \text{импульсно-аналоговый преобразователь } 19 \leftarrow \\ & \leftarrow \text{делитель частоты } 20 \leftarrow \text{разъем } K_3 \rightarrow \text{делитель частоты } 25 \rightarrow \\ & \rightarrow \text{импульсно-аналоговый преобразователь } 26 \rightarrow \text{ключ (логический элемент } 2И) \text{ } 27 \rightarrow \\ & \rightarrow \text{параллельный сумматор } 14 \rightarrow \text{усилитель мощности } 15. \end{aligned}$$

Внешняя связь:

$$\text{импульсный генератор } 16 \rightarrow \text{разъем } K_3 \text{ (звено соединения связей)}.$$

Движение  $\Phi_s(B_5П_3П_4)$  имеет незамкнутую траекторию. Поэтому группа настраивается на четыре параметра: на траекторию – делителями частоты 21 и 25; на скорость воспроизведения линии зуба (скорость подачи) – делителем частоты 20; на исходную точку и путь – программно.

Внутренняя связь группы  $\Phi_v(B_1B_2)$  и вторая цепь внутренней связи группы  $\Phi_s(B_5П_3П_4)$  имеют общий участок параллельный сумматор 14 → усилитель мощности 15. Это обеспечивает физическое сложение движений  $B_2$  и  $B_5$  на шпинделе делительного стола при обработке косозубых колес. При этом параллельный сумматор 14 выполняет такую же функцию, что и механический дифференциал в станках с механическими связями.

В сложных, гибридных формообразующих группах основным источником погрешностей, снижающих качественные показатели обрабатываемой поверхности, является девиация механики исполнительных органов этих групп. В мехатронных формообразующих группах явление девиации можно устранить посредством модификации внутренних связей, обеспечивающей непрерывную, двухстороннюю коррекцию задающих сигналов управления электродвигателями исполнительных органов. В рассматриваемом станке основными источниками девиации являются приводы исполнительных движений  $П_3$  и  $П_4$ . Для устранения девиации механики этих приводов в обе цепи внутренней связи группы  $\Phi_s(B_5П_3П_4)$  приводов подач включены модули адаптивной, двухсторонней коррекции управляющего сигнала.

Модуль коррекции управляющего сигнала движения  $П_3$  содержит знаковый 28 и фазовый 29 дискриминаторы. Выход знакового дискриминатора соединен с управляющим входом ключа 30, управляемого отрицательным потенциалом, и управляющим входом ключа 31, управляемого положительным потенциалом. Выход фазового дискриминатора соединен через импульсно-аналоговый преобразователь 32 с аналоговыми входами ключей 30 и 31. Выход ключа 30 соединен со вторым входом сложения параллельного сумматора 18, а выход ключа 31 – со входом вычитания этого сумматора. Первые входы обоих дискриминаторов соединены с делителем частоты 20, вторые – с импульсным измерительным преобразователем  $ИП_1$ , установленном на тяговом валу  $ТВ_1$  (см. рисунок 2).

Аналогично выполнен модуль коррекции управляющего сигнала движения  $П_4$ . Этот модуль содержит знаковый 33 и фазовый 34 дискриминаторы. Выход знакового дискриминатора соединен с управляющим входом ключа 35, управляемого отрицательным потенциалом, и управляющим входом ключа 36, управляемого положительным потенциалом. Выход фазового дискриминатора соединен через импульсно-аналоговый преобразователь 37 с аналоговыми входами ключей 35 и 36. Выход ключа 35 соединен со вторым входом сложения параллельного сумматора 23, а выход ключа 36 – с входом вычитания этого сумматора. Первые входы обоих дискриминаторов соединены с делителем частоты 21, вторые – с импульсным измерительным преобразователем  $ИП_2$ , установленном на тяговом валу  $ТВ_2$  (см. рисунок 2).

При настройке станка выводят коэффициенты деления  $k_v, k_x, k_s, k_y, k_z$ , устанавливаемые при наладке на делителях частоты соответственно 11, 12, 20, 27, 25.

Согласно нормативам резания при зубофрезеровании червячными фрезами скорость резания принимается по круговой частоте фрезы (движение  $B_1$ ), а подача – по ее перемещению параллельно оси заготовки (движение  $П_3$ ). Это является основанием для задания коэффициентов деления  $k_v$  и  $k_s$  на делителях частоты соответственно 11 и 20. Коэффициент деления  $k_v$  задают из условия, при котором на выходе делителя частоты 11 действует задающий сигнал – аналог круговой частоты шпинделя фрезы, соответствующий заданной скорости резания. Аналогично задают коэффициент деления  $k_s$ , при котором на выходе делителя частоты 20 действует сигнал – аналог, соответствующий продольной подаче фрезы.

Внутренняя связь и расчетная цепь группы движения обката  $\Phi_1(B_1B_2)$  совпадают. Поэтому РП для исполнительных органов станочного зацепления, воспроизводящего движение обката, имеет вид:

$$1 \text{ об. шпинделя 1 фрезы } (B_1) \rightarrow \kappa/z \text{ об. шпинделя 3 заготовки } (B_2),$$

где  $\kappa$  – число заходов червячной фрезы;  
 $z$  – число нарезаемых зубьев.

Тогда УКЦ станочного зацепления

$$\kappa/z = I \cdot c_1 \cdot n_1 / n_2,$$

где  $c_1$  – произведение передаточных отношений постоянных механических передач расчетной цепи;  
 $n_1$  – круговая частота электродвигателя  $M_1$ , соответствующая заданной скорости резания,  $\text{мин}^{-1}$ ;  
 $n_2$  – круговая частота электродвигателя  $M_2$ , необходимая для обеспечения функциональной связи в движении обката,  $\text{мин}^{-1}$ .

Заменим в УКЦ отношение круговых частот отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках. Тогда

$$\kappa/z = I \cdot c_1 \cdot k_v / k_x.$$

Из этого выражения следует:

$$k_x = (c_1 z / \kappa) \cdot k_v,$$

где  $k_v$  – коэффициент деления, соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя  $M_1$ ;  
 $k_x$  – коэффициент деления, устанавливаемый на делителе частоты 12 для обеспечения функциональной связи шпинделя фрезы и шпинделя заготовки.

Первая цепь внутренней связи группы  $\Phi_3(B_5П_3П_4)$  и расчетная цепь для определения коэффициента деления  $k_4$  совпадают. Следовательно, РП для исполнительных органов этой цепи можно записать в следующем виде:

$$L \text{ мм путь фрезы в движении } П_3 \rightarrow l \text{ мм путь фрезы в движении } П_4,$$

где путь  $l$  устанавливается по выражению, полученному при анализе способа зубофрезерования ЦЗК с наклонным зубом (см. рисунок 1).

Тогда УКЦ станочного зацепления:

$$L = L \cdot (c_2 = i_0 \cdot t_{ТВ1} / t_{ТВ2}) n_3 / n_4,$$

где  $i_0$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи;  
 $t_{ТВ1}$  и  $t_{ТВ2}$  – шаги тяговых валов.

Заменим в УКЦ отношение круговых частот отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках. Тогда

$$l = L \cdot (c_2 = i_0 \cdot t_{TB1} / t_{TB2}) k_s / k_y.$$

Из этого выражения после соответствующих преобразований следует:

$$k_y = c_2 \cdot k_s / \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $k_s$  – коэффициент деления, соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя  $M_3$ ;  
 $k_y$  – коэффициент деления, устанавливаемый на делителе частоты 21 для обеспечения функциональной связи движений  $П_3$  и  $П_4$ ;  
 $c_2$  – константа.

Вторая цепь внутренней связи группы  $\Phi_s(B_5П_3П_4)$  и расчетная цепь для определения коэффициента деления  $k_z$  совпадают. Следовательно, РП для исполнительных органов этой цепи можно записать как

$$T \text{ мм перемещения фрезы } (П_3) \rightarrow 1 \text{ об. заготовки } (B_5).$$

Тогда УКЦ:

$$l = (T / t_{TB1} \cdot (n_3 / n_5) \cdot c_2,$$

где  $T$  – шаг винтовой линии обрабатываемых зубьев;  
 $c_2$  – произведение постоянных передаточных отношений механических передач расчетной цепи;  
 $n_3$  – круговая частота электродвигателя  $M_3$ , соответствующая заданной подаче;  
 $n_5$  – круговая частота электродвигателя  $M_2$ , необходимая для обеспечения функциональной связи в винтовом движении.

Заменим в УКЦ отношение круговых частот отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках. Тогда

$$l = (T / t_{TB1}) \cdot (k_s / k_z) \cdot c_2.$$

По этому выражению определяется коэффициент деления, устанавливаемый на делителе частоты 25:

$$k_z = k_s \cdot c_2 \cdot (T / t_{TB1}).$$

Шпиндель заготовки является исполнительным органом обоих станочных зацеплений. При работе устройства результирующая круговая частота этого шпинделя представляет собой математическую сумму  $B_2 \pm B_5$  двух движений  $B_2$  и  $B_5$ , образующих совместно соответственно с движениями  $B_1$  и  $П_3$  движение обката  $\Phi_s(B_1B_2)$  и винтовое движение подачи  $\Phi_s(B_5П_3П_4)$ . Суммирование движений  $B_2$  и  $B_4$  осуществляется параллельным сумматором 14. При этом выбор знака в математической сумме движений зависит от направления винтовых линий зубьев обрабатываемого колеса и червячной фрезы. Знак «+» соответствует условию, когда винтовые линии одноименны, например, обе левые; знак «-» соответствует условию, когда винтовые линии разноименные, например, одна правая, а другая левая. Необходимый знак устанавливается при наладке станка подачей управляющего сигнала на соответствующий, потенциальный вход ключа 27.

Функционирование сложных гибридных формообразующих групп станка осуществляется следующим образом. Эталонный генератор 16 вырабатывает импульсный, высокочастотный сигнал. Этот сигнал поступает на делители частоты 11, 12, 20, 21, 25, в которых происходит его деление в соответствии с коэффициентами деления  $k_v$ ,  $k_x$ ,  $k_s$ ,  $k_y$ ,  $k_z$ .

Сигнал с выхода делителя частоты 11 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 10 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через усилитель мощности 9 поступает на управляемый электродвигатель  $M_1$ , сообщающий шпинделю 1 червячной фрезы движение  $B_1$ , соответствующее скорости резания. Синхронно импульсный сигнал с выхода делителя частоты 12 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 13 в напряжение, пропорциональное частоте на его входе. С выхода этого преобразователя через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 14 и усилитель мощности 15 сигнал поступает на управляемый электродвигатель  $M_2$ , который сообщает движение  $B_2$  шпинделю 3 заготовки 4 обрабатываемого колеса. В итоге такого прохождения задающего сигнала осуществляется воспроизведение профиля зубчатого колеса формообразующим движением  $\Phi_s(B_1B_2)$ .

Параллельно сигнал с выхода делителя частоты 20 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 19 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 18 и усилитель мощности 17 – поступает на управляемый электродвигатель  $M_3$ . Этот электродвигатель посредством  $TB_1$  сообщает суппорту фрезы движение  $П_3$ , соответствующее продольной подаче инструмента. Синхронно импульсный сигнал с выхода делителя частоты 21 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 22 в напряжение, пропорциональное частоте на его входе. С выхода этого преобразователя через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 23, и усилитель мощно-

сти 24 сигнал поступает на управляемый электродвигатель  $M_4$ . Этот электродвигатель посредством  $TB_2$  сообщает продольному столу, несущему делительный стол с заготовкой, движение  $P_4$ , соответствующее подаче. Синхронно импульсный сигнал с выхода делителя частоты 25 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 26 в напряжение, пропорциональное частоте на его входе. С выхода этого преобразователя сигнал поступает через ключ 27 (логический элемент 2И) на второй вход сложения или на вход вычитания параллельного сумматора 14. В итоге шпинделю заготовки сообщается дополнительное движение  $B_5$ , математически суммирующееся с движением  $B_2$ . В результате такого прохождения задающего сигнала осуществляется воспроизведение винтовой линии зубьев на делительном конусе зубчатого колеса формообразующим движением  $\Phi_s(B_5P_3P_4)$ .

В процессе функционирования формообразующих групп осуществляется двухсторонняя коррекция действующих сигналов на выходах параллельных сумматоров 18 и 23. В системах управления станочным оборудованием такую двухстороннюю коррекцию функционирования исполнительных органов принято называть адаптивным управлением.

Коррекция задающего сигнала, действующего на выходе параллельного сумматора 18, осуществляется следующим образом. На первых входах знакового 28 и фазового 29 дискриминаторов постоянно действует задающий импульсный сигнал с выхода делителя частоты 20. На вторые входы обоих дискриминаторов непрерывно с  $III_1$  (см. рисунок 2) поступает импульсный сигнал – аналог скорости движения  $P_3$  суппорта фрезы. В результате непрерывного сравнения сигналов на выходе знакового дискриминатора образуется отрицательный потенциал при отставании суппорта от заданного значения и положительный потенциал при его опережении. Этот потенциал поступает на управляющие входы ключей 30 и 31. Синхронно на выходе фазового дискриминатора 29 непрерывно образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 32 поступает на аналоговые входы ключей 30 и 31. Этот сигнал поступает на параллельный сумматор 18 через один из ключей в зависимости от знака управляющего воздействия. При отставании суппорта от заданного значения сигнал абсолютной погрешности поступает через ключ 30, управляемый отрицательным потенциалом, на второй вход сложения параллельного сумматора 18, а при опережении этот сигнал поступает через ключ 31, управляемый положительным потенциалом, на вход вычитания этого сумматора. В итоге в параллельном сумматоре 18 происходит в зависимости от знака погрешности увеличение или уменьшение управляющего сигнала, т.е. происходит непрерывная, двухсторонняя коррекция движения подачи  $P_3$  исполнительного органа – суппорта фрезы относительно номинального значения.

Аналогично осуществляется коррекция задающего сигнала на выходе параллельного сумматора 23. На первых входах знакового 33 и фазового 34 дискриминаторов постоянно действует задающий импульсный сигнал с выхода делителя частоты 21. На вторые входы обоих дискриминаторов непрерывно с  $III_2$  (см. рисунок 2) поступает импульсный сигнал – аналог скорости движения  $P_4$  продольного стола, несущего делительный стол (шпиндель 3). В результате непрерывного сравнения сигналов на выходе знакового дискриминатора образуется отрицательный потенциал при отставании продольного стола от заданного значения и положительный потенциал при его опережении. Этот потенциал поступает на управляющие входы ключей 35 и 36. Синхронно на выходе фазового дискриминатора 34 непрерывно образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 37 поступает на аналоговые входы ключей 35 и 36. Этот сигнал поступает на параллельный сумматор 23 через один из ключей в зависимости от знака управляющего воздействия. При отставании продольного стола от заданного значения сигнал абсолютной погрешности поступает через ключ 35, управляемый отрицательным потенциалом, на второй вход сложения параллельного сумматора 23, а при опережении этот сигнал поступает через ключ 36, управляемый положительным потенциалом, на вход вычитания этого сумматора. В итоге в параллельном сумматоре 23 происходит в зависимости от знака погрешности увеличение или уменьшение управляющего сигнала, т.е. происходит непрерывная, двухсторонняя коррекция движения подачи  $P_4$  исполнительного органа – продольного стола относительно номинального значения.

Рассмотренная структурная схема обеспечивает также при соответствующей переналадке обработку прямозубых цилиндрических колес с линией зубьев на делительном конусе и обработку классических косозубых и прямозубых цилиндрических колес с линией зубьев на делительном цилиндре.

При обработке прямозубых цилиндрических колес с линией зубьев на делительном конусе отключается делитель частоты 25. При этом трехэлементарная формообразующая группа  $\Phi_s(B_5P_3P_4)$  преобразуется в двухэлементарную группу  $\Phi_s(P_3P_4)$ .

При обработке косозубых зубчатых колес с линией зубьев на делительном цилиндре отключается делитель частоты 21. При этом трехэлементарная формообразующая группа  $\Phi_s(B_5P_3P_4)$  преобразуется в двухэлементарную группу  $\Phi_s(B_5P_3)$ .

При обработке прямозубых зубчатых колес с линией зубьев на делительном цилиндре отключаются делители частоты 21 и 25. При этом трехэлементарная формообразующая группа  $\Phi_s(B_5P_3P_4)$  преобразуется в составную элементарную группу  $\Phi_s(P_3^*B_1)$ .

**Заключение.**

1. Целенаправленное расширение универсальности зубофрезерных станков с механическими связями за счет обработки цилиндрически колес с линией зуба на делительном конусе усложняет его кинематическую структуру. В частности, простая формообразующая кинематическая группа подачи при обработке прямозубого цилиндрического колеса с наклонными зубьями преобразуется в сложную двухэлементарную, а при обработке винтового (косозубого) цилиндрического колеса с наклонными зубьями – в сложную трехэлементарную группу соответственно с одним и двумя органами настройки (гитары сменных зубчатых колес) на траекторию движения подачи.

2. Увеличение механических органов настройки в кинематической структуре традиционных зубофрезерных станков при прочих равных условиях приводит к снижению точности обработки и повышению уровня шума станка при работе. Увеличивается также время наладки станков, что нежелательно при обработке небольших партий зубчатых колес.

3. Замена механических связей, включающих органы настройки параметров исполнительных движений, между исполнительными органами зубофрезерного станка для обработки цилиндрических зубчатых колес как с линией зуба на делительном конусе, так и с линией зуба на делительном цилиндре системой синхронизации на основе типовых интегральных схем между их управляемыми электродвигателями создает предпосылки для повышения точности обработки, оптимизации режимов резания, снижения трудоемкости переналадки станка и уровня шума при работе.

4. Представленная структурная схема зубофрезерного станка с гибридными (мехатронными) формообразующими группами по существу отображает эволюцию обкатного зубофрезерования цилиндрических зубчатых колес от первого патента (1862 г., Германия) до патента<sup>4</sup>, представленного в библиографии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Голембиевский, А.И. Обработка цилиндрических зубчатых колес с наклонными по делительной окружности зубьями / А.И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2008. – № 8. – С. 102–109.
2. Голембиевский, А.И. Типовая кинематическая структура зубофрезерного станка для обработки винтовых цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями / А.И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2013. – № 3. – С. 4–8.

## REFERENCES

1. Golembiyevskiy, A.I. (2008). Obrabotka tsilindricheskikh zubchatykh koles s naklonnymi po delitel'noy okruzhnosti zub'yami [Treatment of cylindrical gears with teeth inclined along the dividing circle]. *Vestnik Polotsogo gosudarstvennogo universitetata. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnyye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Sciences], (8), 102–109. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Golembiyevskiy, A.I. (2013). Tipovaya kinematicheskaya struktura zubofrezernogo stanaka dlya obrabotki vintovykh tsilindricheskikh zubchatykh koles s naklonnymi zub'yami [Typical kinematic structure of a gear hobbing machine for processing helical spur gears with oblique teeth]. *Vestnik Polotsogo gosudarstvennogo universitetata. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnyye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Sciences], (3), 4–8. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 24.05.2022

**MACHINE WITH HYBRID SHAPERS  
FOR GEAR MILLING OF CYLINDRICAL WHEELS WITH INCLINED TEETH**

**A. GOLEMBIEVSKY**

*The block diagram of a universal gear hobbing machine with hybrid shaping groups for processing cylindrical gears with inclined teeth is considered. Managed coordinates (executive bodies of the machine) are equipped with individual controlled electric motors. A system for synchronization of machine controlled coordinates based on typical integrated circuits is proposed. The block diagram of the synchronization system is made on the basis of the principle of equivalence of controlled coordinates in both shaping groups, reproducing, respectively, the tooth profile and the tooth line along the length of the machined wheel. An automatic two-sided correction of the control signal on controlled coordinates, reproducing the tooth line along the length, is considered.*

**Keywords:** block diagram of a gear hobbing machine, machine gearing, hybrid shaping groups, synchronization of controlled coordinates.

---

<sup>4</sup> Способ нарезания цилиндрических зубчатых колес и станок для его реализации : пат. 6134 Респ. Беларусь / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 29.12.2003.

УДК 621.774

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЛИБРОВКИ СТАНОВ ХПТ С ЦЕЛЮ ПОЛУЧЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЖАТИЯ ПО ДИАМЕТРУ ТРУБЫ ВДОЛЬ КОНУСА ДЕФОРМАЦИИ

канд. техн. наук, доц. С.В. ПИЛИПЕНКО

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Целью работы является исследование влияния на характер распределения обжатия по диаметру вдоль конуса деформации таких параметров калибровки рабочего инструмента станов холодной пильгерной прокатки труб, как величина начальной конусности и степень крутизны профиля образующей развертки гребня ручья калибра, и тех же параметров образующей профиля рабочей поверхности оправки. Исследования базировались на разработанном методе расчета обжатия по диаметру вдоль конуса деформации, на ряде зависимостей, выведенных разными авторами для определения геометрических параметров рабочего инструмента стана ХПТ, определения деформационных параметров процесса ХПТ. Предложенный метод разрешает частично нивелировать неточность существующих формул. Оптимизация характера распределения величины обжатия по диаметру вдоль конуса деформации позволяет уменьшить вероятность возникновения такого дефекта, как риска на внутренней поверхности холоднокатаной трубы. Исследовано влияние параметров калибровки пропорциональных обжатий на характер распределения обжатия по диаметру вдоль конуса деформации. Выявлено, что с точки зрения оптимизации распределения обжатия по диаметру вдоль конуса деформации наиболее приемлемо использовать калибровки с криволинейной образующей профиля рабочей поверхности оправки. Такие калибровки имеют большие возможности для оптимизации и позволяют подобрать наиболее приемлемые режимы деформации.

**Ключевые слова:** холоднокатаные трубы, ХПТ, чистота поверхности, брак, риски, обжатие по диаметру, конус деформации, параметры калибровки, рабочий инструмент.

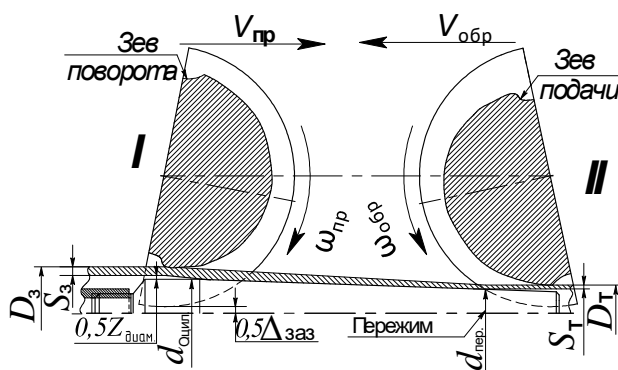
**Введение.** Холодной пильгерной валковой прокаткой производят трубную продукцию с повышенными требованиями к их качеству [1–3]. Одним из важных параметров качества труб, непосредственно влияющих на их эксплуатационные характеристики, является чистота поверхностей. К этому параметру качества относится наличие такого дефекта, как риска на внутренней поверхности трубы [4–8]. Наличие рисков приводит к снижению прочности труб из любых марок сталей и сплавов, произведенных любым способом [4–5; 8]. Риска является концентратором напряжений, возникающих в теле трубы при ее эксплуатации. Если глубина залегания риск не выводит толщину стенки за пределы допуска, то такие трубы могут подвергаться механической обработке (например, пескоструиванию) с последующей ультразвуковой диагностикой. Однако даже в случае положительного результата такая обработка труб приводит к увеличению расхода металла заготовки на 1 т готовой продукции и другим затратам по переделу. Все это снижает рентабельность производства, повышает долю ручного труда [9–12]. Механизм образования рисков на внутренней поверхности трубы при их холодной прокатке до конца не изучен. Из практики прокатки известно, что угроза рискообразования увеличивается при наличии значительной величины свободного редуцирования как в зоне редуцирования разведки ручья калибра стана пильгерной холодной прокатки труб, так и в мгновенном очаге деформации данного типа станов [9–14]. Поэтому оптимизация характера распределения величины обжатия по диаметру трубы вдоль конуса деформации стана типа ХПТ является актуальной задачей.

**Цель** данной работы состоит в исследовании влияния на характер распределения обжатия по диаметру вдоль конуса деформации таких параметров калибровки рабочего инструмента станов холодной пильгерной прокатки труб, как величина начальной конусности и степень крутизны профиля образующей развертки гребня ручья калибра, и тех же параметров образующей профиля рабочей поверхности оправки.

**Методология.** В отечественной практике прокатки широкое распространение получила так называемая калибровка пропорциональных обжатий (КПО). Именно она выбрана для анализа влияния параметров калибровки рабочего инструмента на характер распределения обжатия по диаметру трубы вдоль конуса деформации. При ее использовании расчет диаметра ручья калибра производится по формуле [12–14]

$$D_x = D_T + (D_3 - D_T - \gamma_{\min} \cdot l_{\text{к.раб}}) \left( \frac{x}{l_{\text{к.раб}}} \right)^n + \gamma_{\min} x, \text{ мм}, \quad (1)$$

где  $x$  – координата контрольного сечения;  $\gamma_{\min}$  – минимальная конусность образующей развертки гребня ручья калибра перед пережимом (рисунок 1);  $n$  – степень крутизны образующей развертки гребня ручья калибра;  $l_{\text{раб}}$  – длина зоны обжатия конуса деформации;  $D_3$  – наружный диаметр трубы-заготовки (рисунок 1);  $D_T$  – наружный диаметр готовой трубы (рисунок 1).



I – положение валков после подачи трубы-заготовки в конус деформации; II – положение валков после поворота трубы перед обратным ходом клетки;  $S_3$  и  $S_T$  – толщина стенки заготовки и готовой трубы соответственно;  $d_{пер}$  – внутренний диаметр готовой трубы (диаметр оправки в пережиме);  $d_{о.цил}$  – диаметр цилиндрической части оправки;  $\Delta_{заз}$  – зазор между бочками ручьев калибров;  $Z_{диам}$  – диаметральный зазор между внутренней поверхностью трубы и цилиндрической частью оправки

Рисунок 1. – Схема процесса деформации трубы в стане холодной пильгерной валковой прокатки труб

Диаметры оправки в тех же контрольных сечениях рассчитывается по аналогичной формуле [12–14]

$$d_x = d_{пер} + (d_{о.цил} - d_{пер} - \alpha_{мин} \cdot l_{о.раб}) \left( \frac{x}{l_{о.раб}} \right)^n + \alpha_{мин} x, \text{ мм}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{мин}$  – минимальная конусность оправки перед сечением пережима;  $l_{о.раб}$  – длина рабочей зоны оправки.

Следует заметить, что при  $n = 1$  образующая профиля рабочей поверхности оправки принимает конусную форму.

Иногда, с целью более точного управления распределением обжатия по толщине стенки вдоль конуса деформации или с целью организации зоны предотделки (где производится калибровка трубы по толщине стенки), после определения диаметров оправки по формуле (2) производят расчет толщины стенки в контрольных сечениях зоны обжатия:

$$S_{x.обж} = S_T + (S_{ред} - S_T) \cdot \left( \frac{x_{обж}}{l_{обж}} \right)^{n_s}, \text{ мм}, \quad (3)$$

где  $n_s$  – эмпирический показатель параболической функции изменения толщины стенки рабочего конуса на обжимном участке,  $n_s = 1,5 \dots 3,5$ ;  $l_{обж}$  – длина зоны обжатия стенки разведки гребня ручья калибра;  $x_{обж}$  – координата контрольного сечения зоны обжатия стенки разведки гребня ручья калибра;  $S_{ред}$  – толщина стенки с учетом ее утолщения в зоне редуцирования конуса деформации.

И уже после этого определяют диаметры ручья калибра в контрольных сечениях:

– зоны обжатия

$$D_{x.обж} = d_{x.обж} + 2 S_{x.обж}, \text{ мм}, \quad (4)$$

где  $d_{x.обж}$  – диаметры оправки в контрольных сечениях зоны обжатия рассчитанные по формуле (2);

– зоны предотделки

$$D_{x.п.о.} = d_{x.п.о.} + 2 S_T, \text{ мм}, \quad (5)$$

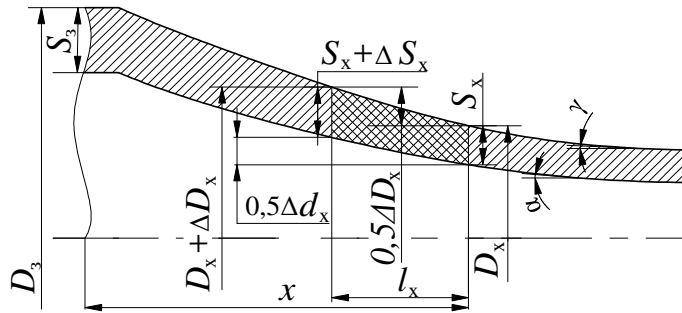
где  $d_{x.п.о.}$  – диаметры оправки в контрольных сечениях зоны предотделки рассчитанные по формуле (2).

Существует упрощенная формула для определения обжатия по диаметру трубы в контрольных сечениях конуса деформации ( $\Delta D_x$ , рисунок 2) [11–14]:

$$\Delta D_x = 2m\mu_{\Sigma x} \text{tg}\gamma_x. \quad (6)$$

где  $m$  – подача трубы перед двойным ходом клетки;  $\text{tg}\gamma_x$  – конусность образующей развертки гребня ручья калибра на данном участке;  $\mu_{\Sigma x}$  – вытяжка трубы вдоль конуса деформации в сечении  $x$ .

Как видно из рисунка 2, в ходе вычисления  $\Delta S_x$  и  $\Delta D_x$  при холодной пильгерной прокатке, в отличие от горячей, необходимо учитывать наличие обжатия по внутреннему диаметру трубы вдоль конуса деформации  $\Delta d_x$ .



$l_x$  – длина конуса деформации, вмещающая объем конуса, равный объему подачи;  
 $\Delta S_x$  – обжатие по толщине стенки трубы вдоль конуса деформации

Рисунок 2. – Определение обжатия по толщине стенки трубы вдоль конуса деформации за цикл пильгерной прокатки

Формула (6) недостаточно точна. Есть более точный метод определения  $\Delta D_x$ , его алгоритм показан на рисунке 3.

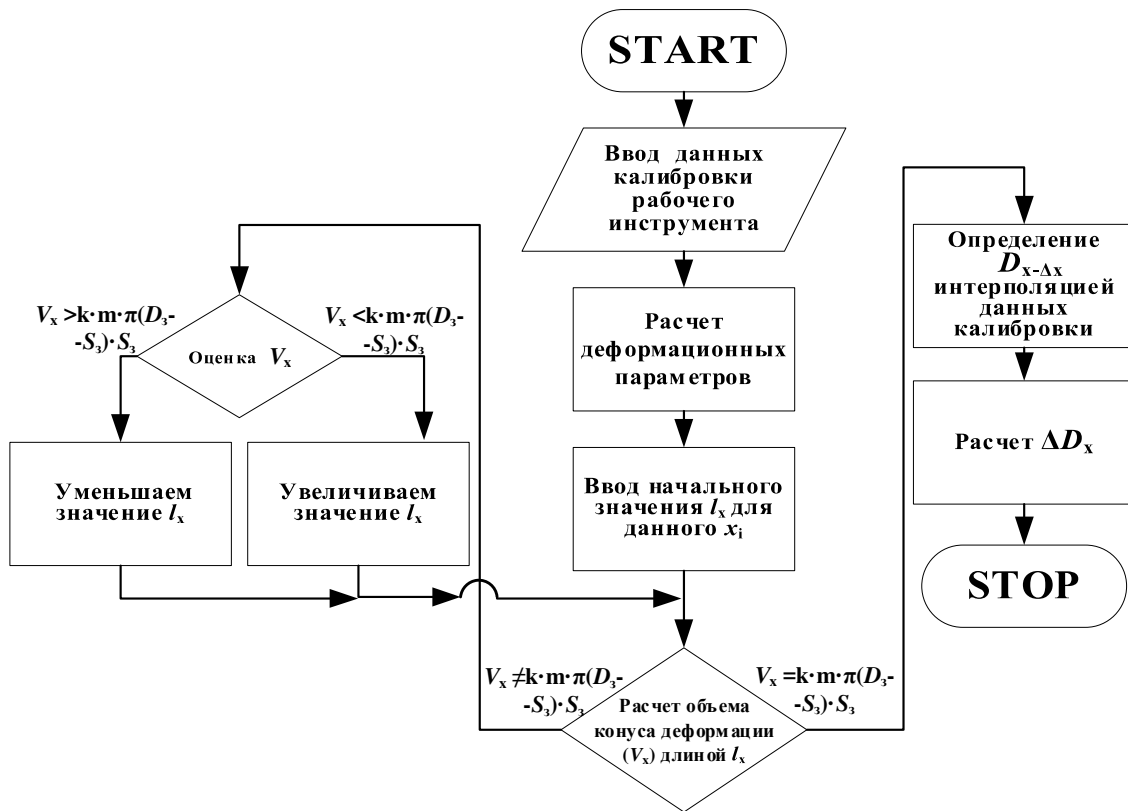


Рисунок 3. – Алгоритм определения  $\Delta D_x$  для контрольного сечения, отстоящего от начала конуса деформации на расстоянии  $x_i$

Здесь для каждого контрольного сечения  $x_i$  с помощью сравнительных расчетов объема конуса деформации длиной  $l_x$  (см. рисунок 2, зона с двойной штриховкой) выполняется итерационный подбор верного значения  $l_x$ . Начальное значение  $l_x$  можно принять равным  $l_x = m \cdot \mu_{\Sigma x}$ . Количество циклов расчета значительно уменьшится. Вначале необходимо задаться определенной точностью расчета  $V_x$ . Она регулируется применением коэффициента  $k$  (см. рисунок 3). Учитывая особенность процесса, точности в 0,1–0,2% будет вполне достаточно. При расчете также следует учитывать и упругие деформации клетки, т.к. они в значительной степени увеличивают объем металла между сечениями, причем от сечения к сечению в разной мере. Расчет производится для всех контрольных сечений. Промежуточные данные можно получить интерполяцией ряда полученных значений  $\Delta D_x$ .

Алгоритм расчета  $\Delta D_x$ , приведенный на рисунке 3, можно упростить. Для этого необходимо рассчитать величину  $l_x$  по известной формуле Я.Е. Осады [2; 3]:



$$l_x = \frac{\sqrt{S_x + 2(\operatorname{tg}\gamma - \operatorname{tg}\alpha) \frac{mS_3(D_3 - S_3)}{D_x - S_x}} - S_x}{\operatorname{tg}\gamma - \operatorname{tg}\alpha}. \quad (7)$$

По известным для каждого контрольного значения  $l_x$  по алгоритму, представленному на рисунке 4, определяются все значения  $\Delta D_x$  (интерполяцией данных калибровки).



Рисунок 4. – Упрощенный алгоритм определения  $\Delta D_x$  для контрольного сечения, отстоящего от начала конуса деформации на расстоянии  $x$ ;

В данном алгоритме итерационный цикл отсутствует. При определении  $\Delta D_x$  также следует учитывать упругие деформации клетки. Для этого следует скорректировать данные калибровки относительно величины упругих деформаций в каждом рассматриваемом сечении. Влияние упругих деформаций при определении  $l_x$  можно осуществить следующим способом:

$$l_{\text{упр.}x} = \frac{\sqrt{(S_x + \Delta_{S,\text{упр.}x}) + 2(\operatorname{tg}\gamma - \operatorname{tg}\alpha) \frac{mS_3(D_3 - S_3)}{(D_x + \Delta_{D,\text{упр.}x}) - (S_x + \Delta_{S,\text{упр.}x})}} - (S_x + \Delta_{S,\text{упр.}x})}{\operatorname{tg}\gamma - \operatorname{tg}\alpha}, \quad (8)$$

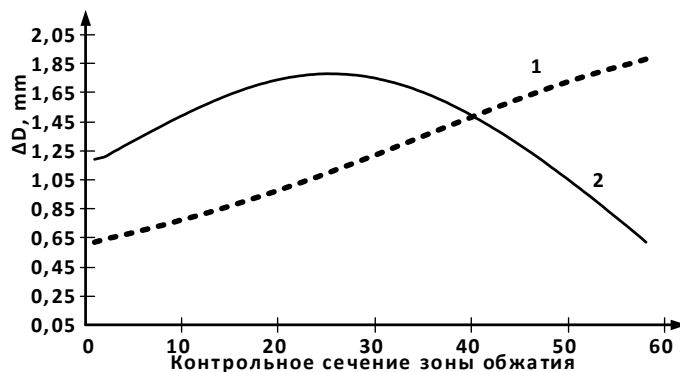
где  $\Delta_{S,\text{упр.}x}$  – приращение толщины стенки из-за упругих деформаций клетки в сечении  $x$ ;  $\Delta_{D,\text{упр.}x}$  – приращение диаметра конуса деформации из-за упругих деформаций клетки в сечении  $x$ .

Для анализа влияния на характер распределения  $\Delta D_x$  величины начальной конусности и степени крутизны профиля образующей развертки гребня ручья калибра, а также тех же параметров образующей профиля рабочей поверхности оправки выбран маршрут прокатки труб из титанового сплава Gr-2 на стане ХПТ-55:  $45 \times 2,1 \rightarrow 21 \times 1$  мм. Данный маршрут характеризуется 77,8% обжатием по площади поперечного сечения при обжатии толщины стенки в 52,38%. При этом наблюдается значительная величина обжатия по внутреннему диаметру 21,88 мм, при обжатии по толщине стенки в 1,1 мм.

Таким образом, оптимизация распределения величины  $\Delta D_x$  вдоль конуса деформации для данного маршрута является актуальной проблемой, т.к. значительная величина обжатия по внутреннему диаметру трубы приводит как к увеличению свободного редуцирования трубы в зоне редуцирования конуса деформации, так и к увеличению степени редуцирования трубы в мгновенном очаге деформации. Оба этих параметра требуют оптимизации.

В случае применения конусной оправки для обеспечения оптимальной длины зоны редуцирования ее конусность должна быть равна  $2\operatorname{tg}\alpha = 0,05$ . В таком случае  $0,5Z_{\text{диам}} = 1,4$  мм (см. рисунок 1) при длине зоны редуцирования в  $L_{\text{ред}} = 57,18$  мм. Эти параметры вполне приемлемы, но применение такого типа рабочего инструмента в стане холодной пильгерной валковой прокатки приведет к значительной величине редуцирования уже наклепанной трубы в конце конуса деформации (рисунок 5, линия 1). Угроза появления рисок на внутренней поверхности трубы в этом случае будет максимальной. При анализе случая прокатки с применением оправки

с криволинейной образующей (рисунок 5, линия 2) обнаруживается характерный куполообразный характер распределения  $\Delta D_x$  со значительным падением этой величины во второй половине зоны обжатия. Такой характер распределения  $\Delta D_x$  вдоль конуса деформации является более оптимальным. Разница между величинами  $\Delta D_x$  в конечном сечении зоны обжатия этих двух случаев применения оправки составляет 178%. Значит, данный маршрут и следует прокатывать на оправке с криволинейной образующей профиля рабочей поверхности, но оптимизировать ее параметры.



1 – конусная оправка ( $2tg\alpha = 0,05$ );  
2 – оправка с криволинейной образующей профиля рабочей поверхности ( $2tg\alpha = 0,001$ ,  $n = 3,5$ )

Рисунок 5. – Влияние типа применяемой в калибровке рабочего инструмента оправки на характер распределения обжатия по наружному диаметру трубы вдоль конуса деформации (сплав Gr-2, ХПТ-55,  $45 \times 2,1 \rightarrow 21 \times 1$  мм,  $m = 9$  мм)

На графиках рисунка 6 показано влияние начальной конусности образующей профиля рабочей поверхности оправки (равна начальной конусности образующей гребня ручья калибра) на характер распределения обжатия по наружному диаметру трубы вдоль конуса деформации (при степени крутизны  $n = 1,5$  и подаче  $m = 9$  мм).

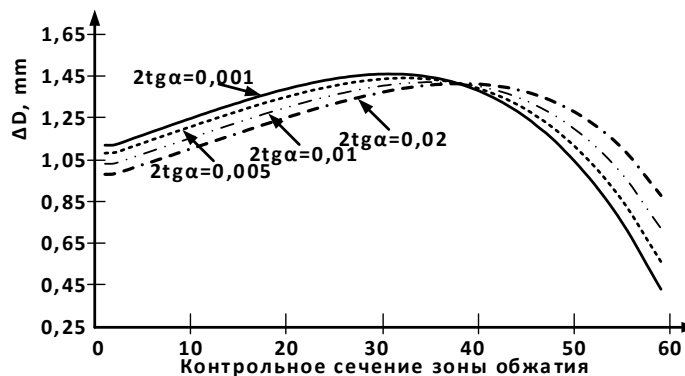
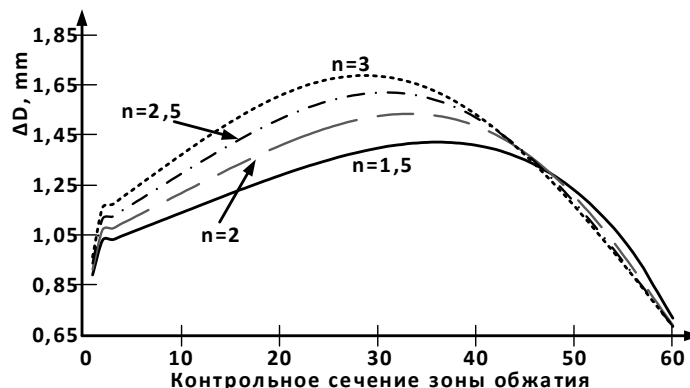


Рисунок 6. – Влияние начальной конусности образующей профиля рабочей поверхности оправки на характер распределения обжатия по наружному диаметру трубы вдоль конуса деформации (сплав Gr-2, ХПТ-55,  $45 \times 2,1 \rightarrow 21 \times 1$  мм,  $n = 1,5$ ,  $m = 9$  мм)

Как видно из рисунка 6, при увеличении начальной конусности график  $\Delta D_x$  смещается в сторону выхода металла из конуса деформации. Увеличивается величина редуцирования уже наклепанного металла в конце конуса. Так, с увеличением  $2tg\alpha$  с 0,001 до 0,005  $\Delta D_x$  в конечном сечении зоны обжатия увеличивается на 31,02%, далее на 28,65 и 22,09%. Данный факт является отрицательным и повышает вероятность возникновения риска на внутренней поверхности трубы. Максимальное значение  $\Delta D_x$  вдоль всего конуса изменяется в пределах 1,41–1,48 мм, что не является критичным.

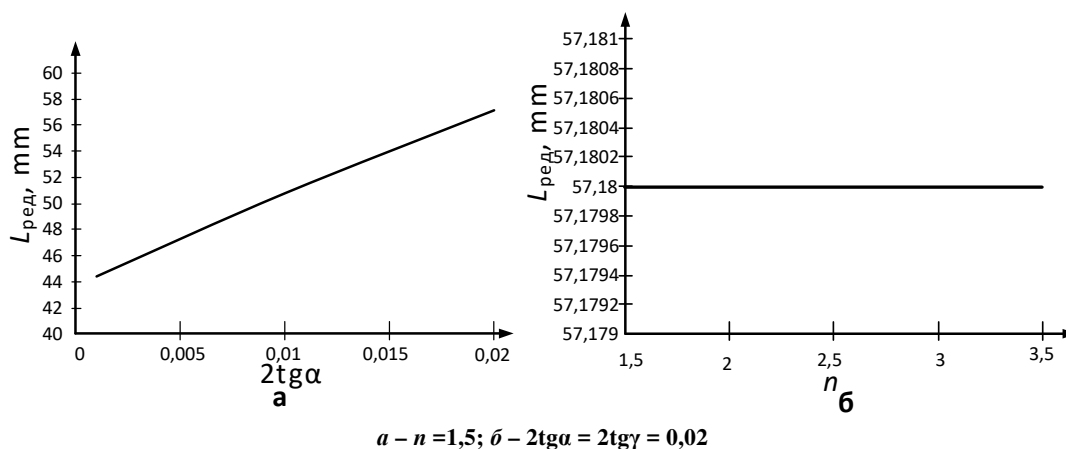
На графиках рисунка 7 показано влияние степени крутизны образующей профиля рабочей поверхности оправки и образующей гребня ручья калибра на характер распределения обжатия по наружному диаметру трубы вдоль конуса деформации (при  $2tg\alpha = 2tg\gamma = 0,001$  и подаче  $m = 9$  мм). Согласно графикам с увеличением степени крутизны степень редуцирования трубы увеличивается в начале конуса деформации и уменьшается в конце. Так, изменение  $n$  с 1,5 до 2 увеличивает  $\Delta D_x$  в середине конуса на 8%, далее на 5,6, и 4,1% с каждым шагом соответственно. При этом уменьшение  $\Delta D_x$  в конце конуса незначительно (исключая случай при

$n = 2 \rightarrow n = 1,5$ , где  $\Delta D_x$  увеличивается на 3,5–6,4%, в зависимости от конкретного сечения в конце конуса). Следовательно, следует выбирать средние значения  $n$ .



**Рисунок 7. – Влияние степени крутизны образующей профиля рабочей поверхности оправки и образующей гребня ручья калибра на характер распределения обжатия по наружному диаметру трубы вдоль конуса деформации (сплав Gr-2, ХПТ-55, 45×2,1→21×1 мм,  $2tg\alpha = 2tg\gamma = 0,001$ ,  $m = 9$  мм)**

В начале конуса деформации присутствует зона редуцирования. Величина редуцирования трубы вдоль этой зоны в случае применения оправки с криволинейной образующей профиля рабочей поверхности оправки регулируется принятием значения величины  $Z_{\text{диам}}$  (см. рисунок 1). Длина же зоны зависит от изогнутости профилей оправки и развертки гребня ручья калибра. На рисунке 8 показано влияние начальной конусности и степени крутизны (от которых и зависят параметры указанной изогнутости) на длину зоны редуцирования конуса деформации.



**Рисунок 8. – Влияние начальной конусности (а) и степени крутизны (б) на длину зоны редуцирования конуса деформации (сплав Gr-2, ХПТ-55, 45×2,1→21×1 мм,  $m = 9$  мм)**

По графикам (см. рисунок 8) на длину зоны редуцирования ( $L_{\text{ред}}$ ) оказывает влияние именно начальная конусность. Чем больше ее величина, тем больше и длина зоны. При увеличении  $2tg\alpha$  с 0,001 до 0,1  $L_{\text{ред}}$  увеличивается на 14,028%, а с 0,01 до 0,02 – еще на 12,51%. Изменение степени крутизны не приводит к изменению значений длины зоны редуцирования конуса деформации. В данном случае следует выбирать средние значения  $2tg\alpha = 2tg\gamma$ , т.к. малая длина зоны редуцирования вызовет увеличение значений редуцирования в мгновенном очаге деформации при его прохождении зоны редуцирования конуса деформации. Слишком большие значения  $2tg\alpha = 2tg\gamma$  тоже не оптимальны (см. рисунок 5). Их применение вызовет увеличение степени редуцирования наклепанного металла в конце конуса деформации.

**Заключение.**

1. С точки зрения оптимизации распределения  $\Delta D_x$  вдоль конуса деформации наиболее приемлемо использование калибровок с криволинейной образующей профиля рабочей поверхности оправки.
2. В случае использования калибровки пропорциональных обжатий параметрами, управляющими распределением  $\Delta D_x$  вдоль конуса деформации, являются начальная конусность и степень крутизны профиля.

3. На длину зоны редуцирования конуса деформации влияет начальная конусность. При минимально возможных значениях  $Z_{\text{диам}}$  следует выбирать средние значения начальной конусности. Уменьшая начальную конусность оправки, следует уменьшать и  $Z_{\text{диам}}$ , чтобы обеспечить как можно меньшую конусность зоны редуцирования конуса деформации. Кроме этого, меньшие значения  $Z_{\text{диам}}$  требуют использования заготовок с повышенной точности геометрии профиля поперечной поверхности (во избежание заката цилиндрической части оправки при прокатке трубы-заготовки с меньшим внутренним диаметром).

4. Степень крутизны не оказывает влияния на длину зоны редуцирования конуса деформации.

5. С точки зрения оптимизации распределения  $\Delta D_x$  вдоль конуса деформации наиболее приемлемо использовать оправки с минимально возможной начальной конусностью образующей профиля рабочей поверхности оправки. Следует заметить, что при применении оправок с малой начальной конусностью затрудняется настройка стана на определенную толщину стенки. Поэтому не следует использовать оправки с  $2\text{tg}\alpha = 2\text{tg}\gamma < 0,005$ . Необходимо также учитывать влияние  $2\text{tg}\alpha$  на длину зоны редуцирования (см. п. 2 заключения).

6. С точки зрения оптимизации распределения  $\Delta D_x$  вдоль конуса деформации следует выбирать калибровки со средними значениями степени ( $n = 2-2,5$  в данном случае калибровки).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Pilipenko, S.V. Deformation mode in a cold rolling condition to provide the necessary texture of the Ti-3Al-2.5V alloy / S.V. Pilipenko, V.U. Grigorenko, O.O. Bohdanov // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2021. – № 1. – С. 78–83. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/078>
2. Пилипенко, С.В. Исследование точности определения обжатия по толщине стенки вдоль конуса деформации за двойной ход клетки станов ХПТ / С.В. Пилипенко // *Сталь*. – 2017. – № 2. – С. 94–97.
3. Пилипенко, С.В. Анализ влияния технологических факторов процесса холодной прокатки труб на изменение распределения Q-фактора вдоль конуса деформации / С.В. Пилипенко // *Изв. высш. учеб. заведений. Цвет. металлургия*. – 2019. – № 3. – С. 30–35.
4. Мокроусов, В.И. Влияние на прочность стальных толстостенных труб дефекта риска на внутренней поверхности / В.И. Мокроусов // *Молодой ученый*. – 2015. – № 19(99). – С. 148–153.
5. Bettayeb, M. Establishment of a database and a classification of the defects in the metal of pipes according to their severity / M. Bettayeb, E. Bouali, N. Abdelbaki, M. Gaceb // *Procedia Engineering*. – 2012. – Vol. 42. P. 607–615. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.453
6. Богатов, А.А. Технологические особенности процесса раскатки труб на короткой оправке / А.А. Богатов, Д.А. Павлов, Е.А. Павлова // *Науч.-техн. ведомости С.-Петерб. гос. политехн. ун-та*. – 2015. – № 3 (226). – С. 54–59. DOI: 10.5862/JEST.226.6
7. Изучение трансформации дефектов поверхности при производстве труб в условиях ТПА-80 / И.Н. Черных [и др.] // *Вестн. ЮУрГУ. Сер. Металлургия*. – 2019. – № 4. – С. 27–36.
8. Повреждения труб из сплавов системы Zr-Nb в процессе их холодной прокатки / М.И. Сергачева [и др.] // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы*. – 2019. – № 4 (100). – С. 102–117.
9. Мищенко, А.В. Состояние и тенденции развития производства холоднокатаных труб из сплавов на основе титана / А.В. Мищенко // *Металл и литье Украины*. – 2019. – № 3-4. – С. 310–311.
10. Орлов, Г.А. Холодная прокатка и волочение труб / Г.А. Орлов. – Екатеринбург : УрФУ, 2011. – 188 с.
11. Шевакин, Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб / Ю.Ф. Шевакин. – М. : Металлургия, 1963. – 212 с.
12. Геометрия прокатного инструмента и алгоритмы его расчета для станов холодной прокатки труб / В.Ф. Балакин [и др.] // *Совершенствование производства стали, труб и железнодорожных колес / под ред. А.Г. Величко, В.И. Большакова, В.Ф. Балакина*. – Днепропетровск : Экономика, 2015. – С. 434–450.
13. Фролов, В.Ф. Холодная пыльгерная прокатка труб / В.Ф. Фролов, В.Н. Данченко, Я.В. Фролов. – Днепропетровск : Пороги, 2005. – 255 с.
14. Виробництво труб холодною деформацією / В.Ф. Балакін [та інш.]. – Ч. II. – Дніпропетровськ : НМетАУ, 2016. – 36 с.

#### REFERENCES

1. Pilipenko, S.V., Grigorenko, V.U., & Bohdanov, O.O. (2021). Deformation mode in a cold rolling condition to provide the necessary texture of the Ti-3Al-2.5V alloy. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 78–83. (In Engl.). <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/078>
2. Pilipenko, S.V. (2017). Issledovaniye tochnosti opredeleniya obzhatiya po tolshchine stenki vdol' konusa deformatsii za dvoynoy khod kleti stanov KHPT [Investigation of the accuracy of determining the reduction in wall thickness along the deformation cone for a double stroke of the stand of KhPT mills]. *Stal' [Steel]*, (2), 94–97. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Pilipenko, S.V. (2019). Analiz vliyaniya tekhnologicheskikh faktorov protsessa kholodnoy prokatki trub na izmeneniye raspredeleniya Q-faktora vdol' konusa deformatsii [Analysis of the influence of technological factors of the process of cold rolling of pipes on the change in the distribution of the Q-factor along the strain cone]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya [News of higher educational institutions. Non-ferrous metallurgy]*, (3), 30–35. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Mokrousov, V.I. (2015). Vliyaniye na prochnost' stal'nykh tolstostennykh trub defekta riska na vnutrenney poverkhnosti [Influence on the strength of steel thick-walled pipes of the risk defect on the inner surface]. *Molodoy uchenyy [Young scientist]*, 19(99), 148–153. (In Russ., abstr. in Engl.).

5. Bettayeb, M., Bouali, E., Abdelbaki, N., & Gaceb, M. (2012). Establishment of a database and a classification of the defects in the metal of pipes according to their severity. *Procedia Engineering*, (42), 607–615. (In Engl.). DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.453
6. Bogatov, A.A., Pavlov, D.A., & Pavlova, Ye.A. (2015). Tekhnologicheskiye osobennosti protsessa raskatki trub na korotkoy opravke [Technological features of the process of rolling pipes on a short mandrel]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Cankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* [Scientific and technical statements of the St. Petersburg State Polytechnic University], 2(226), 54–59. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.5862/JEST.226.6.
7. Chernykh, I.N., Ust'yantsev, V.L., Litvinov, M.A., & Krivonogov, I.N. (2019). Izucheniye transformatsii defektov poverkhnosti pri proizvodstve trub v usloviyakh TPA-80 [Study of the transformation of surface defects in the production of pipes under the conditions of TPA-80]. *Vestnik YUURGU. Ser. Metallurgiya* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy], (4), 27–36. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Sergacheva, M.I., Nikulina, A.V., Ozhmegov, K.V., & Kabanov A.A. (2019). Povrezhdeniya trub iz splavov sistemy Zr-Nb v protsesse ikh kholodnoy prokatki [Damage to pipes from alloys of the Zr-Nb system during their cold rolling]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Materialovedeniye i novyye materialy* [Questions of atomic science and technology. Series: Materials Science and New Materials], 4(100), 102–117. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Mishchenko, A.V. (2019). Sostoyaniye i tendentsii razvitiya proizvodstva kholodnokatanykh trub iz splavov na osnove titana [Status and development trends in the production of cold-rolled pipes from alloys based on titanium]. *Metall i Lit'ye Ukrainy* [Metal and Casting Ukraine], 3-4, 310–311. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Orlov, G.A. (2011). *Kholodnaya prokatka i volocheniye trub* [Cold rolling and pipe drawing]. Yekaterinburg: UrFU. (In Russ.).
11. Shevakin, YU.F. (1963). *Kalibrovka i usiliya pri kholodnoy prokatke trub* [Calibration and forces during cold rolling of pipes]. Moscow: Metallurgiya. (In Russ.).
12. Balakin, V.F., Kucherenko, V.R., Solov'yeva, I.A. & Pilipenko, S.V. (2015). Geometriya prokatnogo instrumenta i algoritmy yego rascheta dlya stanov kholodnoy prokatki trub [Geometry of a rolling tool and algorithms for its calculation for tube cold rolling mills]. In A.G. Velichko (Eds.), V.I. Bol'shakova (Eds.) & V.F. Balakina (Eds.) *Sovershenstvovaniye proizvodstva stali, trub i zheleznodo-rozhnykh koles* [Improving the production of steel, pipes and railway wheels] (434–450). Dnepropetrovsk: Ekonomika. (In Russ.).
13. Frolov, V.F., Danchenko, V.N. & Frolov, Ya.V. (2005). *Kholodnaya pil'gernaya prokatka trub* [Cold pilger rolling of pipes]. Dnepropetrovsk: Porogi. (In Russ.).
14. Balakin, V.F., Solovyova, I.A., Kucherenko, V.R., Pylypenko, S.V. & Nykolayenko, Yu.M. (2016). *Vyrobnytstvo trub kholodnoyu de-formatsiyeyu: Chastyna II* [Production of pipes by cold deformation (Part II)]. Dnepropetrovsk: NMetAU. (In Ukrain.).

Поступила 17.02.2022

**OPTIMIZATION OF THE CALIBRATION PARAMETERS OF THE CHP STATUS  
WITH THE PURPOSE OF OBTAINING A RATIONAL DISTRIBUTION OF CONSUMPTION  
ALONG THE PIPE DIAMETER ALONG THE CONE OF DEFORMATION**

**S. PYLYPENKO**

*The aim of the work is to study the influence on the nature of the distribution of compression along the diameter along the deformation cone of such parameters of calibration of the working tool of cold pilger rolling mills of pipes as the value of the initial taper and the degree of steepness of the profile of the generatrix of the groove crest of the gauge, and the same parameters of the generatrix of the profile of the working surface of the mandrel. The studies were based on the developed method for calculating the reduction in diameter along the deformation cone, on a number of dependencies derived by different authors to determine the geometric parameters of the working tool of the CPT mill, to determine the deformation parameters of the CPT process. The proposed method allows to partially level the inaccuracy of the existing formulas. Optimization of the nature of the distribution of the amount of compression along the diameter along the deformation cone makes it possible to reduce the likelihood of such a defect as a scratch on the inner surface of a cold-rolled pipe. The influence of the calibration parameters of proportional reductions on the nature of the reduction distribution along the diameter along the cone of deformation has been studied. It was found that from the point of view of optimizing the distribution of compression along the diameter along the cone of deformation, it is most appropriate to use calibrations with a curvilinear generatrix of the profile of the working surface of the mandrel. Such calibrations have great opportunities for optimization and allow choosing the most acceptable deformation modes*

**Keywords:** cold-rolled pipes (*uau tubes*), Cold-pilger rolling (*uau cold pilgering*), surface roughness (*uau surface finish*), substandard product (*defective product, reject*), scratches, reduction in diameter, deformation cone, calibration data, work tool (*uau working tools*).

УДК 621.774

## ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛУЖЕНОЙ ЖЕСТИ

В.А. ДЬЯКОНОВ

(ООО «ММПЗ-групп», Миоры),

канд. техн. наук, доц. С.В. ПИЛИПЕНКО, канд. техн. наук, доц. О.П. ШТЕМПЕЛЬ

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Рассмотрено влияние деформации на механические свойства характерных слоев жести при прошивке в ней сквозного отверстия. Получены графические зависимости, показывающие изменение микротвердости наружных и внутренних слоев луженой жести по толщине материала листа в зависимости от угла его изгиба. Изучена целостность наружного луженого слоя белой жести в готовом изделии. Установлено, что целостность покрытия сохраняется вплоть до места пластического разрыва прошивнем прессы центральной части заготовки. Анализ распределения значений микротвердости показал, что внутренний слой имеет более высокие значения, чем наружные, максимальное значение степени наклепа наблюдается в наружном слое (+17,1%). При значениях угла изгиба более 150° значения степени наклепа во всех слоях стремятся к одному значению (примерно 12,75%). Согласно анализу графика изменений степени наклепа слоев листа вдоль линии изгиба образца, степень наклепа срединного слоя происходит при любом изменении формы листового материала независимо от степени наклепа наружных слоев.

**Ключевые слова:** листовой прокат, жесьть луженная, холодная деформация, листовая штамповка, профиль, угол изгиба по радиусу, микротвердость.

**Введение.** Мировые тенденции показывают постоянный рост спроса на прокатную продукцию, в т.ч. в виде жести и проката с покрытиями [1–3]. Например, только по российскому рынку с 2005 г. в 2021 г. спрос на данную продукцию, несмотря на пандемию, увеличился более чем 2 раза [1; 2]. Такой вид проката используется в качестве заготовки для производства разного вида изделий во многих отраслях промышленности, строительстве и др. [4; 5]. Вопросы, связанные с развитием теории и технологии холодной листовой прокатки, всегда актуальны, и их решению посвящено много научных трудов<sup>1</sup> [3; 6].

На Миорском металлопрокатном заводе в начале 2020 г. пущена в строй линия производства белой луженой жести (по ГОСТ 13345-85, ГОСТ Р 52204-2004, EN 10202:2001, ASTM A 623/98, JISG 3303)<sup>2,3</sup>. Кроме белой жести (в рулонах) завод имеет возможность изготавливать черную жесьть с разными видами отделки (EN 10205:2017), холоднокатаные листы в сортаменте и др. Вся продукция производится в широком сортаменте сталей типа TS 245, TS 550, TS 260, TS 290, TS 275, DC01-05, 08Ю, 08пс, 08кп и др. Данная линия позволяет прокатывать листовой металл с толщиной до 0,15 мм и менее (до 0,09 мм). Заготовкой служит горячекатаная протравленная отожженная полоса в рулонах.

Основной технологической линией являются два стана холодной прокатки полос со смоткой–размоткой в рулоны. Первым по линии установлен шестивалковый реверсивный стан RCM-1250 (рисунок 1, поз. 4). Вторым – непрерывный прокатно-дрессировочный стан DSR-1250 (рисунок 1, поз. 8, 9). Данный стан состоит из первой обжимной клетки (рисунок 1, поз. 8) и второй дрессировочной клетки (рисунок 1, поз. 9), объединенных в непрерывную группу (обе клетки кварто). Прокатка на стане DSR-1250 может осуществляться с натяжением.

Протравленные отожженные рулоны полос толщиной 2 мм поступают на склад заготовки (рисунок 1, поз. 1) и после ряда предварительных операций (контроль качества и пр.) загружаются на реверсивный шестивалковый стан DSR-1250. На этом стане полоса со смоткой с рулона на рулон прокатывается в несколько проходов до нужной передельной толщины. Далее рулоны передаются на линию электролитической очистки (рисунок 1, поз. 6), где происходит удаление смазки, загрязнений и пр. После этого рулоны поступают в термоотдел. В термоотделе установлен ряд колпаковых печей с защитной атмосферой (рисунок 1, поз. 7), в которых и происходит отжиг рулонов с передельной полосой. После отжига рулоны поступают на прокатно-дрессировочный стан DSR-1250 (рисунок 1, поз. 8 и 9), на котором прокатываются с натяжением до готового размера. Луженное покрытие на полосу наносится на непрерывной линии электролитического лужения

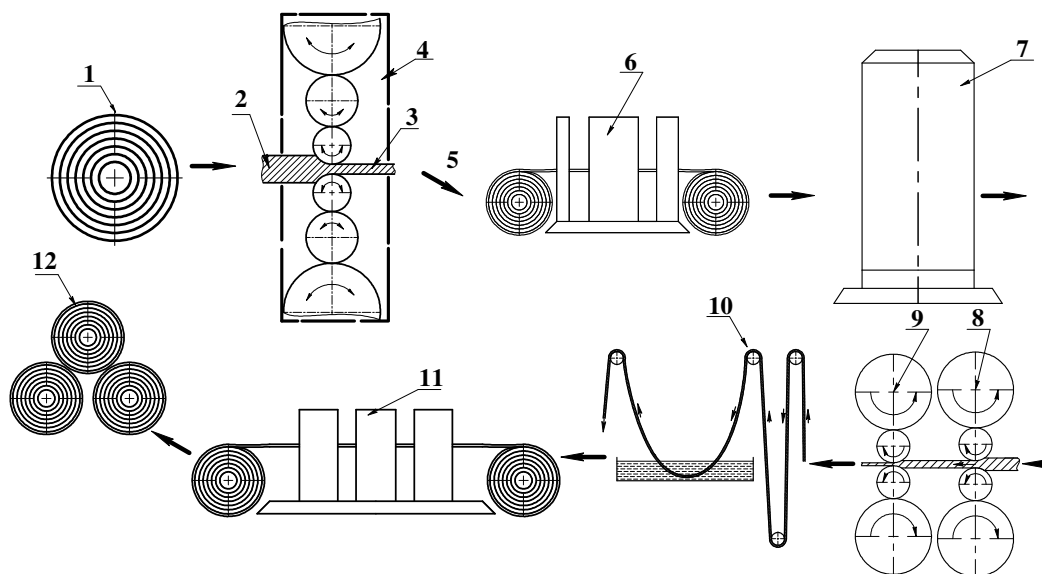
<sup>1</sup> Kozhevnikov, A.V. The Development and Application of Methodologies for the Design of Technological Modes of Cold Rolling / A.V. Kozhevnikov // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering, 4th International Scientific and Technical Conference on Scientific and Technical Progress in Ferrous Metallurgy (SATPIFM-2019), Cherepovets, 18–20 September 2019, Russian Federation. – Vol. 718. – P. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899X/718/1/012007/

<sup>2</sup> Miory Steel [Elektronnyj resurs]. URL: <http://www.mmpz.by/kompaniya/o-nas/>.

<sup>3</sup> Proizvodstvo [Elektronnyj resurs]. URL: <http://www.mmpz.by/kompaniya/proizvodstvo/>.

(рисунок 1, поз. 10). После нее рулоны поступают на резку и упаковку на отдельную линию (рисунок 1, поз. 11). Упакованные рулоны поступают на склад сбыта (рисунок 1, поз. 12).

На данном агрегате прокатана жесь толщиной 0,09 мм (около 0,105 мм после лужения). Данная жесь имеет характерную слоистую структуру с разными мехсвойствами (из-за дрессировки; рисунок 1, поз. 9). Данный листовой материал предназначен для производства упаковки в виде банок и прочих емкостей небольшого размера, которые используются для хранения и транспортировки пищевых и непищевых продуктов. Таким образом, данная жесь подвергается дальнейшему переделу, в основном листовой штамповкой. В ходе листовой штамповки изменяются механические свойства жести. Разные слои по толщине данной листовой продукции имеют несколько отличные друг от друга свойства, поэтому изменение механических характеристик данных слоев будет различно.



1, 2 – заготовка горячекатаная (полоса толщиной около 2 мм); 3 – передельная полосовая сталь, сматываемая в рулоны; 4 – реверсивный стан холодной тонколистовой прокатки RCM-1250 (шестивалковый, одноклетьевого); 5 – направление передачи рулонов вдоль технологической линии; 6 – электролитическая очистка; 7 – отжиг рулонов в защитной атмосфере (в колпаковых печах); 8, 9 – непрерывная группа клетей стана DSR-1250 (обе клетки кварто); 10 – непрерывная линия электролитического лужения; 11 – линия резки и упаковки; 12 – склад готовой продукции, сбыт

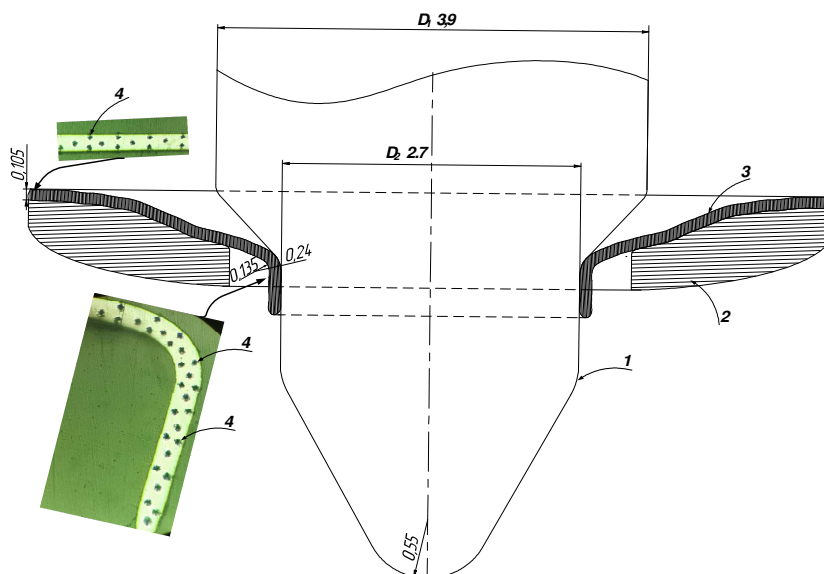
Рисунок 1. – Схема технологии производства белой жести на Миорском металлпрокатном заводе

Цель данной работы – определение влияния деформации на механические свойства характерных слоев жести в ходе прошивки в ней сквозного отверстия, установлении распределения микротвердости в наружных и внутренних слоях по толщине материала листа от угла его изгиба, а также изучение целостности наружного луженного слоя белой жести в готовом изделии.

**Методология.** Для исследования отбирались образцы из полос луженой жести из углеродистой стали TS 435 (аналог стали 08пс, ГОСТ 1050) толщиной 0,09 мм (0,105 мм после лужения). Из данного образца были вырезаны заготовки для сплошной прошивки, а также полоски для измерения микротвердости неподверженного пластической деформации металла. Далее смазанные образцы (Солидол Ж, ГОСТ 1033-79) круглой формы подвергались сплошной прошивке в ручном прессе (рисунок 2).

После прошивки отверстие принимало характерную форму с несколькими закруглениями, наименьшее из которых имеет радиус изгиба по наружной поверхности 0,24 мм, по внутренней – 0,135 мм (рисунок 3).

Перед прошивкой центральное отверстие в заготовках не выполнялось (например, методом пробивки или сверлением). Металл центральной части заготовки разрывался прошивным прессом. Скорость деформации не регистрировалась. В качестве смазочного материала применялся солидол. Прошитые заготовки вымывались и разрезались по центру отверстия. Затем разрезанные прошитые образцы вместе с полосками недеформированного материала помещались в специально изготовленные для этого обечайки и заливались эпоксидной смолой. После затвердевания смолы производилось несколько этапов шлифовки и полировки подготавливаемых образцов. Шлифовка и полировка образцов производилась на полировальной станции Presi Mecapol P262. Далее поверхность образцов обрабатывалась травителем Nital для проявления микроструктуры. Микроструктура исследовалась на микроскопе Nikon Epiaphot 200 (максимальное увеличение до 1000 раз).



1 – прошивень; 2 – матрица; 3 – образец; 4 – места уколов при измерении микротвердости

Рисунок 2. – Схема прошивки отверстия в круглой заготовке из листа белой жести толщиной 0,105 мм (0,09 мм – до лужения), произведенной Миорском металлопрокатом (сталь TS 435, аналог стали 08пс, ГОСТ 1050)

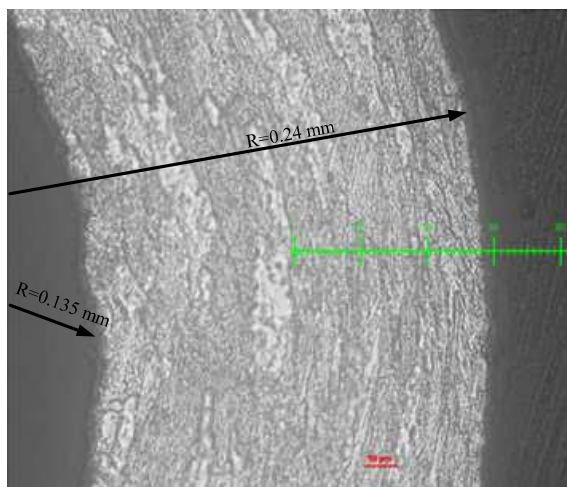


Рисунок 3. – Микроструктура луженой жести толщиной 0,105 мм после прошивки отверстия в заготовке (толщина до лужения – 0,09 мм, сталь TS 435, аналог стали 08пс, ГОСТ 1050, увеличение  $\times 500$ )

**Анализ результатов исследований.** Сразу следует подчеркнуть обнаруженное высокое качество нанесенного тонкого слоя (толщиной около 7 мкм) олова на стальной тонкий лист толщиной  $\approx 90$  мкм. На исследованных микрошлифах при различных увеличениях ( $\times 100$ ,  $\times 200$ ,  $\times 500$ ,  $\times 1000$  крат) не обнаружено ни расслоений, ни микрорастрескивания луженого слоя даже в месте наименьшего радиуса изгиба, а значит, в месте действия наибольших по значению напряжений на приповерхностных слоях изгибаемого материала. Внутренние, по отношению к радиусу изгиба, слои жести находились под воздействием сжимающих напряжений, вследствие чего образовались естественные для такого случая складки. Однако этот процесс не привел к нарушению целостности поверхностного слоя.

Отмечено, что целостность покрытия сохранялась вплоть до места пластического разрыва прошивнем прессы центральной части заготовки (рисунок 4).

Для изучения изменения микротвердости выбран описанный выше участок с минимальным радиусом изгиба как получивший наибольшую степень деформации. На рисунке 5 показана схема замеров микротвердости листа по обозначенным участкам в месте изгиба. Микротвердость измерялась вдоль внутреннего (по отношению к радиусу гибки) (рисунок 5, слой 3), вдоль наружного (рисунок 5, слой 2) и срединного слоев (рисунок 5, слой 1). Измерение микротвердости производилось на материале листа, а не на луженном слое.



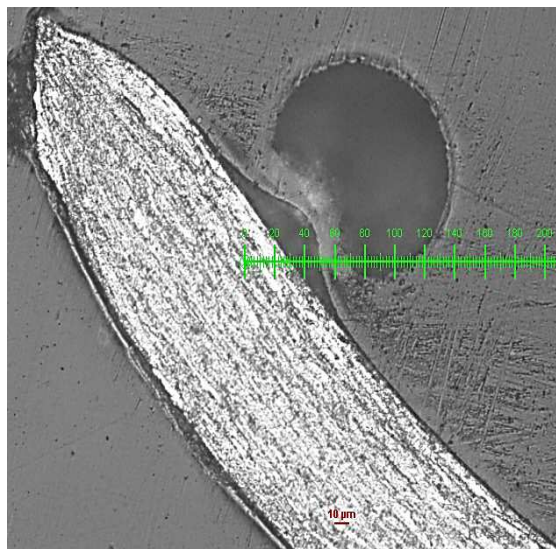
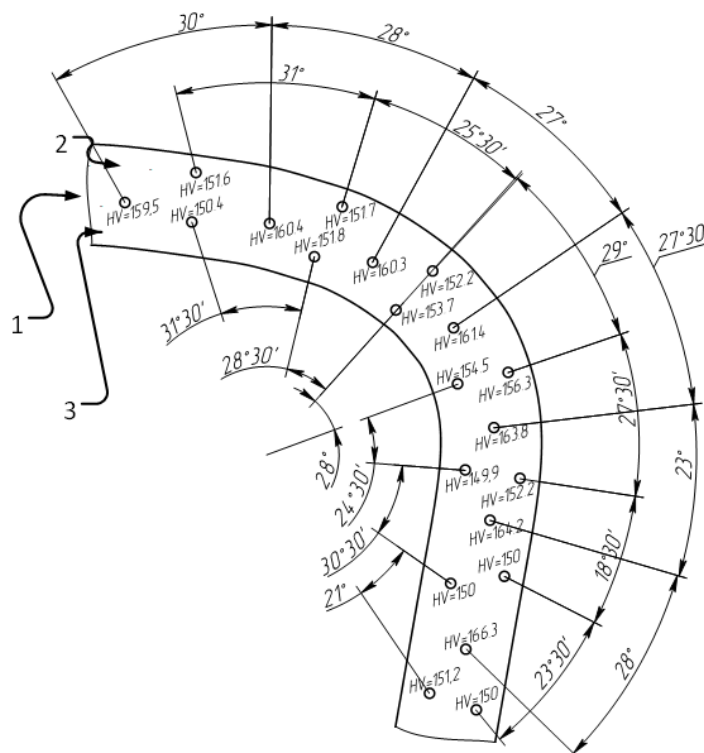


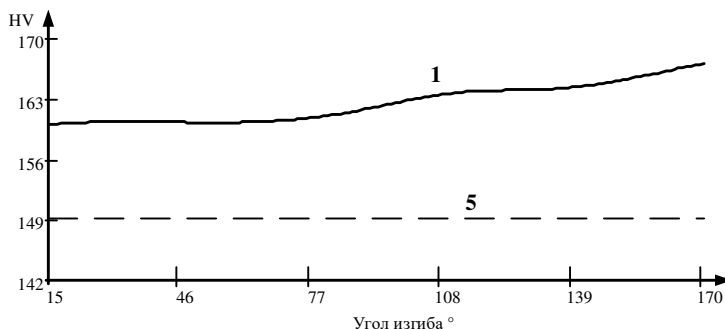
Рисунок 4. – Микроструктура листа в месте пластического разрыва центральной части заготовки прошивнем прессы (белая жель толщиной 0,105 мм (0,09 мм до лужения), сталь TS 435, аналог стали 08пс, ГОСТ 1050, увеличение  $\times 200$ )



1 – срединный слой листа; 2 – наружный слой листа (относительно радиуса изгиба);  
3 – внутренний слой листа (относительно радиуса изгиба)

Рисунок 5. – Схема замеров микротвердости наружных и внутреннего слоев листа по линии изгиба (белая жель толщиной 0,105 мм (0,09 мм до лужения), сталь TS 435, аналог стали 08пс, ГОСТ 1050)

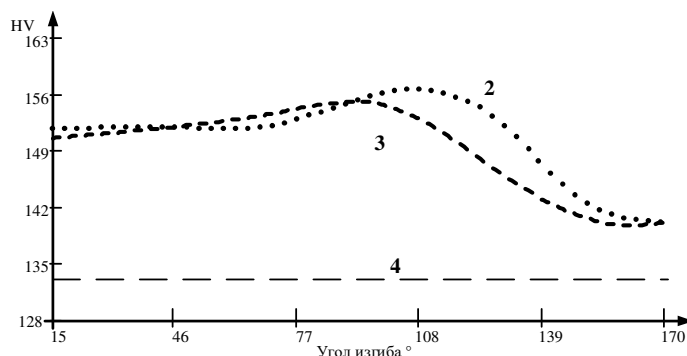
Измерения микротвердости недеформированных образцов показали, что среднее значение величины твердости срединного слоя листа составляет 149,1 HV, наружных – 133,5 HV. Как видно из графика (рисунок 6, кривая 1), микротвердость срединного слоя листа увеличилась вдоль всего периметра изгиба с 159,5 до 165,5 HV. На графике в центральных областях периметра изгиба наблюдается небольшой всплеск роста значений микротвердости. В остальных частях графика значения HV среднего слоя возрастали практически прямолинейно. Рост значений HV в сравнении с микротвердостью недеформированных образцов (рисунок 6, линия 5) составил от 7,5% в начале графика до 12,6% в конце.



1 – микротвердость срединного слоя в месте изгиба;  
5 – средняя микротвердость срединного слоя недеформированного образца (149,1 HV)

**Рисунок 6. – График изменение микротвердости срединного слоя листа вдоль периметра изгиба (белая жель толщиной 0,105 мм (0,09 мм – до лужения), сталь TS 435, аналог стали 08пс, ГОСТ 1050)**

Исследование микротвердости наружного (рисунок 7, кривая 2) и внутреннего (рисунок 7, кривая 3) слоев относительно радиуса изгиба листа показали несколько другую картину изменения значений HV. Твердость листа увеличивалась вплоть до центральных областей линии изгиба. Далее, после достижения определенного значения, график HV падает примерно до одинакового значения для наружного и внутреннего слоев. Максимальное значение микротвердости: 156,3 HV для наружного слоя и 154,5 HV – для внутреннего. Данные значения зарегистрированы ближе к центру линии изгиба. В начале и конце линий изгиба твердость наружного слоя составила 151,6 HV, внутреннего – 150,4. На выходе оба графика стремятся к значению в 150,5 HV. Таким образом, можно предположить, что все изменения микротвердости вызваны деформационным процессом.



2 – слой 2 (снаружи изгиба); 3 – слой 3 (внутри изгиба);  
4 – средняя микротвердость наружных слоев недеформированного образца (133,5 HV)

**Рисунок 7. – График изменения микротвердости внутреннего и наружного слоев листа вдоль линии изгиба (белая жель толщиной 0,105 мм (0,09 мм – до лужения), сталь TS 435, аналог стали 08пс, ГОСТ 1050)**

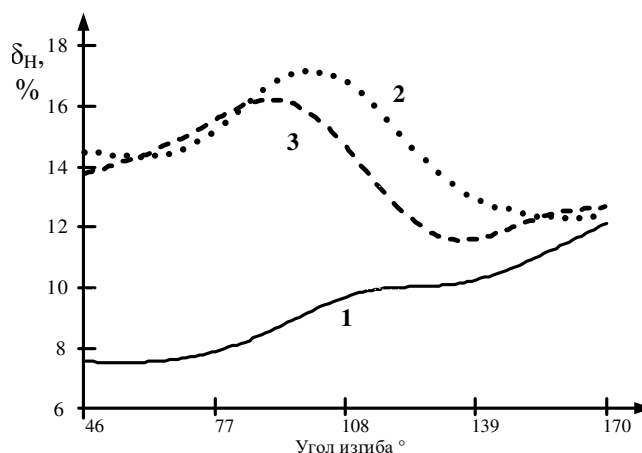
На рисунке 8 показаны графики изменений относительных значений микротвердости слоев листа вдоль линии изгиба в сравнении с микротвердостью недеформированного образца. Значения степени наклепа  $\delta_n$  в контрольных сечениях определялись по формуле

$$\delta_n = \frac{HV_i - HV_N}{HV_N} 100\% ,$$

где  $HV_i$  – текущее значение микротвердости в  $i$ -том контрольном сечении;  $HV_N$  – средняя микротвердость соответствующего слоя недеформированного образца.

Из графиков видно (рисунок 8), что наибольшие значения наклепа наблюдаются в наружных слоях листа, наименьшие – в срединных. При значениях угла изгиба  $150^\circ$  и более все значения  $\delta_n$  стремятся к одной величине (примерно 12,75%), но величины  $\delta_n$  срединного слоя возрастают (рисунок 8, линия 1), наружного – падают к этому значению (рисунок 8, линия 2), а внутреннего – выходят на него с колебаниями (рисунок 8, линия 3). Однако абсолютные значения микротвердости при этом принимают различные значения. Наибольшая степень наклепа наблюдается в наружном слое (+17,1% ближе к значениям угла изгиба в  $100...110^\circ$ ). Максимальные зна-

чения изменения твердости внутреннего слоя наблюдаются в срединных слоях (+16,2%). Наибольшее упрочнение получили наружный и внутренний слой листа относительно линии его изгиба.



1 – срединный слой; 2 – слой снаружи изгиба; 3 – слой внутри изгиба

Рисунок 8. – График изменений степени наклепа слоев листа вдоль линии изгиба образца (белая жечь толщиной 0,105 мм (0,09 мм до лужения), сталь TS 435, аналог стали 08пс ГОСТ 1050, увеличение ×200)

**Заключение.** Анализ результатов исследований показывает:

1. Целостность покрытия сохранялась вплоть до места пластического разрыва прошивнем прессы центральной части заготовки, что обозначает высокое качество нанесенного тонкого слоя (толщиной около 7 мкм) олова на стальной тонкий лист толщиной ≈90 мкм.

2. В ходе анализа микротвердости обнаружено наличие характерных для жести слоев. В данном случае внутренний слой имеет более высокие значения микротвердости, чем приграничные к поверхностным.

3. Пик значений изменения твердости внутреннего и наружного (по отношению к радиусу изгиба) слоев наблюдаются в срединных областях выбранного изгиба с минимальным радиусом. Максимальное значение степени наклепа наблюдается в наружном слое (+17,1%). При значениях угла изгиба 150° и более значения степени наклепа во всех слоях стремятся к одному значению (примерно 12,75%).

4. Срединный слой жести, выбранный вдоль линии изгиба, получил наименьшее изменение значений  $\delta_n$ . Но график  $\delta_n$  срединного слоя непрерывно возрастает вдоль всей линии изгиба. Увеличивались и значения микротвердости этого слоя, тогда как график значений приповерхностных слоев имеет пик в центре линии изгиба с минимальными значениями HV (и  $\delta_n$ ) на минимальных и максимальных значениях угла изгиба. Из этого следует, что степень наклепа срединного слоя происходит при любом изменении формы листового материала независимо от степени наклепа наружных слоев. Установленный характер изменения микротвердости слоев белой жести требует дополнительных исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зиновьев, А.В. Российская металлургия – настоящее и будущее / А.В. Зиновьев, В.А. Трусов. // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2008. – № 1. – С. 151–159.
2. Зиновьева, Н.Г. Черная металлургия мира и России в условиях пандемии / А.В. Зиновьев // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. – 2022. – Т. 76, № 7. – С. 657–664.
3. Lenard, J.G. Primer on flat rolling / J.G. Lenard. – Hoboken : Elsevier Science, 2014. – 876 p. DOI: 10.1016/C2012-0-06474-5.
4. Samiee, P. Thermal and structural behavior of cold-formed steel frame wall under fire condition / P. Samiee, E. Niari, E. Ghandi // *Engineering Structures*. – 2021. – V. 252. – P. 113563. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113563/
5. Yun, X. Design of cold-formed steel SHS and RHS beam-columns considering the influence of steel grade / X. Yun, X. Meng, L. Gardner // *Thin-Walled Structures*. – 2022. – Vol. 171. – P. 108600. DOI: 10.1016/j.tws.2021.108600
6. Wang, D. Research and Development Trend of Shape Control for Cold Rolling Strip / D. Wang, H. Liu, J. Liu // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. – 2017. – № 30. – P. 1248–1261. URL: <https://cjme.springeropen.com/articles/10.1007/s10033-017-0163-8>.

#### REFERENCES

1. Zinov'ev, A.V. & Trusov, V.A. (2008). Rosсыyskaya metallurhiyya – nastoyashchee y budushchee [Russian metallurgy – present and future]. *Novi materialy i tekhnolohiyi v metalurhiyi ta mashynobuduvanni* [New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering], (1), 151–159. (In Russ., abstr. in Engl.).

2. Zinov'yeva, N.G. (2022). Chernaya metallurgiya mira i Rossii v usloviyakh pandemii [Ferrous metallurgy of the world and Russia in a pandemic]. *Chernaya metallurgiya Byulleten' nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information], T. 76, (7), 657–664. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Lenard, J.G. (2014). *Primer on flat rolling*. Hoboken: Elsevier Science. DOI: 10.1016/C2012-0-06474-5
4. Samiee, P. Niari, E. & Ghandi, E.E. (2021). Thermal and structural behavior of cold-formed steel frame wall under fire condition. *Engineering Structures*, (252), 113563. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113563/
5. Yun, X., Meng, X. & Gardner, L. (2022). Design of cold-formed steel SHS and RHS beam-columns considering the influence of steel grade. *Thin-Walled Structures*, (171), 108600. DOI: 10.1016/j.tws.2021.108600
6. Wang, D., Liu, H. & Liu, J. (2017). Research and Development Trend of Shape Control for Cold Rolling Strip. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, (30), 1248–1261. URL: <https://cjme.springeropen.com/articles/10.1007/s10033-017-0163-8>.

Поступила 01.08.2022

## INFLUENCE OF DEFORMATION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF TIN-PLATED TIN

V. D'YAKONOV, S. PILIPENKO, O. SHTEMPEL'

*Annotation. The influence of deformation on the mechanical properties of the characteristic layers of tin plate when a through hole is pierced in it is considered. Graphic dependences are obtained showing the change in the microhardness of the outer and inner layers of tinned tin along the thickness of the sheet material depending on the angle of its bending, the integrity of the outer tinned layer of tinplate in the finished product is studied. It has been established that the integrity of the coating is preserved up to the point of plastic rupture by the piercing of the press in the central part of the workpiece. An analysis of the distribution of microhardness values showed that the inner layer has higher values than the outer ones, the maximum value of the hardening degree is observed in the outer layer (+17,1%). At values of the bending angle of more than 150 degrees, the values of the degree of hardening in all layers tend to the same value (approximately 12,75%). Analysis of the graph of changes in the degree of hardening of the sheet layers along the bending line of the sample showed that the degree of hardening of the middle layer occurs with any change in the shape of the sheet material, regardless of the degree of hardening of the outer layers.*

**Keywords:** sheet metal, tin plate, cold deformation, sheet stamping, profile, radius bending angle, microhardness.

УДК 621.81

## ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН, канд. техн. наук, доц. Т.В. ВИГЕРИНА,  
В.И. КРАВЧУК, И.И. ПИЛИПЕНОК  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Показано, что для увеличения срока службы деталей тяжело нагруженных узлов трения автомобилей рекомендуется использовать комплексные смазки: литиевую смазку с использованием структурирующей и прирабочной добавки в виде пакета наноразмерных алмазов и сульфат-кальциевую с добавками фторопласта и вязкостной присадкой. Испытания смоделированы на основании условий работы пары трения ось–втулка балансира, эксплуатируемые с контактным давлением 1,5–6,0 МПа. Установлено, что для пары трения бронза–сталь в условиях граничного трения при указанном контактном давлении максимальная износостойкость образцов на стадиях приработки и устоявшегося трения достигается при использовании комплексной сульфат-кальциевой пластичной смазки с добавками фторопласта и вязкостной присадкой. Использование комплексной литиевой смазки с наноразмерными алмазами сокращает период приработки на всех указанных режимах и эффективна при удельной нагрузке, не превышающей 3 МПа.

**Ключевые слова:** износостойкость, узлы трения, наноразмерные алмазы, фторопласт, коэффициент трения, комплексные смазки.

**Введение.** Во многих узлах современных машин и механизмов имеются пары трения, работающие в тяжелых условиях. Высокие значения удельных нагрузок и скоростей скольжения, нередко действующих совместно с динамическим нагружением, и, как правило, при недостаточной смазке, создают неблагоприятные условия работы узлов трения, что приводит к потере их работоспособности. В трехосных грузовых автомобилях, а также в двух- и трехосных полуприцепах МАЗ используется задняя подвеска балансира типа.

Балансирная подвеска имеет следующую конструкцию (рисунок 1). В задней нижней части рамы автомобиля жестко установлены кронштейны, в которых с помощью подшипников скольжения вмонтированы короткие оси балансира. На осях также с помощью подшипников установлены балансиры, играющие в подвеске одну из основных ролей. Сверху на балансирах с помощью стремянок закреплены перевернутые полуэллиптические рессоры. Кронштейны и балансиры установлены между средним и задним мостами автомобиля, поэтому рессоры концами опираются на балки мостов, фиксируясь на них с помощью специальных опорных кронштейнов<sup>1</sup>.



Рисунок 1. – Балансир автомобиля МАЗ

Благодаря такой конструкции задние мосты автомобиля и вся их подвеска, включая рессоры, образует тележку, которая может более или менее свободно качаться как единое целое на осях балансира – это дает автомобилю возможность преодолевать небольшие и крупные неровности дороги, т.к. качающиеся движения тележки исключают крен и кручение рамы. С другой стороны, мосты благодаря рессорам и реактивным штангам могут независимо друг от друга двигаться в вертикальной плоскости, что позволяет сглаживать мелкие неровности дороги.

<sup>1</sup> Балансир МАЗ: основа устойчивости минских грузовиков и прицепов [Электронный ресурс] / Автоальянс. – 04.08.2014. – Режим доступа: <https://www.autoopt.ru>, свободный.

Подвеской такой конструкции сегодня оснащаются большинство моделей трехосных автомобилей и многоосных полуприцепов МАЗ.

Подвеска грузового автомобиля работает в сложных условиях, все ее элементы испытывают большие нагрузки (в единицы и десятки тонн), поэтому их срок службы ограничен. Довольно часто отказывают балансиры МАЗ, кронштейны, рессоры, реактивные штанги, а также разнообразные сальники, уплотнители и иные компоненты. Наиболее частой неисправностью является появление трещин и изломов кронштейнов, балансира и изнашивание втулок балансира (рисунок 2). Износ втулки является распространенной причиной отказа балансира. Скорость изнашивания увеличивается при движении. Увеличение пространства между втулкой и осью влияет на рычаг управления, который откидывается от оси и деформирует детали. Номинальный зазор составляет 0,12–0,30 мм. Изношенные втулки следует заменять при достижении зазора между втулкой и осью в 1 мм.



Рисунок 2. – Втулка балансира

Ресурс узлов трения в значительной степени определяется работоспособностью смазочных материалов. Современное развитие техники связано с повышением скоростей и нагрузок в узлах трения, что требует разработки новых смазочных материалов, обладающих повышенной нагрузочной способностью и обеспечивающих более низкую интенсивность изнашивания. В настоящее время получают все большее распространение попытки направленного улучшения свойств пластичных смазок введением третьего компонента (добавки) в состав пластичной смазки. Введенные в состав смазки разнообразные твердые добавки даже в случае выдавливания смазочного материала из зоны трения остаются в ней, образуя разделяющий слой, снижающий степень металлического контакта поверхностей.

Трибомеханическое модифицирование представляет собой финишную операцию обработки поверхности, предназначенную для окончательного формирования структурно-фазового состояния рабочей поверхности. Оно рекомендуется для применения преимущественно в узлах трения-скольжения (подшипники скольжения, опоры, направляющие и т.д.), для тяжело нагруженных узлов трения, работающих в условиях высоких нагрузок и вибраций (карьерная техника, железнодорожный транспорт, строительные дорожные машины, сельхозтехника, дробилки, грохоты), для повышения качества узлов и деталей, подверженных сильному износу (штоки, узлы трения, подшипники, передачи, поршни, цилиндры ДВС и др.)<sup>2</sup> [2].

В комплексной литевой смазке в качестве основных компонентов пакета добавок используются дисульфид молибдена (противозадирная (антифрикционная) добавка), шихта ША-А (структурирующая и приработочная добавка). Повышение функциональных свойств смазки достигается введением в ее состав пакета нано- (рисунок 3, а) и микроразмерных (рисунок 3, б) добавок. Выбор количественного состава пакета добавок проведен с точки зрения оптимального сочетания объемно-механических (коллоидная стабильность, пенетрация и температура каплепадения) и триботехнических (нагрузка сваривания, нагрузка заедания индекс задира) характеристик смазки.

Комплексная литевая дисперсная фаза по сравнению с простой литевой дисперсной фазой при одинаковых дисперсионных средах придает смазке следующие улучшенные качества<sup>2</sup>:

- возрастание несущей способности граничного слоя смазки в 2–3 раза, что позволяет повысить нагрузочные характеристики узла трения;
- повышение температуры каплепадения на 20–40%, что дает возможность повысить допустимую температуру применения узла и механизма в целом;

<sup>2</sup> Иванов, В.П. Триботехническое модифицирование поверхностей узлов трения в технике / В.П. Иванов, А.В. Дудан, Т.В. Вигерина // Актуальные проблемы развития экономики и управления в современных условиях : материалы IV междунар. науч.-практ. конф., Москва, 10 нояб. 2021 г. / Моск. экон. ин-т. – М. : МЭИ, 2021. – С. 45–48.



- увеличение механической стабильности в 1,5–2,0 раза, позволяющая ужесточать режимы работы узла без опасения разрушения и вытекания смазочного материала;
- общее повышение и переход на другой уровень всех остальных параметров смазки, приводящее к увеличению работоспособности смазочного материала и, как следствие, узла в целом.

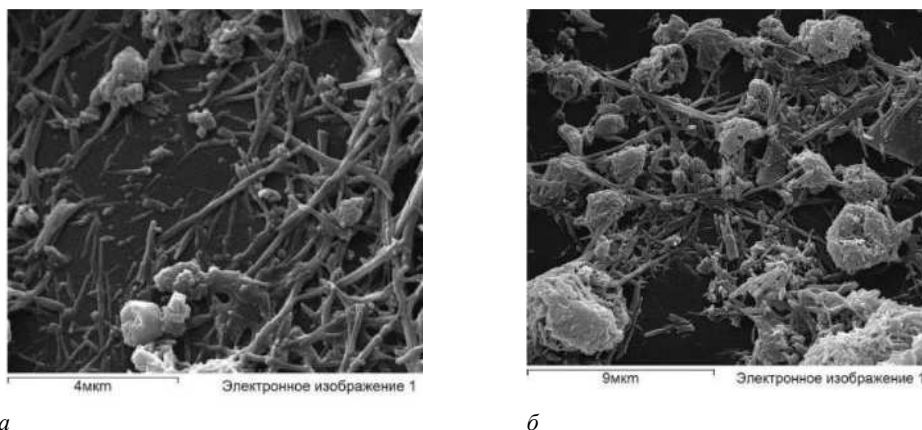


Рисунок 3. – Микроструктура дисперсной фазы комплексной литиевой смазки с пакетом наноразмерных алмазосодержащих добавок [3]

Комплексная сульфат-кальциевая с добавками фторопласта и вязкостной присадкой за счет введения в состав мелкодисперсного фторопласта улучшает антифрикционные характеристики, повышает устойчивость в агрессивных средах (концентрированные кислоты и щелочи).

Цель данной работы – повышение износостойкости деталей тяжело нагруженных узлов трения за счет введения в литиевую и сульфат-кальциевую смазки приработочных добавок в виде пакета наноразмерных алмазов и фторопласта.

**Методы исследований.** Исследуемые образцы изготовлены из бронзы Бр05Ц5С5 ГОСТ 613-79 и представляют собой ролик Ø 10 x 15 мм. В качестве контртела был выбран диск Ø 70 x 6 мм из закаленной стали 45.

Триботехнические испытания проводились на универсальной машине трения ММВ-1А вертикального типа с компьютерным управлением. Машина поддерживает силу нагрузки в течении эксперимента постоянной с отклонением  $\pm 2$  Н. Относительная погрешность измерения силы трения не превышала  $\pm 2\%$  при жидкостном режиме смазывания. Модель испытаний приведена на рисунке 4.

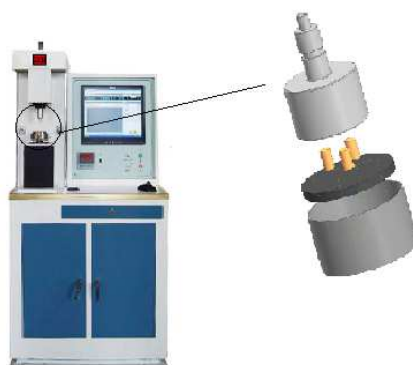


Рисунок 4. – Модель испытаний

Перед проведением исследования для повышения точности эксперимента производилась подготовка поверхности образцов. Для уменьшения шероховатости производилась притирка с использованием наждачной бумаги зернистостью Р600.

В процессе испытаний фиксировались значения величин силы трения и коэффициента трения с частотой один раз в 1 с в режиме реального времени с возможностью сохранения в файл. Полученные данные аккумулировались в графическом и текстовом виде и после аппроксимации подвергались анализу.

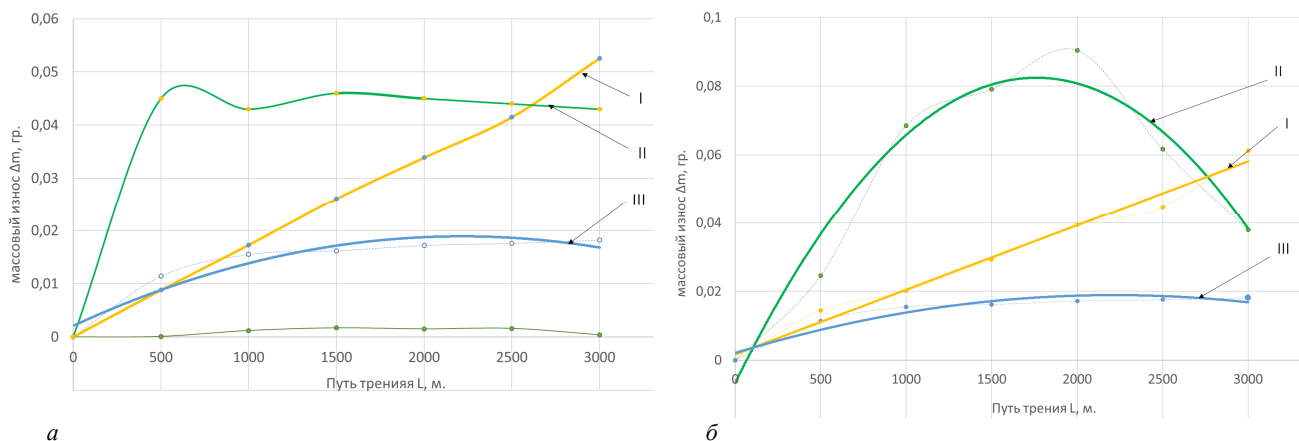
Интенсивность изнашивания оценивалась массовым износом  $\Delta m$ , мг, на аналитических весах AS 60/220/C/2/N после прохождения каждых 500 м.

Для определения зависимости влияния нагрузочно-скоростных режимов трибвзаимодействия была использована пластичная комплексная литиевая смазка +1,0 масс.% ША-А и комплексная сульфат-кальциевая

с добавками фторопласта и вязкостной присадкой. В качестве базовой смазки была выбрана серийно выпускаемая пластичная смазка Литол-24 (ГОСТ 21150-87).

Режимы трения при испытании образцов: давление 3–6 МПа; скорость скольжения 0,1 м/с; расстояние, пройденное образцами, – 500–3000 м.

**Основная часть.** Результаты испытаний, приведенные на рисунке 5, *а*, *б*, показали, что влияние модифицирующей добавки к смазке на процессы изнашивания зависит от давления. При относительно низком номинальном давлении 3 МПа износ образцов из бронзы Бр05Ц5С5 при трении в среде смазки модифицированной наноразмерными алмазами сопоставим с массовым износом образцов, испытываемых в смазке Литол-24 (рисунок 5, *а*). Минимальным износом (~2 раза меньше) обладает образец, работающий в комплексной сульфат-кальциевой смазке с добавками фторопласта и вязкостной присадкой. С увеличением контактного давления до 6 МПа массовый износ для смазки с ультрадисперсной алмазографитовой шихтой (УДАГ) в 1,12 раз превышает износ Литол-24 и в 4 раза износ смазки с добавками фторопласта. Однако следует отметить, что при различных давлениях период приработки смазок с наночастицами завершается в интервале от 500 до 1500 м, тогда как приработка с использованием смазки Литол-24 достигает 5000 м. Повышение триботехнических свойств и снижение периода приработки при модифицировании пластичной смазки наноразмерными частицами может быть обусловлено как изменением физико-химических и реологических свойств смазочного материала (в частности повышением термостойкости и несущей способности масляной пленки), так и упрочнением поверхностных слоев пары трения за счет их интенсивного пластического деформирования в процессе трения со смазочным материалом, содержащим твердые частицы [2]. В качестве причин противоизносного действия наноразмерных твердых частиц рассматривается упорядочение структуры смазочного материала под воздействием собственного заряда наноразмерных частиц. Причиной возникновения заряда является несовершенство их строения, появляющееся на стадии получения частиц либо в процессе эксплуатации трибосопряжения (триборазрушения).



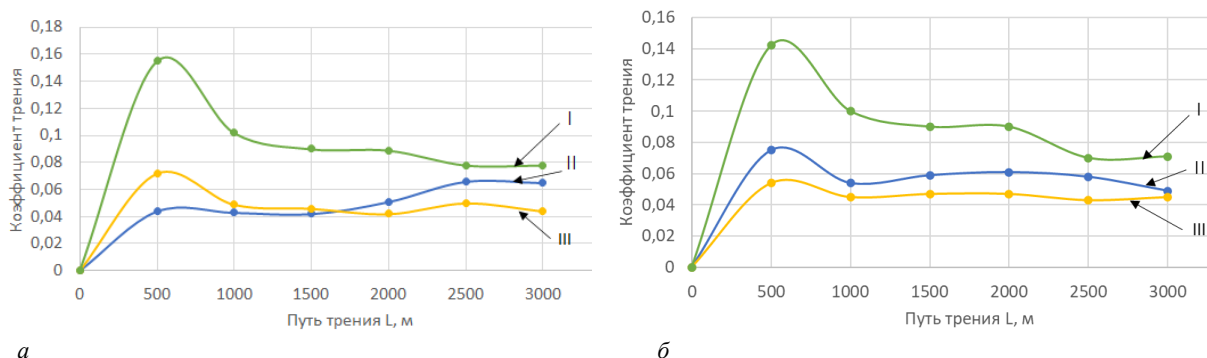
**I – Литол-24; II – комплексная литиевая смазка +1,0 масс.% ША-А;  
III – комплексная сульфат-кальциевая с добавками фторопласта и вязкостной присадкой;  
*а* – при удельной нагрузке 3 МПа; *б* – при удельной нагрузке 6 МПа**

**Рисунок 5. – Зависимость массового износа от пути трения**

Анализ характера изменения коэффициента трения при различных нагрузках и смазочных материалах сопоставим с изменениями массового износа. В случае испытаний с контактным давлением 3 МПа (рисунок 6, *а*) максимальный коэффициент трения возникает при использовании базовой смазки Литол-24  $f = 0,08$ . Значения коэффициентов трения комплексных смазок с твердыми частицами приблизительно одинаковы и лежат в интервале значений  $f = 0,04–0,06$ , что в 1,3–2,0 раза ниже коэффициента трения базовой смазки. При увеличении нагрузки до 6 МПа характер изменения коэффициентов трения практически не изменяется, лишь на этапе приработки коэффициент трения литиевой смазки с УДАГ на 0,02 превышает коэффициент трения смазки с добавкой фторопласта, в то время как при контактном давлении 3 МПа наблюдалась обратная картина. Период приработки всех пластичных смазок сопровождается повышением коэффициентом трения, максимальная разница коэффициента трения на этапе приработки и этапе установившегося режима (в ~1,7 раза) характерна для смазки Литол-24, для комплексных смазок это значение значительно меньше ~1,3.

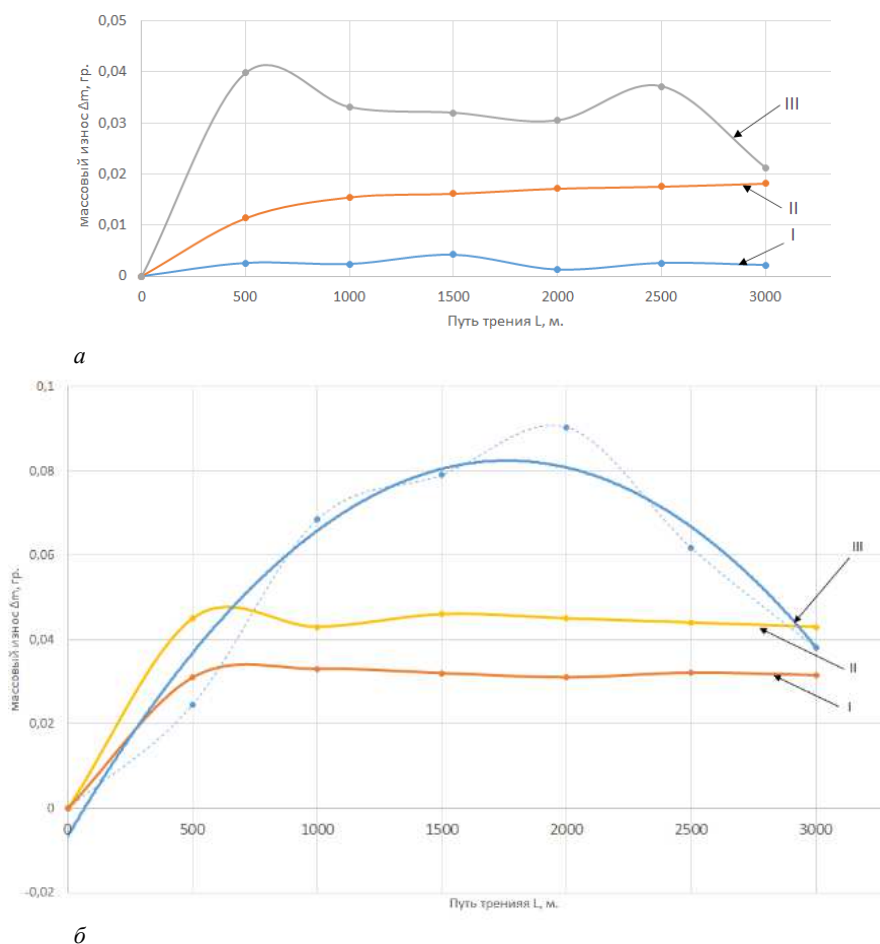
Увеличение номинальных давлений испытаний до 6 МПа приводит к увеличению массового износа образцов, работающих при одной и той же смазке (рисунок 7, *а*, *б*). Массовый износ при использовании комплексной сульфат-кальциевой смазки с добавками фторопласта и вязкостной присадкой на этапе приработки при увеличении удельной нагрузки с 1,5 до 6 МПа увеличился в 8 раз, а на этапе установившегося режима – в 5 раз. Испытания комплексной литиевой смазки +1,0 масс.% ША-А показали увеличения массового износа на первом этапе в 3 раза, на втором – в 2,5 раза.





I – Литол-24; II – комплексная литевая смазка +1,0 масс. % ША-А;  
 III – комплексная сульфат-кальциевая с добавками фторопласта и вязкостной присадкой;  
 а – при удельной нагрузке 3 МПа; б – при удельной нагрузке 6 МПа

Рисунок 5. – Зависимость коэффициента трения от пути трения



I – 1,5 МПа; II – 3 МПа; III – 6 МПа  
 а – комплексная литевая смазка +1,0 масс. % ША-А;  
 б – комплексная сульфат-кальциевая с добавками фторопласта и вязкостной присадкой

Рисунок 7. – Зависимость массового износа от давления

Исследования влияния давления испытаний на режим приработки и триботехнические свойства фрикционной пары бронза–сталь, проведенные при номинальном давлении испытаний, равном 1,5; 3 и 6 МПа, показали, что максимальная износостойкость образцов на стадиях приработки и устоявшегося режима трения достигается при использовании комплексной сульфат-кальциевой смазки с добавками фторопласта и вязкостной присадкой. Одной из возможных причин указанного эффекта является формирование на поверхности бронзы разделительного слоя с повышенной нагрузочной способностью и расширенным диапазоном рабочих температур. Использование

комплексной литиевой смазки с шихтой УДАГ сокращает период приработки на всех указанных режимах и эффективно при удельной нагрузке, не превышающей 3 МПа.

**Заключение.** Показано, что повышение функциональных свойств пластичной смазки может быть достигнуто введением в ее состав пакета нано- и микроразмерных добавок. Исследования, смоделированные на основании условий работы тяжелонагруженных деталей узлов трения трехосных грузовых автомобилей МАЗ (балансир), подтвердили, что износостойкость пар трения увеличивается, а период приработки снижается при использовании комплексных смазок. Получены графические зависимости влияния удельной нагрузки испытаний на триботехнические свойства пары трения бронза–сталь, показывающее, что максимальная износостойкость образцов на стадиях приработки и устоявшегося режима трения достигается при использовании комплексной сульфат-кальциевая смазки с добавками фторопласта и вязкостной присадкой. Использование комплексной литиевой смазки с ультрадисперсной алмазографитовой шихтой сокращает период приработки на всех указанных режимах и эффективно при удельной нагрузке, не превышающей 3 МПа. Смазка Литол-24 обеспечивает износостойкость на уровне литиевой смазки с алмазографитовой шихтой, но при этом период приработки пары трения увеличивается до 3,5–4 раз.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Леонт'ев, Л.Б. Системный анализ технологии формирования износостойких покрытий на поверхностях трения деталей / Л.Б. Леонт'ев, А.Л. Леонт'ев, В.Н. Макаров // *Фундамент. исслед.* – 2014. – № 12 (ч. 4). – С. 729–734.
2. Модифицирование материалов покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П.А. Витязь [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 527 с.
3. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П.А. Витязь [и др.] ; под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 381 с.

#### REFERENCES

1. Leont'yev, L.B., Leont'yev, A.L. & Makarov, V.N. (2014). Sistemnyy analiz tekhnologii formirovaniya iznosostoykikh pokrytiy na poverkhnostyakh treniya detaley [System analysis of technology for the formation of wear-resistant coatings on friction surfaces of parts]. *Fundamental'nyye issledovaniya [Fundamental research]*, (12, part 4), 729–734. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Vityaz', P.A., Zhornik, V.I., Kukareko, V.A., Komarov, A.I. & Senyut', V.T. (2011). *Modifitsirovaniye materialov pokrytiy nanorazmernymi almazosoderzhashchimi dobavkami [Modification of coating materials with nanosized diamond-containing additives]*. Minsk: Minsk: Bielaruskaja Navuka. (In Russ.).
3. Vityaz', P.A., Il'yushchenko, A.F. & Zhornik, V.I. (2013). *Nanoalmazы detonatsionnogo sinteza: polucheniye i primeneniye [Nanodiamonds of detonation synthesis: production and application]*. In P.A. Vityaz' (Eds.). Minsk: Minsk: Bielaruskaja Navuka. (In Russ.).

Поступила 17.06.2022

### **INCREASED WEAR RESISTANCE OF PARTS HEAVY-LOADED FRICTION ASSEMBLY OF VEHICLES**

**A. DUDAN, T. VIGERINA, V. KRAVCHUK, I. PILIPENOK**

*The paper shows that in order to increase the service life of parts of heavily loaded friction units of cars, it is recommended to use complex lubricants: lithium grease using a structuring and pre-processing additive in the form of a package of nanoscale diamonds and calcium sulfate with fluoroplast additives and a viscous additive. The tests are modeled on the basis of the operating conditions of the axle – bushing balancer friction pairs operated with contact pressure 1.5–6.0 MPa. It is established that for the bronze–steel friction pair under conditions of boundary friction at the specified contact pressure, the maximum wear resistance of the samples at the stages of run-in and established friction is achieved by using a complex calcium sulfate grease with fluoroplast additives and a viscous additive. The use of a complex lithium lubricant with nanoscale diamonds reduces the run-in period in all these modes and is effective at a specific load not exceeding 3 MPa.*

**Keywords:** wear resistance, friction units, nanosized diamonds, fluoroplastic, coefficient of friction, complex lubricants.

УДК 621.3.049.774

## ФОРМИРОВАНИЕ РИСУНКА В ПЛЕНКЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ

В.В. ЕМЕЛЬЯНОВ, д-р техн. наук, проф. С.В. БОРДУСОВ

(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

Формирование рисунка в пленке нитрида кремния включает нанесение на полупроводниковую подложку с топологическими элементами пленок диоксида кремния и нитрида кремния химическим осаждением из парогазовой фазы, фоторезистивной маски методом стандартной фотолитографии, реактивно-ионное травление нитрида кремния во фторсодержащей плазме и удаление фоторезистивной маски. Для повышения селективности травления нитрида кремния по отношению к диоксиду, предотвращения микротрещин и повышения качества фотолитографического рисунка после формирования пленки нитрида кремния проводят обработку пленки 1–5 импульсами ближнего инфракрасного излучения длительностью от 0,05 до 0,5 с при интенсивности от 0,2 до 1,0 Дж/см<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** плазмохимическое травление, диоксид кремния, нитрид кремния, инфракрасное излучение.

**Введение.** Существующая технология формирования рисунка в пленке нитрида кремния включает плазмохимическую обработку газовой смесью, состоящей из хладона и кислорода при следующем соотношении компонентов: хладон – 7 л/ч, кислород – 0,6 л/ч, при рабочем давлении 20±5 Па и скорости травления 35±5 нм/мин. Методы формирования пленки и фотолитографического рисунка являются стандартными для микроэлектроники [1].

Данная технология предназначена для получения высоких скоростей травления, однородности и улучшения микрорельефа полученной структуры. Ее недостатком является значительная неопределенность режима травления, т.к. активным компонентом является хладон. Поскольку хладонов существует более 20 видов [2], отличающихся между собой количеством атомов углерода, водорода, а также количеством и конкретным типом атомов галогенов и строением углеродной цепи (цепные, циклические), то селективность травления по отношению к SiO<sub>2</sub> в данном случае остается величиной более чем неопределенной. При этом скорость травления зависит от множества технологических факторов, которые не всегда можно учесть, в связи с чем использование данной технологии является проблематичным.

Наиболее близким техническим решением является способ формирования рисунка в пленке нитрида кремния путем ее реактивно-ионного травления в плазме газовой смеси C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>F<sub>4</sub>-Ar-O<sub>2</sub> при следующем соотношении компонентов, об. %: 38–47% C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>F<sub>4</sub>, 4–8% O<sub>2</sub> и 45–58% Ar. При этом процесс травления пленки, не защищенной фоторезистом на поверхности SiO<sub>2</sub>, ведут при плотности ВЧ мощности 0,2–0,7 Вт/см<sup>2</sup> и давлении в реакторе 1–8 Па [3] (рисунок 1).

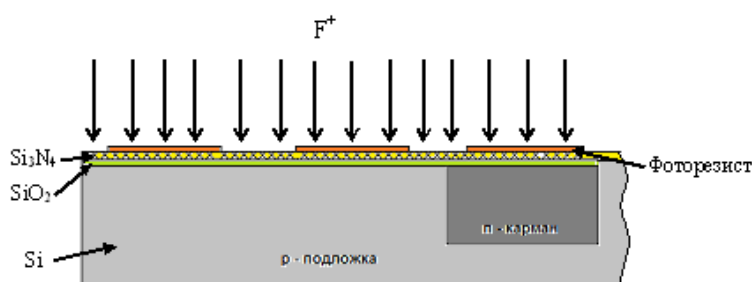


Рисунок 1. – Реактивно-ионное травление нитрида кремния

В этом случае достигнутая селективность травления нитрида кремния по отношению к его оксиду составляет 9:1. В современной технической литературе неизвестны случаи, когда указанная селективность травления достигалась по отношению к пленкам нитрида кремния, полученным химическим осаждением из парогазовой фазы. В то же время значения селективности, близкие к указанным, известны для пленок плазмохимического нитрида, используемого для пассивирующих и диэлектрических слоев [4]. В связи с тем, что особенности процесса формирования слоев диоксида и нитрида кремния на полупроводниковой подложке не раскрыты, но имеются конкретные указания на наличие этих слоев, следует предположить, что они являются стандартными для микроэлектронной технологии. Таким образом, процесс формирования рисунка в пленке нитрида кремния можно представить в виде следующей последовательности технологических операций: нанесение на полупроводниковую подложку с топологическими элементами пленок диоксида кремния и нитрида кремния, фоторезистивной маски методом стандартной фотолитографии, реактивно-ионное травление нитрида кремния

в плазме газовой смеси  $C_2H_2F_4$ -Ar- $O_2$  при соотношении компонентов, об. %: 38–47%  $C_2F_4H_2$ , 4–8%  $O_2$  и 45–58% Ar, при плотности ВЧ мощности 0,2–0,7 Вт/см<sup>2</sup> и давлении в реакторе 1–8 Па. Зависимости скорости травления нитрида кремния и двуоксида кремния от давления смеси рабочих газов, содержания кислорода в смеси рабочих газов и мощности ВЧ генератора приведены на рисунках 2–4.

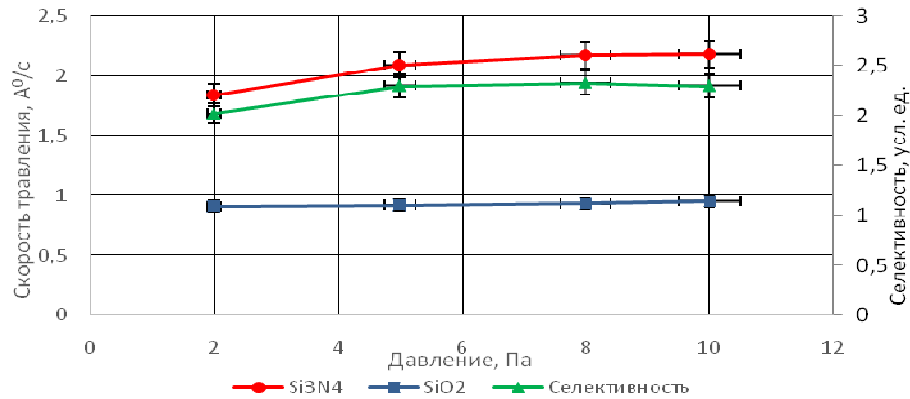


Рисунок 2. – Зависимости скорости травления от давления смеси рабочих газов

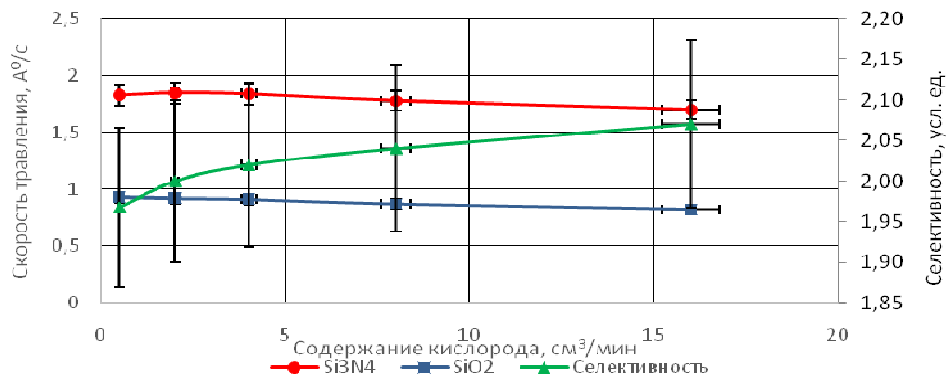


Рисунок 3. – Зависимость скорости травления от содержания кислорода в смеси рабочих газов

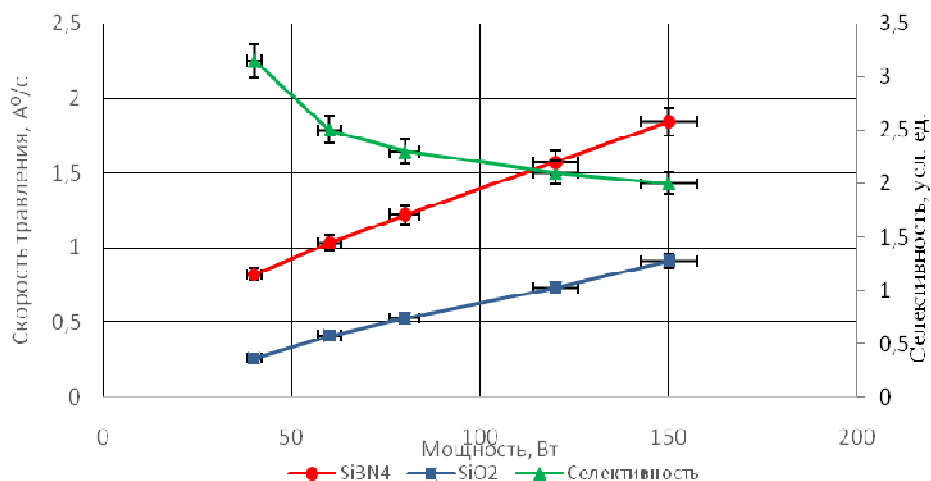
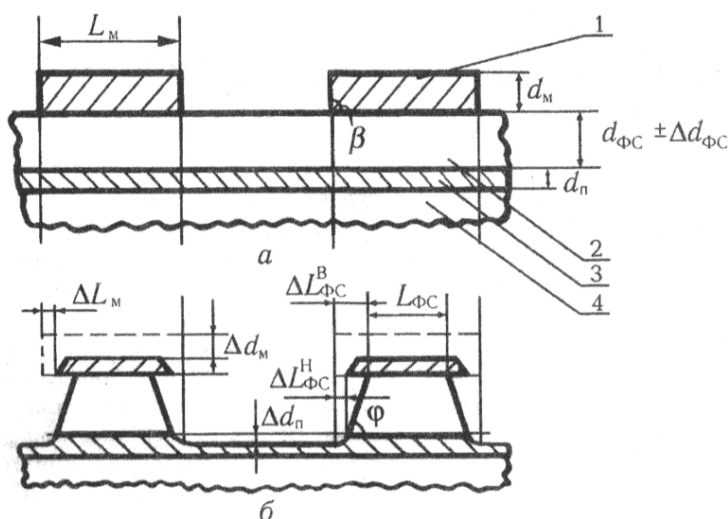


Рисунок 4. – Зависимость скорости травления от мощности ВЧ генератора

Как видно из рисунка 2, при повышении давления смеси рабочих газов растут скорости травления нитрида кремния и диоксида кремния, но из-за разницы в росте скорости наблюдается увеличение селективности травления нитрида кремния к диоксиду кремния. Согласно рисунку 3, растет скорость травления нитрида кремния и снижается скорость травления диоксида кремния при увеличении содержания кислорода в смеси, что вызывает увеличение селективности травления нитрида кремния к диоксиду кремния. По рисунку 4 – с повыше-

нием мощности ВЧ генератора возрастает скорость травления как нитрида кремния, так и диоксида кремния, но из-за более быстрого роста скорости травления диоксида кремния снижается селективность травления нитрида кремния при повышении мощности.

Операции формирования слоев диоксида кремния и его нитрида в данном случае следует рассматривать в связи с тем, что особенности характеристик этих слоев оказывают существенное влияние на решение поставленной задачи, а именно повышение селективности травления нитрида кремния по отношению к его диоксиду. Экспериментально установлено, что существующая технология характеризуется невысокой селективностью травления нитрида кремния, полученного химическим осаждением из парогазовой фазы, к диоксиду кремния, используемому в качестве подслоя при формировании маски для локального окисления кремния. Достигнутые значения селективности составляют в лучшем случае 1,8:1. При этом существенно ухудшается профиль боковых стенок формируемого рисунка, вследствие низкой степени анизотропии травления появляется существенный подтрав под фоторезистивную маску, приводящий к невозможности линейных размеров формируемых топологических элементов интегральных схем (ИС) (рисунок 5).



1 – маска; 2 – функциональный слой; 3 – подслой; 4 – подложка

Рисунок 5. – Вид структуры до (а) и после (б) операции ПТ функционального слоя

Так, для пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 200 нм величина бокового подтравки достигает 100 нм, что неприемлемо для ИС с субмикронными проектными нормами. Одним из известных способов повышения анизотропии травления является использование фторуглеродов с большим содержанием атомов углерода в молекуле, в частности замена  $\text{CHF}_3$  на  $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ . Однако при этом снижается скорость травления нитрида, т.к. полимер, образующийся из фторуглерода под воздействием плазмы, осаждается преимущественно на его поверхности, что повышает относительную скорость травления диоксида, но снижает селективность травления. Профиль сформированной структуры нитрида кремния представлен на рисунке 6.

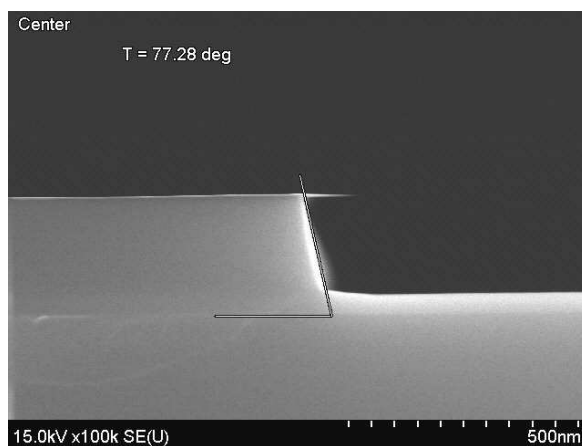


Рисунок 6. – Профиль сформированной структуры нитрида кремния

Повышение степени анизотропии травления может быть достигнуто повышением подаваемой ВЧ мощности, однако это приводит к другому нежелательному эффекту – возникновению канавок, иначе микротренчей (англ. *microtrench*), в диоксиде кремния вдоль вытравливаемого профиля в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  за счет отражения ионов, бомбардирующих поверхность, от боковых стенок вытравливаемого профиля. Наличие таких канавок при формировании локального оксида кремния приводит к повышению дефектности подложки по краю локального  $\text{SiO}_2$  и ухудшению качества изоляции элементов ИС.

Таким образом, недостатком является невысокая селективность травления  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , полученного химическим осаждением из парогазовой фазы, по отношению к термическому  $\text{SiO}_2$ , которая приводит к невысокому качеству формируемого фотолитографического рисунка в пленке нитрида кремния и снижению выхода годных приборов.

**Методика инфракрасного облучения.** Основной задачей данной работы является повышение селективности травления нитрида кремния, полученного химическим осаждением из парогазовой фазы, по отношению к термическому диоксиду кремния. Поставленная задача решается тем, что после формирования пленки нитрида кремния химическим осаждением из парогазовой фазы проводят обработку полученной пленки 1–5 импульсами ближнего инфракрасного излучения длительностью от 0,05 до 0,5 с при экспозиции от 0,2 до 1,0 Дж/см<sup>2</sup>. Это приводит к снижению скорости травления диоксида кремния за счет повышения энергии химической связи в его решетке.

Введение дополнительной операции инфракрасного (ИК) облучения формируемой структуры обеспечивает нагрев поверхностной области на глубину, соизмеримую с длиной волны используемого излучения (0,7–2,0 мкм), до температуры 700–1000 °С. Это приводит к релаксации механических напряжений и полиморфным превращениям в структуре поднитридного диоксида кремния с повышением энергии химической связи. Стишовит, образовавшийся под действием высоких сжимающих напряжений в пленке  $\text{SiO}_2$  и обладающий сравнительно невысокой энергией химической связи, превращается в коэсит и другие полиморфные модификации, энергия химической связи и устойчивость к воздействию фторсодержащей плазмы которых заметно выше. Таким образом, скорость травления пленки  $\text{SiO}_2$  снижается, а селективность травления пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  по отношению к  $\text{SiO}_2$  возрастает [3].

Исходный монокристаллический кремний является достаточно прозрачным в ИК-области. Термообработанный кремний содержит большое количество точечных дефектов, являющихся центрами поглощения. Поэтому кремниевые пластины, на которых сформированы топологические элементы с использованием термообработки, практически непрозрачны. Все ИК-излучение при этом поглощается в поверхностной области. При использовании излучения большей длины волны кремниевая подложка соответственно прогревается на большую глубину. В этом случае для достижения сравнимого положительного эффекта требуется пропорциональное увеличение мощности излучателей, что экономически нецелесообразно.

Источники ближнего ИК-излучения широко распространены и используются в технологии микроэлектроники. К ним, в частности, относятся галогенные кварцевые лампы, дающие максимум излучения на длине волны порядка 1,1 мкм. Невысокая глубина поглощающей области приводит к концентрации поглощенной энергии в активной области полупроводниковой структуры, не затрагивая объем кремниевой пластины. Однако в связи с высокой теплопроводностью кремния эта поглощенная энергия довольно быстро распределяется по всему объему, приводя к быстрому охлаждению поверхностного слоя. Поэтому импульс ИК-излучения должен быть достаточно мощным для достижения требуемого эффекта в активной области и достаточно коротким, чтобы предотвратить нагрев всего объема пластины. Только в этом случае достигается эффект релаксации напряжений с соответствующими структурно-фазовыми изменениями и эффект «закалки» генерируемых и высвобождаемых точечных дефектов, стабилизирующих достигнутое состояние.

Нагреву при этом подвергаются пленки нитрида кремния, диоксида кремния и приповерхностная область кремниевой подложки толщиной порядка 1 мкм. После прекращения ИК-импульса поглощенное этой частью структуры тепло в результате теплопроводности распределяется по всему объему подложки. Поскольку толщина подложки (600–800 мкм) неизмеримо больше нагреваемой области, а ее температура равна комнатной, вследствие высокой теплопроводности кремния происходит «закалка» пленок диоксида и нитрида кремния. В течение действия ИК-импульса происходит быстрая релаксация растягивающих напряжений в нитриде кремния за счет генерации и взаимодействия точечных дефектов, которая сопровождается соответствующей релаксацией сжимающих напряжений в его диоксиде. При этом нестабильный стишовит под воздействием высокой температуры в условиях существенного снижения напряжений переходит в более стабильный коэсит и другие полиморфные модификации  $\text{SiO}_2$ , энергия химической связи в которых существенно выше. Охлаждение поверхностного слоя структуры за счет теплопроводности кремния после прекращения ИК импульса способствует фиксации образовавшихся фаз диоксида кремния до непосредственно процесса травления нитрида. Стойкость  $\text{SiO}_2$  к воздействию фторсодержащей плазмы за счет повышения энергии химической связи повышается. Одновременно высвобождение большого количества точечных дефектов в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в результате релаксации растягивающих напряжений способствует повышению скорости его травления [6]. Таким образом, селективность травления нитрида кремния по отношению к его диоксиду существенно возрастает.

Выбор режимов обработки структур определяется наличием и полнотой протекания рассматриваемых полиморфных превращений. Минимальная длительность ИК-импульса определена экспериментально на основании реальных возможностей технологического оборудования по набору экспозиции. При длительности импульса менее 0,05 с для достижения требуемой экспозиции необходимо использовать специализированное оборудование высокой мощности, что экономически не обосновано. А при длительности импульса более 0,5 с вследствие высокой теплопроводности кремния происходит чрезмерный преждевременный разогрев объема полупроводниковой подложки, что не позволяет в должной мере осуществить «закалку» пленок.

При экспозиции менее 0,2 Дж/см<sup>2</sup> поверхностная область обрабатываемой структуры не нагревается до требуемой температуры полиморфных превращений во всем временном интервале заявляемого способа, а при экспозиции более 1,0 Дж/см<sup>2</sup> в заданном временном интервале в структуре вероятно возникновение дефектов, связанных с особенностями релаксации механических напряжений.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Экспериментально установлено, что повышение селективности травления достигается после обработки структур хотя бы одним ИК-импульсом с заявленными характеристиками. При этом использование более 5 импульсов нецелесообразно как в связи с необоснованным увеличением длительности процесса, так и в связи с накоплением подложкой тепла и связанной с этим потерей эффекта «закалки».

Предложенный способ реализовали при изготовлении ИС типа IZ33567В на пластинах 150 КДБ-12 (100) стандартными методами химической обработки, окисления, термообработки, ионного легирования, диффузии, фотолитографии, травления формировали области кармана. Затем на поверхности полученных структур формировали методом термического окисления поднитридный диоксид кремния толщиной 25 нм. Пленку нитрида кремния толщиной 200 нм осаждали из парогазовой фазы при температуре 780 °С за счет реакции моносилана с аммиаком. Импульсную ИК-обработку структур проводили на установке оптического отжига с модернизированным таймером, обеспечивающим получение ИК-импульсов с шагом 0,01 с. Режимы ИК-обработки приведены в таблице. Методами стандартной фотолитографии на поверхности полученных структур формировали маску фоторезиста, после чего структуры подвергали плазмохимическому травлению во фторсодержащей плазме на установке плазмохимического травления GIR 260S компании Alcatel (рисунок 7).



Рисунок 7. – Установка ПХТ GIR 260S компании Alcatel

После удаления фоторезиста проводили контроль полученного фотолитографического рисунка на соответствие требованиям действующей на данное изделие технической документации. Селективность травления определяли на тестовых структурах, изготовленных в одном технологическом цикле с рабочими. По окончании технологического цикла изготовления структур проводили контроль их функционирования. Результаты контроля приведены в таблице.

Как видно из таблицы, предложенный способ позволяет повысить селективность травления нитрида кремния по отношению к диоксиду, предотвратить появление микротрещин, что повышает качество фотолитографического рисунка и увеличивает выход годных кристаллов на операции контроля функционирования ИС.

Таблица. – Влияние режимов ИК-обработки на селективность травления нитрида кремния и выход годных ИС

№ партии	Количество импульсов	Длительность импульса, с	Экспозиция, Дж/см <sup>2</sup>	Селективность травления	Выход годных кристаллов, %	Примечание
1	1	0,2	0,5	3,3	85,3	
2	3	0,2	0,5	3,5	88,8	
3	5	0,2	0,5	3,6	90,1	
4	8	0,2	0,5	2,8	89,1	Необоснованное увеличение продолжительности процесса
5	3	0,03	0,5	2,7	72,6	Неполное полиморфное превращение
6	3	0,05	0,5	3,5	89,0	
7	3	0,50	0,5	3,7	92,6	
8	3	0,80	0,5	2,6	81,8	Перегрев структур, нивелирование «закалки»
9	3	0,2	0,1	2,5	78,2	Неполное полиморфное превращение
10	3	0,2	0,2	3,5	88,1	
11	3	0,2	1,0	3,7	91,0	
12	3	0,2	1,5	2,5	84,3	Перегрев структур, нивелирование «закалки»
13	Существующая технология			2,2	68,7	Отдельные микротренчи

**Заключение.** Поставленная задача повышения селективности травления нитрида кремния решена тем, что в процессе формирования рисунка в пленке нитрида кремния, включающем нанесение на полупроводниковую подложку с топологическими элементами пленок диоксида кремния и нитрида кремния химическим осаждением из парогазовой фазы, фоторезистивной маски методом стандартной фотолитографии, реактивно-ионное травление нитрида кремния во фторсодержащей плазме и удаление фоторезистивной маски, после формирования пленки нитрида кремния химическим осаждением из парогазовой фазы проводят обработку пленки 1–5 импульсами ближнего инфракрасного излучения длительностью от 0,05 до 0,5 с при экспозиции от 0,2 до 1,0 Дж/см<sup>2</sup>

Это приводит к снижению скорости травления диоксида кремния за счет его полиморфного превращения в модификацию с большей энергией химической связи, а именно из стишовита в коэсит, повышает селективность травления нитрида кремния по отношению к диоксиду, предотвращает появление микротренчей и в конечном итоге повышает качество фотолитографического рисунка.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Берлин, Е.В. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии / Е.В. Берлин., Л.А. Сейдман. – М. : Техносфера, 2010. – 528 с.
2. Обижаев, Д.Ю. Структура и свойства функциональных слоев нитрида кремния на различных стадиях их формирования в технологии устройств нано- и микросистемной техники / Д.Ю. Обижаев. – М. : МАТИ, 2008. – 151 с.
3. Турцевич, А.С. Формирование из газовой фазы функциональных слоев интегральных микросхем / А.С. Турцевич, В.А. Емельянов. – Минск : Интегралполиграф, 2007. – 224 с.
4. Абдуллаев, Д.А., Селективное плазмохимическое травление нитрида кремния относительно оксида кремния / Д.А. Абдуллаев, А.А. Зайцев, Е.А. Кельм // Нано- и микросистемная техника. – 2014. – № 2. – С. 17–19.
5. Формирование стабильной дефектной структуры в кремниевых диодах генератора шума/ В.В. Емельянов [и др.] // Изв. НАНБ. Сер. физ.-техн. наук. – 2021. – № 2. – С. 145–153.
6. Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники / А.П. Достанко [и др.] ; под ред. акад. А.П. Достанко. – Минск : Беларус. навука, 2020. – 260 с.

## REFERENCES

1. Berlin, Ye.V. & Seydman, L.A. (2010). *Ionno-plazmennyye protsessy v tonkoplechnoy tekhnologii* [Ion-plasma processes in thin-film technology]. Moscow: Tekhnosfera. (In Russ.).
2. Obizhayev, D.YU. (2008). *Struktura i svoystva funktsional'nykh sloyev nitrida kremniya na razlichnykh stadiyakh ikh formirovaniya v tekhnologii ustroystv nano- i mikrosistemnoy tekhniki* [Structure and properties of silicon nitride functional layers at various stages of their formation in the technology of nano- and microsystem technology devices]. Moscow: MATI. (In Russ.).
3. Turtsevich, A.S. & Yemel'yanov, A.S. (2007). *Formirovaniye iz gazovoy fazy funktsional'nykh sloyev integral'nykh mikroskhem* [Formation of functional layers of integrated circuits from the gas phase]. Minsk: Integralpoligraf. (In Russ.).
4. Abdulayev, D.A., Zaytsev, A.A. & Kel'm, Ye.A. (2014). *Selektivnoye plazmokhimicheskoye travleniye nitrida kremniya otноситel'no oksida kremniya* [Selective plasma-chemical etching of silicon nitride relative to silicon oxide]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and microsystem technology], (2), 17–19. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Yemel'yanov, V.V., Yemel'yanov, V.A., Baranov, V.V. & Buslyuk, V.V. (2021). *Formirovaniye stabil'noy defektnoy struktury*



- v kremniyevykh diodakh generatora shuma [Formation of a stable defect structure in silicon diodes of a noise generator]. *Izvestiya NANB. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk [Izvestiya NASB. Series of physical and technical sciences]*, (2), 145–153. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Dostanko, A.P., Avakov, S.M., Golosov, D.A., Yemel'yanov, V.V., Zavadskiy, S.M., Kolos, V.V. ... Shershnev, Ye.B. (2020). In A.P. Dostanko (Eds.) *Innovatsionnyye tekhnologii i oborudovaniye submikronnoy elektroniki [Innovative technologies and equipment for submicron electronics]*. Minsk: Belaruskaya navuka. (In Russ.).

Поступила 23.03.2022

## PATTERN FORMATION IN SILICON NITRIDE FILM

V. EMELYANOV, S. BORDUSOV

*The formation of a pattern in a silicon nitride film includes the application of a silicon dioxide film, a silicon nitride film by chemical vapor deposition from a vapor phase, a photoresistive mask by the method of standard photolithography, reactive-ion etching of silicon nitride in a fluorine-containing plasma, and the removal of a photoresistive mask on a semiconductor substrate with topological elements. To increase the selectivity of silicon nitride etching with respect to dioxide, prevent microtrenching and improve the quality of the photolithographic pattern after the formation of a silicon nitride film, the film is treated with 1–5 pulses of near infrared radiation with a duration of 0,05 to 0,5 s at an intensity of 0,2 to 1,0 J/cm<sup>2</sup>.*

**Keywords:** *plasma chemical etching, silicon dioxide, silicon nitride, infrared radiation.*

УДК 621.98.044.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОРРОЗИОННО-СТОЙКОЙ СТАЛИ

А.Н. МАТЯС

(Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск)

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2098-8434>

Представлены результаты исследований влияния магнитно-импульсной упрочняющей обработки на изменения шероховатости поверхности параметра  $R_a$  образцов ножей из коррозионно-стойкой стали 40X13, 65X13, 12X17. Установлено, что магнитно-импульсная обработка при определенных режимах позволяет добиться снижения значения параметра  $R_a$  до 46% по сравнению с исходными образцами. Исследованы напряжения в скин-слое образцов из коррозионно-стойкой стали при прохождении через них синусоидального тока высокой частоты в зависимости от энергии воздействия и количества импульсов. Исследования позволили определить технологические режимы, способствующие улучшению физических и механических свойств образцов. Доказана эффективность использования МИО для повышения периода стойкости режущего инструмента из коррозионно-стойкой стали, применяемого в пищевой промышленности.

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная обработка, упрочнение, стойкость, шероховатость, поверхность, скин-эффект, электрофизические свойства.

**Введение.** Микрогеометрический параметр поверхности является существенным техническим требованием, а также одним из самых значимых показателей качества поверхностного слоя изделия. Учитывая, что требования к качеству выпускаемой продукции постоянно повышаются, перед производителями все чаще ставится задача по улучшению точности и физико-механических характеристик обрабатываемых поверхностей.

Качество поверхности существенно влияет на эксплуатационные свойства изделия. Известно, что сглаженный микрорельеф поверхностей указывает на то, что деталь или изделие в меньшей степени подвергается истиранию и коррозии, соответственно выше становится точность установки изделия при сборке. Усталостная прочность изделий, плотность и герметичность сопряжений, точность измерений, качество электрических и тепловых контактов также во многом зависят от величины поверхностных неровностей. Исходя из этого, перед машиностроительным производством ставится ответственная задача – технологическое обеспечение заданной микрогеометрии поверхности изделий.

Шероховатость поверхности, несмотря на микроскопические размеры неровностей, значительно сказывается на износе деталей и изделий в период приработки. За этот период времени трущиеся поверхности приослабливаются друг к другу. В частности, трущиеся поверхности приобретают так называемую равновесный микрорельеф поверхности, а трение и износ изменяются таким образом, чтобы система переходила в стационарное состояние.

В этот период (участок I, рисунок 1) интенсивность изнашивания наибольшая. Намного меньше и почти постоянна на участке II нормального или установившегося износа, обладающая наибольшей продолжительностью. Она характеризуется стабильными условиями трения и практически постоянной и относительно низкой интенсивностью изнашивания. Эта стадия относится к нормальной работе узла трения после завершения приработки. В ходе ее развития износ постепенно (почти линейно) увеличивается, что сопровождается повреждением поверхности. В конечном итоге происходит значительное изменение условий трения, интенсивность изнашивания резко возрастает и наступает катастрофический износ (стадия III) [1].

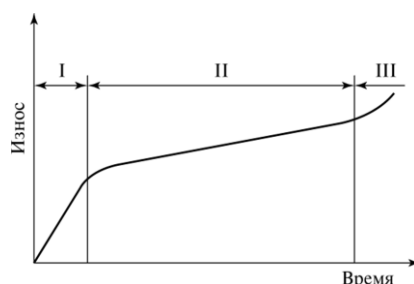


Рисунок 1. – График износа изделий в период приработки

Шероховатость поверхности также серьезно влияет на коррозионную стойкость изделий. Увеличение высотных параметров шероховатости приводит к увеличению фактической площади поверхности изделия

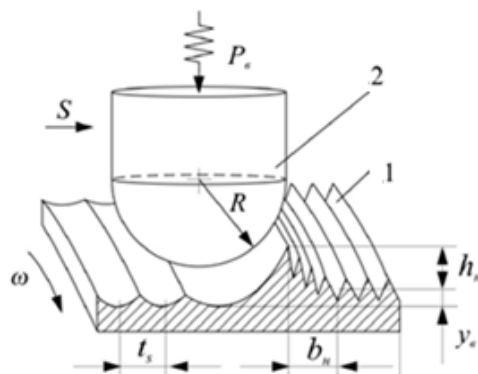
и усиливает коррозию. Поэтому, для того чтобы обеспечить высокий показатель коррозионной стойкости изделий, шероховатость их поверхностей должна быть минимальной или хотя бы близкой к ней.

Достаточно большое влияние шероховатость поверхности изделий оказывает на их усталостную прочность. Впадины профиля шероховатости являются концентраторами напряжений. Именно у впадин происходит образование усталостных трещин, приводящих к разрушению изделия. По мере снижения высотных параметров шероховатости концентрация напряжений уменьшается, а усталостная прочность изделий возрастает. Так, уменьшение шероховатости поверхности образцов из стали 30ХГСА ( $HRC\ 35-37$ ) с  $R_a = 0,74$  мкм до  $R_a = 0,22$  мкм приводит, по данным проф. А.Г. Суслова, к увеличению предела выносливости примерно на 14%, а срока службы более чем в 3 раза [2].

Чтобы получить поверхность с меньшей шероховатостью или с более сглаженным рельефом, используется достаточно большое количество методов и технологий, таких как шлифование, различные виды полирования (химически активированное механохимическое, ионно-лучевое и др.).

Методы поверхностного пластического деформирования (ППД) – одни из наиболее эффективных и перспективных процессов обработки. Кроме того, известно, что одним из наиболее экологически чистых методов обработки ППД поверхностей изделий является процесс выглаживания с жестко закрепленными инструментами.

При этом методе пластическое течение металла приводит к сглаживанию неровностей поверхности с заполнением впадин микропрофиля материалом гребешков. При этом линейный размер изделия в направлении воздействия уменьшается до 15 мкм (рисунок 2), что необходимо учитывать на предшествующем переходе, обеспечивая точность размеров примерно на 25% выше заданной для окончательно обработанного изделия [3; 4].



1 – обрабатываемая поверхность; 2 – выглаживатель;  
 $t_s$  – шаг подачи;  $R$  – радиус выглаживателя;  $\omega$  – угловая скорость детали

Рисунок 2. – Схема выглаживания поверхности детали [4]

**Основная часть.** В различных отраслях промышленности применяется все больше изделий с уникальными требованиями к качеству обработанных поверхностей, выполнение которых является определяющим для эксплуатационных свойств всего изделия. Например, шероховатость поверхностей ножей, используемых в пищевой промышленности, колеблется в пределах  $R_a\ 0,3-0,05$  мкм. Кроме того, к такому инструменту предъявляются высокие требования по гигиенической безопасности и применение существующих технологий не всегда может быть использовано для готового изделия и инструмента в пищевой промышленности.

В связи с этим в конкуренты процессу выглаживания на арену выходят методы обработки, которые включают в себя комплексное воздействие на изделие с меньшими затратами и с большей эффективностью и производительностью, позволяющие обрабатывать изделия различной формы и геометрических размеров.

Практическое использование энергии импульсных электромагнитных полей открывает необыкновенные перспективы для создания так называемых передовых технологий по обработке материалов любой физической природы. Их основные и очевидные преимущества устанавливаются совокупным сочетанием определяющих атрибутов, среди которых наиболее значимыми являются экологическая чистота, экономный расход сырьевых материальных ресурсов, низкое энергопотребление и, наконец, высокая производительность.

Магнитно-импульсная обработка (МИО) металлов характеризуется тем, что давление на деформируемую металлическую заготовку создается непосредственно воздействием импульсного магнитного поля без участия промежуточных твердых, жидких или газообразных сред [5; 6].

По сравнению с известными методами упрочнения геометрические параметры упрочненных изделий не изменяются. Метод позволяет повысить качество поверхности, что очень важно для режущего инструмента. Также не требуется проводить дополнительную механическую или термическую обработку, финишные операции. Данный процесс отличается высокой производительностью, низким энергопотреблением, экологической безопасностью.

Особенно высока эффективность использования метода МИО для готовых изделий, например, закаленных заточенных ножей для пищевой промышленности, к которым трудно или невозможно применить другие известные методы упрочнения [6–9].

Магнитно-импульсная обработка – метод обработки металлов, который обеспечивает комплексное воздействие на ферромагнитный материал электромагнитных и тепловых вихревых потоков, механических деформаций, магнитоstrictionных процессов. Под воздействием сильного импульсного электромагнитного поля происходят структурно-фазовые превращения в металле, в результате которых изменяются физико-механические свойства материала, снижаются дефекты в кристаллической решетке и внутренние напряжения изделия. Использование метода МИО не предусматривает каких-либо покрытий или внешних включений, чем обеспечивает соответствие необходимым гигиеническим нормам и безопасную работу режущего инструмента.

Суть этого метода заключается в том, что обработка готовых стальных изделий проводится воздействием импульсами электромагнитного поля определенной напряженности в специальных магнитно-импульсных установках (МИУ) с использованием специальной оснастки и возможностью управления технологическими режимами импульсной обработки.

Изменение поверхностного слоя изделий, подвергшихся ударной нагрузке при МИО, в большой степени определяет их контактную жесткость, износостойкость, усталостную прочность и коррозионную стойкость. Увеличение степени ударного воздействия (наклепа) и глубины слоя способствуют повышению контактной жесткости и износостойкости изделий, а также усталостной прочности изделий, работающих при нормальной температуре.

Исходя из функционального назначения поверхности, конструктивных особенностей изделия, устанавливаются требования к шероховатости поверхности. При выборе нормируемых параметров шероховатости необходимо в первую очередь учитывать их влияние на эксплуатационные свойства поверхности. Главным в большинстве случаев является нормирование высотных параметров. Предпочтительным и чаще используемым параметром  $R_a$ , который достаточно информативен и обеспечен надежными средствами измерений [2].

Обработка плоских образцов коррозионно-стойкой стали, вырезанных из различных ножей, проводилась на установке собственной разработки ФТИ НАН Беларуси МИП-18 на плоском индукторе диаметром 150 мм с энергией воздействия 6–10 кДж.

Результаты влияния МИО на шероховатость поверхности образцов стали представлены в таблице.

Проанализировав полученные результаты измерения шероховатости поверхности образцов из коррозионно-стойкой стали, установили, что при МИО на различных режимах наблюдается изменение микрорельефа поверхности как в сторону улучшения (уменьшение значения), так и в сторону ухудшения (увеличение значения).

В таблице показаны расчеты изменения среднего значения параметра  $R_a$ . Уменьшение шероховатости на 25,5% наблюдается при МИО образцов из стали 40X13 с энергией воздействия 8 кДж. С увеличением в составе стали 40X13 легирующего элемента, такого как ниобий, при обработке на тех же 8 кДж уменьшение значения шероховатости  $R_a$  составило 18,8%, а при энергии воздействия в 10 кДж параметр шероховатости  $R_a$  снизился и составил 37,9% по сравнению с необработанным образцом. Обработка стали 65X13 с энергией воздействия в 10 кДж уменьшили значение параметра шероховатости  $R_a$  на 4,8%, а образцы из стали 12X17 при энергии воздействия 10 кДж, 3 импульса на 2,9%.

Таблица. – Результаты измерения шероховатости поверхности  $R_a$  образцов ножей из коррозионно-стойкой стали до и после МИО

Образцы из ножа куттерного «Ласка» из стали 65X13					
Параметр шероховатость $R_a$ , мкм, до МИО		Параметр шероховатость $R_a$ , мкм, после МИО			
Номер образца	Среднее значение	Режим МИО	Среднее значение	% Изменения	Примечание
1.1	0,140	10 кДж, 7 имп.	0,140	0	
1.2	0,126	10 кДж, 5 имп.	0,120	4,8	
1.3	0,136	8 кДж, 7 имп.	0,151	-11,0	
Образцы из ножа куттерного «Зейдельман» из стали 40X13 с добавлением в состав стали ниобия					
Параметр шероховатость $R_a$ , мкм, до МИО		Параметр шероховатость $R_a$ , мкм, после МИО			
Номер образца	Среднее значение	Режим МИО	Среднее значение	% изменения	Знак (-) – ухудшение шероховатости. Знак (+) – улучшение шероховатости
2.1	0,235	10 кДж, 3 имп.	0,146	37,9	
2.2	0,071	10 кДж, 5 имп.	0,071	0,94	
2.3	0,112	8 кДж, 3 имп.	0,112	0,29	
2.4	0,133	8 кДж, 5 имп.	0,108	18,8	
2.5	0,080	6 кДж, 5 имп.	0,106	-32,5	

Окончание таблицы

Образцы из ножа куттерного «БОСК ПЛЮС» из стали 40X13						
Параметр шероховатость $R_a$ , мкм, до МИО		Параметр шероховатость $R_a$ , мкм, после МИО				
Номер образца	Среднее значение	Режим МИО	Среднее значение	% изменения	Примечание  Знак (-) – ухудшение шероховатости. Знак (+) – улучшение шероховатости	
3.1	0,136	10 кДж, 7 имп.	0,133	2,2		
3.2	0,118	10 кДж, 5 имп.	0,116	2,3		
3.4	0,047	8 кДж, 5 имп.	0,035	25,5		
Образцы ножа серповидного из стали 12X17						
Параметр шероховатость $R_a$ , мкм, до МИО		Параметр шероховатость $R_a$ , мкм, после МИО				
Номер образца	Среднее значение	Режим МИО	Среднее значение	% изменения		
4.1	0,445	6 кДж, 5 имп.	0,444	0,2		
4.2	0,422	10 кДж, 3 имп.	0,410	2,9		
4.3	0,112	8 кДж, 7 имп.	0,198	-76,8		
4.5	0,147	6 кДж, 3 имп.	0,149	0,5		

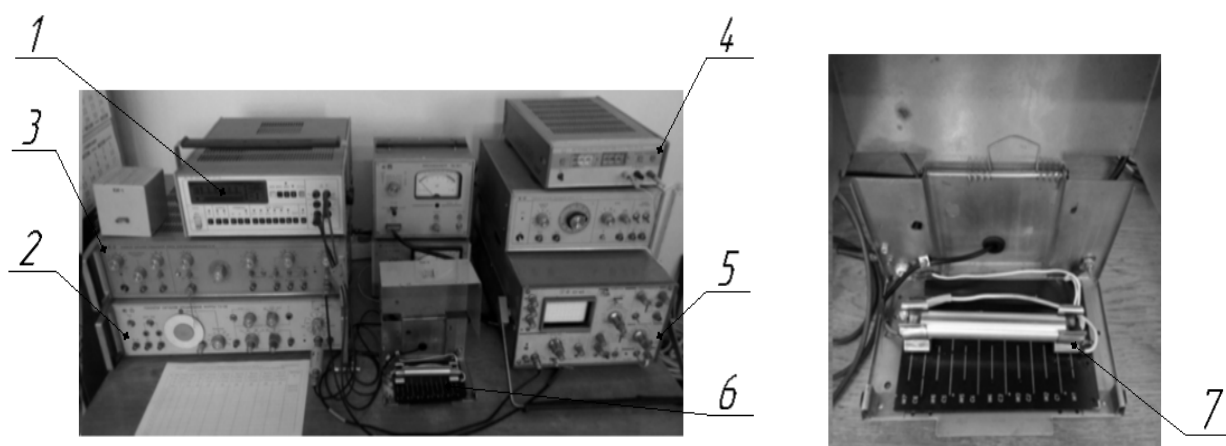
Снижение эффективности МИО на разных марках стали можно объяснить влиянием количества легирующих элементов (хром, ниобий), которые снижают восприимчивость стали к МИО: в стали 12X17 его количество больше, чем в стали 40X13.

Наилучший результат достигнут при использовании режима: энергия 10 кДж, 3 импульса и 8 кДж, 5 импульсов, которые в случае образцов стали 40X13 с ниобием позволяют уменьшить значение параметра шероховатости  $R_a$  до 37,9%.

*Исследование электрофизических свойств образцов из коррозионно-стойкой стали.* С целью определения лучшего режима МИО проведены исследования влияния параметров МИО на упрочняющий эффект обработки. Для этого использовался экспресс-метод исследования свойств упрочненного слоя, который основан на проявлении скин-эффекта при прохождении через металлический образец синусоидального тока высокой частоты.

На рисунке 3 представлен комплекс для определения напряжения в скин-слое [8].

Для генерирования токов высокой частоты служит многофункциональный генератор сигналов специальной формы Г6-28. В отдельных случаях вместо него для измерения удельного электрического сопротивления материала используется источник питания постоянного тока Б5-43. Непосредственно для проведения измерений используется вольтметр В7-46 и осциллограф С1-65 – для контроля формы сигнала. Измерительная ячейка б служит для определения электрических параметров образца, который устанавливается в специальные зажимы 7.



1 – вольтметр В7-46; 2 – многофункциональный генератор сигналов специальной формы Г6-28; 3 – генератор сигналов специальной формы Г6-34; 4 – источник питания постоянного тока Б5-43; 5 – осциллограф С1-65; 6 – измерительная ячейка; 7 – зажимы

Рисунок 3. – Комплекс для измерения величины напряжения в скин-слое

В результате этого эффекта переменный ток высокой частоты при протекании по проводнику распределяется по сечению не равномерно, а преимущественно в поверхностном слое. Поскольку при магнитно-импульсной обработке происходит воздействие непосредственно на поверхность изделия, то анализ результатов скин-эффекта позволит говорить о происходящих изменениях в структуре поверхностного слоя (однородность, балл зерна и др.) и, соответственно, качестве упрочнения.

Результаты исследований влияния частоты переменного тока, глубины скин-слоя, энергии воздействия в 10 кДж с разным количеством импульсов на величину напряжения в скин-слое представлены в виде графика на рисунке 4.

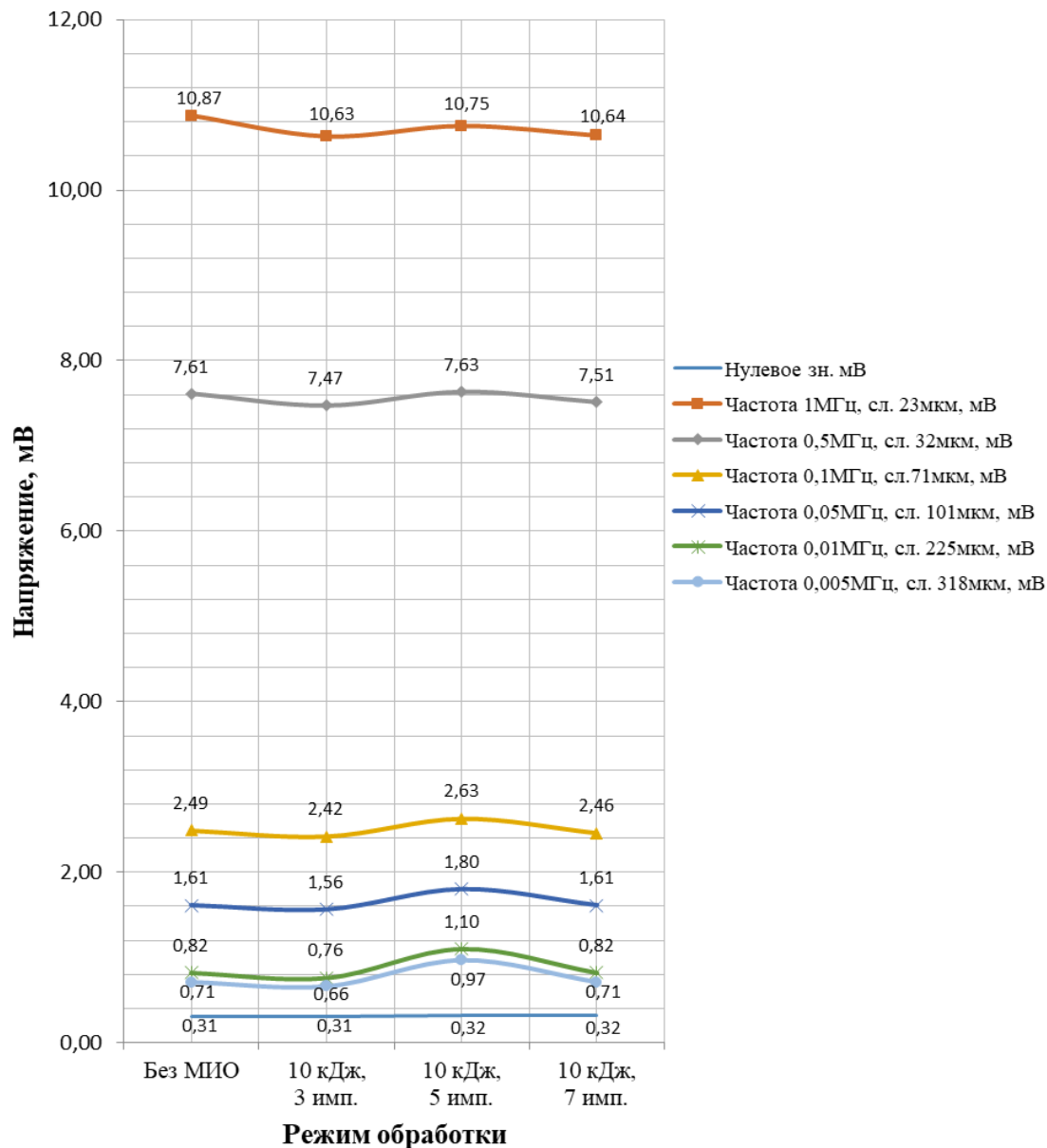
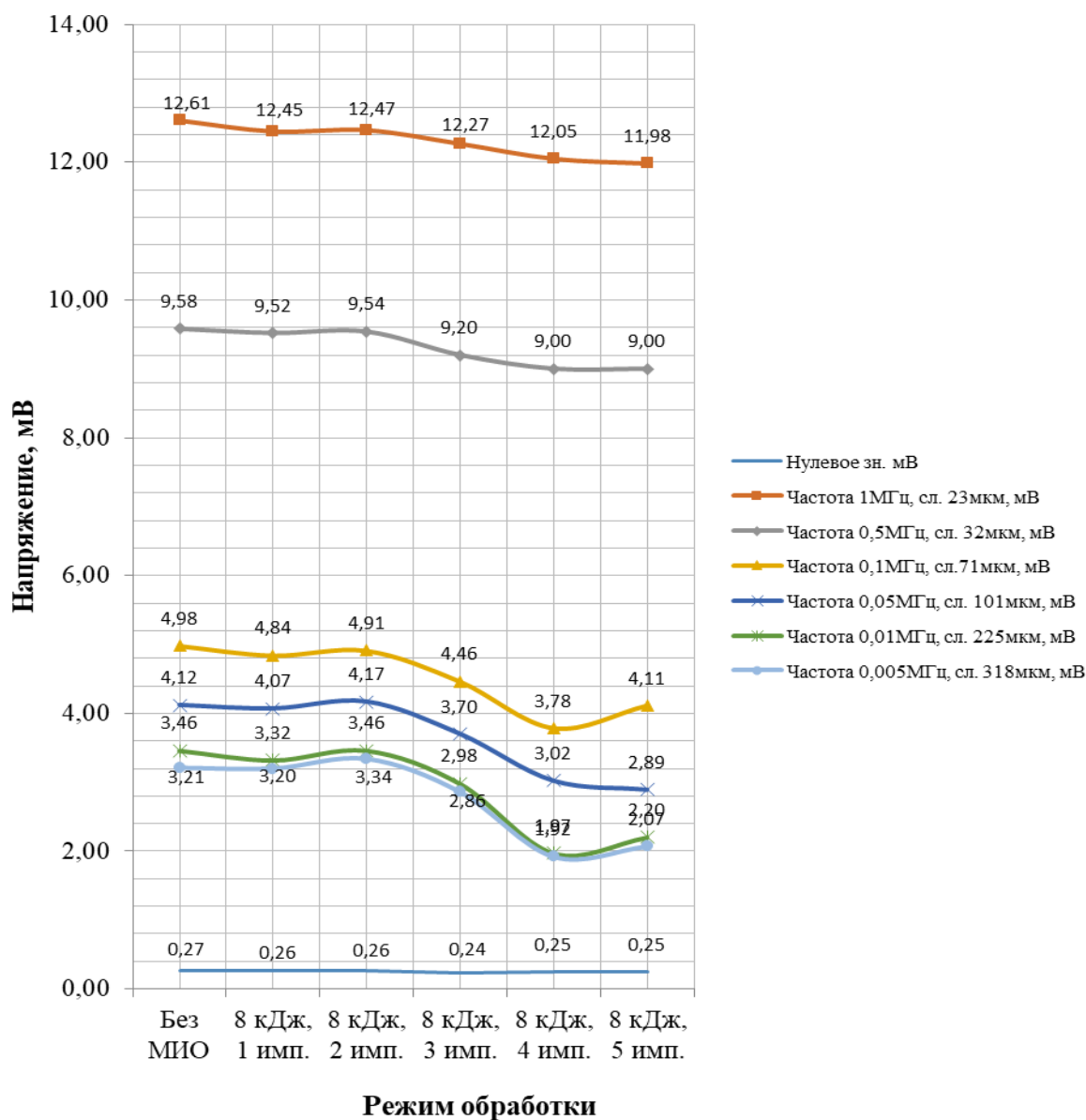


Рисунок 4. – Результаты исследований напряжения в скин-слое образца из коррозионно-стойкой стали при прохождении синусоидального тока в зависимости от энергии воздействия и количества импульсов на МИП-18

При проведении исследований изменяли частоту переменного тока в пределах от 1 МГц до 0,05 МГц, соответственно толщину скин-слоя, а также энергию и количество импульсов (длительность воздействия) и определяли их влияние на величину напряжения в скин-слое.

Установлено, что при трех импульсах с энергией воздействия 10 кДж напряжение тока сначала уменьшается, а затем постепенно возрастает. Это объясняется тем, что при повышении температуры в образцах до определенных величин улучшается структура металла. Превышение определенной температуры приводит к обратному эффекту – увеличению зернистости и неоднородности структуры и, соответственно, повышению напряжения тока и электросопротивления скин-слоя.

Результаты исследований влияния частоты переменного тока, глубины скин-слоя, энергии воздействия в 8 кДж с разным количеством импульсов на величину напряжения в скин-слое представлены в виде графика на рисунке 5.



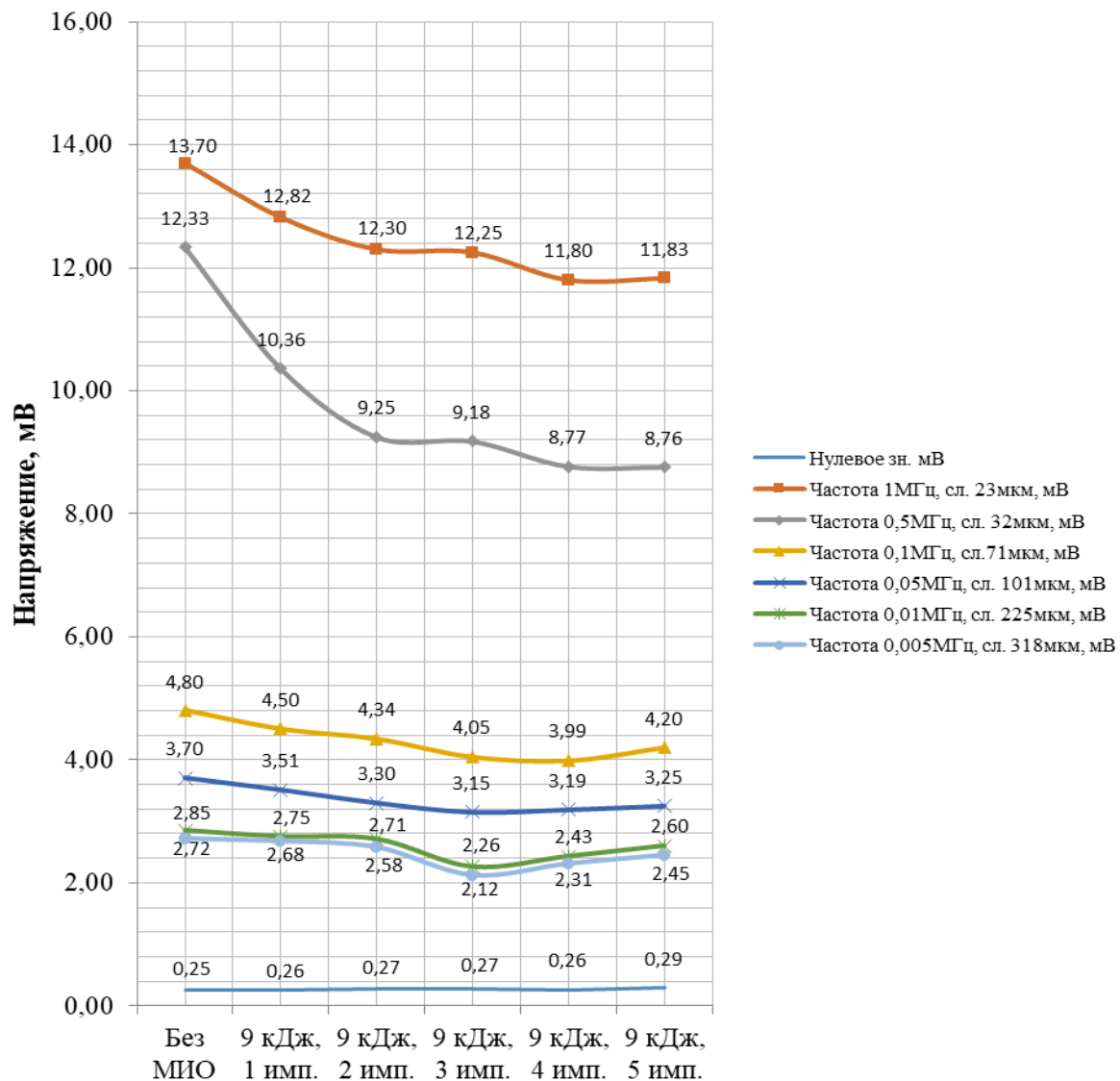
**Рисунок 5. – Результаты исследований напряжения в скин-слое образца из коррозионно-стойкой стали при прохождении синусоидального тока в зависимости от энергии воздействия и количества импульсов на МИП-18**

Согласно полученным результатам, после третьего импульса происходит снижение напряжения тока, затем, после пятого, – напряжение тока постепенно возрастает, что способствует повышению электросопротивления скин-слоя. Анализ данных по измерению параметра шероховатости  $R_a$  и напряжения тока при обработке образцов с энергией воздействия 8 кДж показал прямую зависимость этих параметров.

Шероховатость обработанных образцов уменьшилась при режиме обработки 8 кДж, 5 импульсов. С помощью описанного выше метода скорректированы режимы обработки сталей (40X13, 64X13, 12X17) на 8 кДж, 4 импульса, что уменьшит время обработки и энергозатраты.

Результаты исследований влияния частоты переменного тока, глубины скин-слоя, энергии воздействия в 9 кДж с разным количеством импульсов на величину напряжения в скин-слое представлены на графике на рисунке 6.

Результаты показывают, что после второго импульса происходит снижение напряжения тока, что способствует понижению электросопротивления скин-слоя, а значит, уменьшению неоднородности структуры и улучшению качества поверхности.



### Режим обработки

Рисунок 6. – Результаты исследований напряжения в скин-слое образца из коррозионно-стойкой стали при прохождении синусоидального тока в зависимости от энергии воздействия и количества импульсов на МИП-18

**Заключение.** Результаты исследования влияния МИО на микрорельеф поверхности образцов, изготовленных из коррозионно-стойких сталей, позволили установить, что наиболее оптимальными и результативными является обработка с энергией воздействия 10 кДж (3–5 импульсов) и 8 кДж (5 импульсов), позволяющая добиться снижения значения шероховатости до 37,9%.

Для углубленного изучения влияния параметров МИО на упрочняющий эффект и определения режима обработки применен метод исследования свойств упрочненного слоя, основанный на проявлении скин-эффекта при прохождении через металлический образец тока высокой частоты. Это позволило определить три наиболее эффективных комплекса технологических режимов МИО для коррозионно-стойких сталей. Обработка с энергией воздействия 10 кДж, 3 импульса, 8 кДж, 4 импульса и 9 кДж, 3 импульса по всем параметрам способствуют улучшению физических и механических свойств.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – Н. Новгород : ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2006. – 296 с.
2. Шероховатость поверхности : метод. указания к лаборатор. работе № 5 по курсу «Взаимозаменяемость и технические измерения» / А.И. Аристов [и др.]. – М. : МАДИ, 2015. – 32 с.
3. Финишная обработка термоупрочненной высокохромистой стали однопроходным алмазным выглаживанием на токарно-фрезерном центре инструментом с узлом динамической стабилизации / В.П. Кузнецов [и др.] // Вестн. науч.-техн. развития. – 2011. – № 5. – С. 20–36.



4. Суслов, А.Г. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / А.Г. Суслов, Р.В. Гуров, Е.С. Тишевских // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 9. – С. 20–21.
5. Драгобецкий, В.В. Новые и высокоэффективные технологии в машиностроении / В.В. Драгобецкий, А.Д. Коноваленко, В.Г. Загорянский. – Харьков : Точка, 2012. – 238 с.
6. Малыгин, Б.В. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин / Б.В. Малыгин. – М. : Машиностроение, 1989. – 112 с.
7. Алифанов, А.В. Технология изготовления и упрочнения высоконагруженных деталей машиностроения / А.В. Алифанов, А.М. Милюкова, В.А. Томило. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 321 с.
8. Алифанов, А.В. Исследование влияния магнитно-импульсной обработки поверхностного слоя стальных образцов на их физико-механические свойства / А.В. Алифанов, И.А. Богданович, В.В. Малеронюк // Вестн. БарГУ. Сер. Техн. науки. – 2017. – Вып. 5. – С. 18–24.
9. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлорежущих сверл из быстрорежущей стали / А.М. Милюкова [и др.] // Вестн. БарГУ. Сер. Техн. науки. – 2018. – Вып. 6. – С. 50–56.

## REFERENCES

1. Kragelsky, I.V. (2006). *Trenie i iznos [Friction and wear]*. Nizhny Novgorod: FGOU VPO VGAVT. (In Russ.).
2. Aristov, A.I., Malysheva, Ye.B., Seliverstova, O.V., Sergeev, I.D., Fatyukhin, D.S., Sheina, A.Ye. & Yandulova, O.V. (2015). *Sherokhovatost poverkhnosti: metodicheskie ukazaniya k laboratornoi rabote № 5 po kursu «Vzaimozamenyaemost i tekhnicheskije izmereniya» [Surface roughness: methodological guidelines to the laboratory work No.5 of the course «Interchangeability and technical measurements»]*. Moscow: MADI. (In Russ.).
3. Kuznetsov, V.P., Makarov, A.V., Savray, R.A., Pozdeyeva, N.A., Malygina, I.YU. & Kiryakov, A.Ye. (2011). *Finishnaya obrabotka termouprochnennoi vysokokhromistoi stali odnoprokhodnym almaznym vyglazhivaniem na tokarno-frezernom tsentre instrumentom s zlom dinamicheskoi stabili-zatsii [Finishing treatment of heat-treated high-chromium steel by a single-pass diamond smoothing on a turn-milling center by the tool with dynamic stabilization unit]*. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya [Bulletin of Scientific and Technical Development]*, (5), 20–36. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Suslov, A.G., Gurov, R.V. & Tishevskikh, E.S. (2008). *Otdelochno-uprochnyayushchaya obrabotka poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem [Finishing and hardening treatment by surface plastic straining]*. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya [Hardening technologies and coatings]*, (9), 20–21. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Dragobetsky, V.V., Konvalenko, A.D. & Zagoryansky, V.G. (2012). *Novye i vysokoeffektivnyye tekhnologii v mashinostroenii [New and highly-effective technologies in mechanical engineering]*. Kharkov: Tochka. (In Russ.).
6. Malygin, B.V. (1989). *Magnitnoe uprochnenie instrumenta i detalei mashin [Magnetic hardening of the tool and machine parts]*. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.).
7. Alifanov, A.V., Milyukova, A.M. & Tomilo, V.A. (2014). *Tekhnologiya izgotovleniya i uprochneniya vysokonagruzhennykh detalei mashinostroyeniya [Technology of manufacturing and hardening of high-load parts in mechanical engineering]*. Minsk: Belaruskaya navuka. (In Russ.).
8. Alifanov, A.V., Bogdanovich I.A. & Maleronok, V.V. (2017). *Issledovanie vliyaniya magnitno-impul'snoi obrabotki poverkhnostnogo sloya stal'nykh obrastsov na ikh fiziko-mekhanicheskie svoystva [Study of the magnetic-pulse treatment effect of the surface layer of steel samples on their physical and mechanical properties]*. *Vestnik BarGU. Seriya Tekhnicheskije nauki [Bulletin of BarSU. Series Engineering Sciences]*, (5), 18–24. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Milyukova, A.M., Gorchanin, A.I., Matyas, A.N. & Maleronok, V.V. (2018). *Magnitno-impul'snaya uprochnyayushchaya obrabotka metallorazhushchikh sverl iz bystro-rezhushchei stali [Magnetic-pulse hardening treatment of metal-cutting drills from high-speed steel]*. *Vestnik BarGU. Seriya Tekhnicheskije nauki [Bulletin of BarSU. Series Engineering Sciences]*, (6), 50–56. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 12.01.2022

**RESEARCH OF THE DEPENDENCE OF MAGNETIC-PULSE TREATMENT MODES EFFECT  
ON SURFACE CHARACTERISTICS AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES  
OF CORROSION-RESISTANT STEELS**

A. MATSIAS

*The article presents the research results of the magnetic-pulse hardening treatment effect on changes in surface roughness of Ra parameter of knife samples from corrosion-resistant steel 40X13, 65X13, 12X17. It is determined that the magnetic-pulse treatment at some modes enables to achieve a decrease of Ra parameter value down to 46% in comparison with original samples. The stresses in the skin layer of samples from corrosion-resistant steel are studied when a sinusoidal high-frequency current passes through them depending on the effect and number of pulse energy. The researches enable to determine the technological modes that improve physical and mechanical properties of samples. The efficiency of the magnetic-pulse treatment for increasing the cutting tool life from corrosion-resistant steel applied in the food industry is proven.*

**Keywords:** magnetic pulse treatment, hardening, resistance, roughness, surface, skin effect, electrophysical properties.

УДК 677.017:621.3

## АНАЛИЗ ЭКРАНИРУЮЩИХ И АНТИСТАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРИКОТАЖНЫХ ПОЛОТЕН СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

канд. тех. наук, доц. П.А. КОСТИН

(Витебский государственный технологический университет),

канд. тех. наук, доц. Е.Г. ЗАМОСТОЦКИЙ

(Международный университет «МИТСО», Витебск),

канд. тех. наук, доц. И.М. РАССОХИНА

(Витебский государственный технологический университет)

Дан анализ экранирующих и антистатических свойств трикотажных полотен с комбинированной электропроводящей пряжей. Приведены исследования электропроводящей пряжи на физико-механические и электрофизические свойства, описан состав и выбор типа переплетения трикотажных полотен и приведены результаты экспериментального исследования зависимости плотности ячеей трикотажных полотен на антистатические и экранирующие свойства трикотажных полотен.

**Ключевые слова:** трикотажные полотна, антистатический эффект, экранирование, СВЧ-волны, комбинированная электропроводящая пряжа.

**Введение.** С появлением электрических и электронных устройств во всем мире защита от электромагнитных волн, излучаемых приборами, – одна из главных, которую необходимо решить. Среди различных предлагаемых решений текстильные изделия и основанные на тканях композиционные материалы получили наиболее широкое распространение из-за универсальности этих текстильных материалов [1]. Основным источником электромагнитного излучения – электрические сигналы, испускаемые различными приборами. Источниками электромагнитного излучения являются: компоненты катушек индуктивности, цифровые устройства и высоковольтные провода, несущие большой переменный ток в энергетических частотах, которые способны к испусканию СВЧ-волн. Для решения проблемы защиты от электромагнитных волн необходимо экранировать (отражать) эти виды излучений [2].

**Основная часть.** Цель данной работы – определение наилучших показателей трикотажных полотен из комбинированной электропроводящей пряжи для достижения требуемого антистатического эффекта (не более  $10^3$  Ом м).

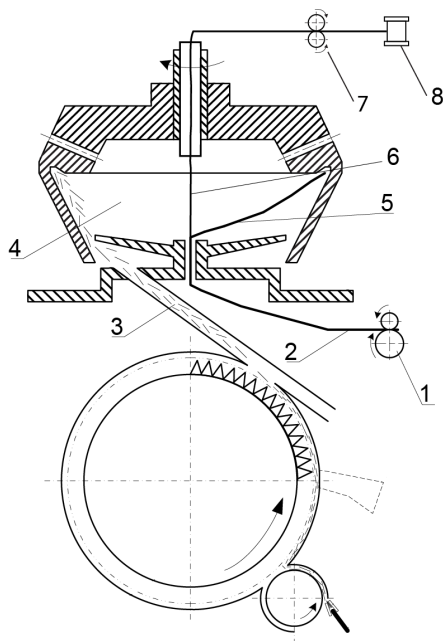


Рисунок 1. – Технологическая схема модернизированной прядильной машины ПМ-120МС

В качестве исходного сырья используется медная микропроволока диаметром 0,05 мм (линейная плотность 18 текс), хлопковые и полиэфирные волокна. Сущность предложенного способа формирования комбинированной электропроводящей пряжи состоит в том, что в рабочую зону прядильной камеры 4 вместе с дискретным потоком волокон 3 с двухфланцевой катушки 8 при помощи дополнительно установленного узла питания (питающие валики) 7 подается с постоянной скоростью медная микропроволока 6, которая обкручивает формируемую в камере пряжу 5. Полученная комбинированная электропроводящая пряжа 2 выводится из камеры и наматывается на бобину 1 (см. рисунок 1) [3].

Данный способ получения комбинированной электропроводящей пряжи позволяет за счет вывода металлической микропроволоки на поверхность пряжи повысить ее электрофизические свойства [3].

Сырьевой состав полученной комбинированной электропроводящей пряжи представлен в таблице 1.

Таблица 1. – Процентное содержание компонентов комбинированной электропроводящей пряжи

Компонент	Комбинированная электропроводящая пряжа T = 55 текс	
	Текс	%
Медная микропроволока	18	32,7
Полиэфирные волокна	–	35,3
Хлопковое волокно	–	32

В условиях испытательного центра УО «ВГТУ» в соответствии с ГОСТ 19806 проведены испытания по определению электрического сопротивления комбинированной электропроводящей пряжи.

Физико-механические и электрофизические свойства полученной комбинированной электропроводящей пряжи представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Физико-механические свойства комбинированной электропроводящей пряжи

Компонент	Комбинированная электропроводящая пряжа T = 55 текс
Абсолютная разрывная нагрузка $R_n$ , сН	400
Коэффициент вариации по разрывной нагрузке $CVR_n$ , %	7,5
Разрывное удлинение $R_u$ , %	4–6
Коэффициент вариации по разрывному удлинению $CVR_u$ , %	4,5
Электрическое сопротивление пряжи длиной 1 см $R_{1см}$ , Ом	$1,2 \cdot 10^2$

Для исследований выбрано переплетение с пропущенными петельными столбиками на базе кулирной глади, которое имеет сетчатую структуру. Кулирные переплетения обладают большими деформационными способностями, чем основовязанные, поэтому их целесообразнее использовать для изготовления изделий сложных форм. В соответствии с общей классификацией трикотажных переплетений, разработанной профессором Л.А. Кудрявиным, такой трикотаж относится к неполным переплетениям [6]. Особенностью одинарных неполных переплетений является отсутствие в них части петельных столбиков. Кулирные неполные переплетения получают выключением из работы игл путем переноса петель с выключаемой иглы на соседнюю иглу [7].

На рисунке 2, а показана графическая запись кулирного неполного переплетения на базе кулирной глади с чередованием работающих и выключенных из работы игл через две. Для трикотажа кулирного неполного переплетения на базе кулирной глади характерно наличие ячеей прямоугольной формы в местах пропущенных петельных столбиков (рисунок 1, б). Причем вертикальные стороны ячеей образованы петельными столбиками, а горизонтальные – протяжками, соединяющими петельные столбики.

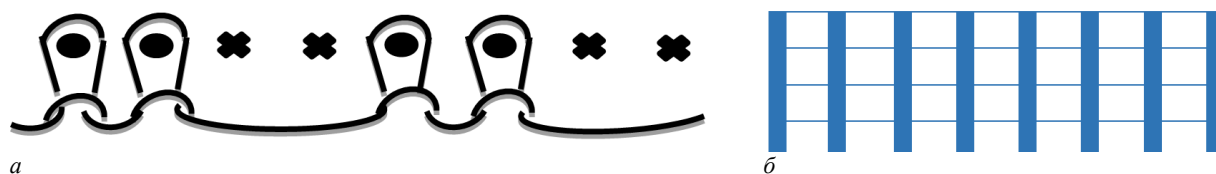


Рисунок 2. – Графическая запись (а) и схема макроструктуры (б) кулирного неполного переплетения на базе кулирной глади с чередованием работающих и выключенных из работы игл через две

Размер ячеей будет зависеть в большей степени от числа выключенных игл, чем от плотности вязания. Кроме того, на размер и форму ячеей будут влиять вид и толщина перерабатываемой пряжи и нитей. С точки зрения ресурсосберегающих технологий трикотаж неполных переплетений обладает низкой материалоемкостью в сравнении с переплетением, на базе которого он получен.

Изготавливали трикотаж в условиях лаборатории кафедры текстильных материалов Витебского государственного технологического университета на плосковязальной машине 10 класса из вышеуказанной нити в 2 сложения.

Подбор класса вязальной машины осуществляли по формуле [8]

$$K = \sqrt{\frac{7500}{T}},$$

где  $K$  – класс машины;

$T$  – линейная плотность перерабатываемой пряжи (нити), текс.

Размер получаемых ячеек зависит от плотности вязания и варьируется от 10 мм<sup>2</sup> (вариант 1) до 14 мм<sup>2</sup> (вариант 3) (таблица 3).

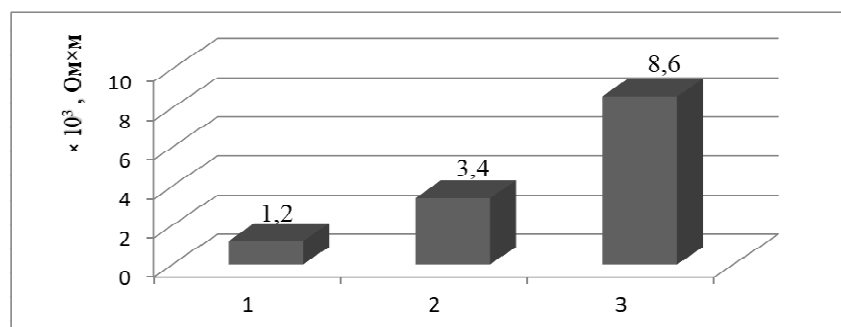
Таблица 3. – Параметры петельной структуры трикотажа из комбинированной электропроводящей пряжи

Показатели	Вариант образца		
	1	2	3
Число петельных столбиков, $N_{ст}$	29	27	24
Число петельных рядов, $N_p$	38	36	32
Длина нити в петеле, $l$ , мм	5,2	6,9	7,1
Поверхностная плотность, $\rho$ , г/м <sup>2</sup>	35,1	33,4	31,6

При изготовлении образцов трикотажа комбинированная электропроводящая пряжа показала хорошую вязальную способность.

Для обеспечения максимальной усадки нитей и увеличения степени заполнения полотна волокнистым материалом контактная термообработка осуществлялась без натяжения полотна. Выходными параметрами являлись характеристики трикотажного материала: размер получаемых ячеек, который зависит от плотности вязания, поверхностная плотность, усадка по длине, усадка по ширине.

Данные образцы исследовались в аккредитованной лаборатории УО «ВГТУ» на удельное электростатическое поверхностное сопротивление и напряженность электростатического поля. В результате предварительных исследований было установлено, что уровень напряженности электростатического поля значительно снижается (с 2,5 до 0 кВт/м) при изготовлении трикотажных полотен из электропроводящей пряжи, что в значительной степени показывает влияние электропроводящей пряжи на электростатические свойства. Результаты исследований трикотажных полотен на удельное электростатическое поверхностное сопротивление представлены на рисунке 3.



1 – с ячейками 10 мм<sup>2</sup>; 2 – с ячейками 12 мм<sup>2</sup>; 3 – с ячейками 14 мм<sup>2</sup>

Рисунок 3. – Диаграмма удельного электрического поверхностного сопротивления трикотажного материала из электропроводящей пряжи

Под воздействием внешнего электромагнитного поля внутри металла клетки свободные электроны начинают движение. В результате этого противоположные стороны клетки конструкции приобретают такой заряд, что образованное им поле стремится компенсировать воздействие внешнего электромагнитного поля (принцип работы клетки М. Фарадея). Для того чтобы экранировать высокочастотные излучения, размер ячейки должен быть меньше длины волны излучения. Причем эффективность экранирования напрямую зависит от формы токопроводящего материала. При этом прослеживается следующая зависимость: чем быстрее изменяется электромагнитное поле, тем сильнее сопротивляется материал к проникновению поля вовнутрь клетки. Клетка лишь максимально снижает его воздействие, и степень этого снижения зависит от следующих факторов: размера ячейки и электропроводности металла клетки, частоты и формы электромагнитной волны, расстояния от ис-

точника излучения, мощности источника изучения. Такие модифицированные клетки используются в специальных защитных тканых и трикотажных костюмах обслуживающего персонала подстанций с различным напряжением, а также для экранирования (защиты) от электромагнитных волн различных бытовых приборов<sup>1</sup>.

В условиях сертифицированной лаборатории «БелГИМ» трикотажное полотно из электропроводящей пряжи с ячейками 10 мм<sup>2</sup> исследовался на способность экранировать (отражать) СВЧ-волны.

На рисунке 4 представлена графическая зависимость экранирования образца трикотажа, %, от частоты электромагнитных волн, ГГц.

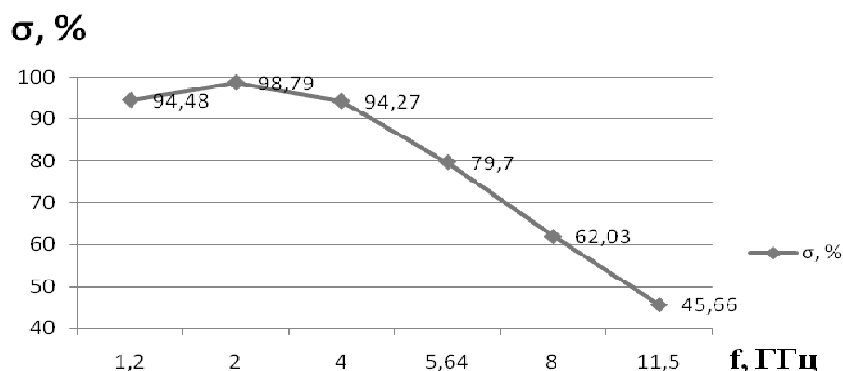


Рисунок 4. – Зависимость экранирования трикотажного полотна от частоты электромагнитных волн в ГГц

В результате анализа зависимости экранирования от частоты электромагнитных волн установлено, что образец одинаково хорошо экранирует электромагнитное излучение на частотах 1,2–4 ГГц разных диапазонов частот, не пропуская 94,27–98,79% электромагнитных волн. Максимальное значение экранирования показывает образец 98,79% при частоте 2 ГГц. Минимальное значение экранирования показывает образец 45,66% при частоте 11,5 ГГц.

**Заключение.** Установлено, что защитные свойства зависят от структуры трикотажного полотна. Наилучшие антистатические свойства трикотажных полотен и максимальное экранирование трикотажа достигаются при минимальном размере ячейки в 10 мм<sup>2</sup>. Значение экранирования данного образца от 45,66% до 98,79%. Следовательно, трикотажное полотно с прямоугольными ячейками на базе неполной глади может применяться в качестве самостоятельного изделия или в составе изделий, предназначенных для защиты от статического электричества и излучения электронных приборов на различных диапазонах волн.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Effect of Yarn Constituent and Fabric Specifications on Electrical Properties of Hybrid Woven Fabrics / K.B. Cheng [et al.] // *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*. – 2003. – № 34(10). – P. 971–978. DOI: 10.1016/S1359-835X(03)00178-7
2. Ueng, T.H. Friction Core Spun Yarns for Electrical Properties of Woven Fabrics / T.H. Ueng, K.B. Cheng // *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*. – 2001. – № 32(10). – P. 1492–1496. DOI: 10.1016/S1359-835x(01)00048-3
3. Замостоцкий, Е.Г. Технология получения комбинированных термостойких электропроводящих пряжи и нитей для тканей специального назначения / Е.Г. Замостоцкий, П.А. Костин, А.Г. Коган // *Вестн. Витеб. гос. технол. ун-та*. – 2011. – № 20. – С. 56–64.
4. Kostin, P.A. Optimization of the discretization process in the production of an electrically conducting heat-resistant combination yarn / P.A. Kostin, A.S. Dyagilev, A.G. Kogan // *Fibre Chemistry*. – 2012. – № 43. – P. 362.
5. Чарковский, А.В. Технология и оборудование трикотажного производства / А.В. Чарковский. – Витебск : ВГТУ, 2012. – 387 с. : ил.
6. Далидович, А.С. Основы теории вязания / А.С. Далидович. – М. : Лег. индустрия, 1970. – 432 с.
7. Чарковский, А.В. Основы процессов вязания / А.В. Чарковский. – Витебск : ВГТУ, 2012. – 160 с.

#### REFERENCES

1. Cheng, K.B., Cheng, T.W., Lee, K.C., Ueng, T.H. & Hsing, W.H. (2003). Effect of Yarn Constituent and Fabric Specifications on Electrical Properties of Hybrid Woven Fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(10), 971–978. DOI: 10.1016/S1359-835X(03)00178-7

<sup>1</sup> Повный, А. Электрик Инфо. Теория и практика [Электронный ресурс]. URL: <http://elektrik.info/main/fakty/1161-chto-takoe-kletka-faradeya.html>.

2. Ueng, T.H. & Cheng, K.B. (2001). Friction Core Spun Yarns for Electrical Properties of Woven Fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(10), 1492–1496. DOI: 10.1016/S1359-835X(01)00048-3
3. Zamostotskiy, Ye.G., Kostin, P.A. & Kogan, A.G. (2011). Tekhnologiya polucheniya kombinirovannykh termostoykikh elektroprovodyashchikh pryazhi i nitey dlya tkaney spetsial'nogo naznacheniya [Technology for obtaining combined heat-resistant electrically conductive yarns and threads for special-purpose fabrics]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Vitebsk State Technological University], (20), 56–64. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Kostin, P.A., Dyagilev, A.S. & Kogan, A.G. (2012). Optimization of the discretization process in the production of an electrically conducting heat-resistant combination yarn. *Fibre Chemistry*, 43(5), 362. DOI: 10.1007/s10692-012-9365-0
5. Charkovskiy, A.V. (2012). *Tekhnologiya i oborudovaniye trikotazhnogo proizvodstva* [Technology and equipment of knitwear production]. Vitebsk: VGTU. (In Russ.).
6. Dalidovich, A.S. (1970). *Osnovy teorii vyazaniya* [Fundamentals of the theory of knitting]. Moscow: Legkaya industriya. (In Russ.).
7. Charkovskiy, A.V. (2005). *Osnovy protsessov vyazaniya* [Fundamentals of knitting processes]. Vitebsk: VGTU. (In Russ.).

Поступила 12.01.2022

### ANALYSIS OF SHIELDING AND ANTISTATIC PROPERTIES OF KNITTED FABRICS FOR SPECIAL PURPOSE

**P. KOSTIN, Y. ZAMASTOTSKY, I. RASSOHINA**

*This article is devoted to the analysis of the shielding and antistatic properties of knitted fabrics with combined electrically conductive yarns. The article presents studies of electrically conductive yarn for physical, mechanical and electrophysical properties, describes the composition and choice of the type of weaving of knitted fabrics and presents the results of an experimental study of the dependence of the cell density of knitted fabrics on the antistatic and shielding properties of knitted fabrics.*

**Keywords:** knitted fabrics, antistatic effect, shielding, microwave waves, combined electrically conductive yarn.

## ТРАНСПОРТ

УДК 656.13

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ КОЛИЧЕСТВА И ТЯЖЕСТИ  
ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ  
С УЧАСТИЕМ ПЕШЕХОДОВ В Г. ГОМЕЛЕ

канд. техн. наук, доц. С.А. АЗЕМША, О.Н. ШУСТ  
(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)

Самыми уязвимыми и незащищенными участниками дорожного движения являются пешеходы. По данным Госавтоинспекции, количество аварий с участием пешеходов в Республике Беларусь за 2020 г. насчитывается 1246 случаев (35,1% от общего числа ДТП), в которых 235 человек погибли и 1065 получили ранения. Места, в которых наиболее часто случаются наезды на пешеходов: регулируемые и нерегулируемые пешеходные переходы и перекрестки; остановки общественного транспорта; мосты, эстакады, путепроводы; другие места, не предназначенные для пешеходного перехода. Согласно стратегии обеспечения безопасности дорожного движения в Республике Беларусь «Добрая дорога», утвержденной на 2018–2025 гг., устранение факторов, влияющих на дорожно-транспортные происшествия (ДТП), должно привести к уменьшению количества погибших в ДТП до не более 350 человек к 2025 г.

**Ключевые слова:** безопасность дорожного движения, пешеход, дорожно-транспортное происшествие, добыча данных, таблицы сопряженности.

**Введение.** Самыми уязвимыми и незащищенными участниками дорожного движения являются пешеходы. С их участием в Республике Беларусь происходит значительно количество дорожно-транспортных происшествий. С их участием в Республике Беларусь происходит значительно количество дорожно-транспортных происшествий. Тяжесть последствий этих аварий, как правило, высока. Поэтому разработка мероприятий по повышению безопасности движения незащищенных категорий участников дорожного движения позволит значительным образом повлиять на ситуацию с аварийностью.

Цель публикации – разработка мероприятий по повышению безопасности движения пешеходов. Объект исследования – движение пешеходов в г. Гомеле. Предмет исследования – безопасность движения пешеходов. Методы исследования – натурные обследования; статистические методы (корреляционный и регрессионный анализ, а также анализ методами Data Mining)<sup>1</sup>.

На рисунке 1 приведена динамика изменения числа погибших в ДТП на территории Республики Беларусь, а также прогнозная регрессионная модель вида

$$F(x) = \frac{1}{0,212645553 \ln(x) - 1,61647762}.$$

Для этой модели коэффициент корреляции равен 0,975, что показывает наличие тесной связи между наблюдаемыми переменными. Также были получены коэффициент детерминации, равный 0,951, критерий Фишера  $F = 254,69$  и  $p$ -уровень значимости  $p < 0,00000$ . Диаграмма распределения остатков продемонстрировала схожесть с нормальным законом распределения. Все это подтверждает значимость полученной модели (1) и ее возможность для целей прогнозирования.

Согласно рисунку 1, при сохранении сложившейся тенденции, прогнозное количество погибших в ДТП в контрольном 2025 г. составит 407. Таким образом, при сохранении сложившейся тенденции целевое значение в 350 погибших, сформулированное в стратегии обеспечения безопасности дорожного движения в Республике Беларусь «Добрая дорога», не будет достигнуто. Это обуславливает необходимость разработки дополнительных мер по снижению ДТП, в т.ч. с участием пешеходов, а также подчеркивает актуальность выбранной темы.

На рисунке 2 приведена диаграмма распределения ДТП по категориям в г. Гомеле за 2010–2020 гг. Наибольшее количество ДТП относится к категории «ТС+пешеход».

<sup>1</sup> Statistica 13.3. Computer program. Serial number JRR709H998119TE-A.

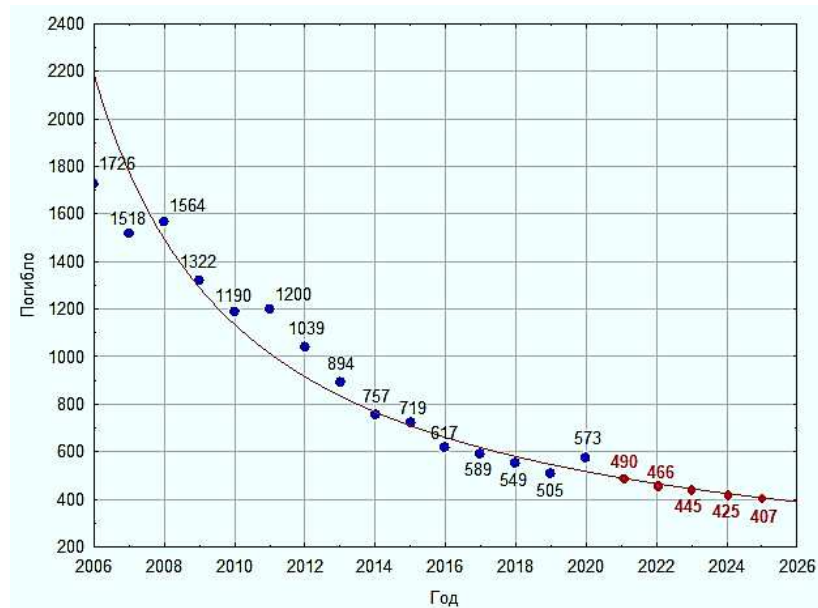


Рисунок 1. – Прогноз числа погибших в ДТП в графической форме



Рисунок 2. – Распределение ДТП по категориям в г. Гомеле, 2010–2020 гг.

Приведенные доводы показывают актуальность тематики повышения безопасности дорожного движения для целей достижения целевых значений, установленных в стратегии обеспечения безопасности дорожного движения в Республике Беларусь «Добрая дорога», а также необходимости разработки в г. Гомеле мероприятий по снижению аварийности с участием пешеходов.

**Основная часть.** Основой для разработки мероприятий по снижению аварийности с участием пешеходов в городе Гомеле послужили статистические данные о ДТП<sup>2</sup>. В качестве источников информации использовалась база данных ГАИ по ДТП, а также натурные данные, собранные с пешеходных переходов г. Гомеля (независимые факторы). В ходе исследования пешеходных переходов оценивались следующие независимые факторы (показатели пешеходных переходов, рисунки 3, 4):

- ширина пешеходного перехода (В);
- тип пешеходного перехода (регулируемый, нерегулируемый);
- наличие искусственной неровности (ИН) и ее вид: ИН1 – для снижения скорости движения автомобилей; ИН2 – искусственная неровность, имеющая вид приподнятого пешеходного перехода; ИН3 – шумовые полосы;

<sup>2</sup> Статистика БЕЛТА [Электронный ресурс]. URL: <https://www.belta.by/incident/view/v-belarusi-v-2020-godu-v-dtp-pogibli-573-cheloveka-iz-nih-22-rebenka-425982-2021/>.



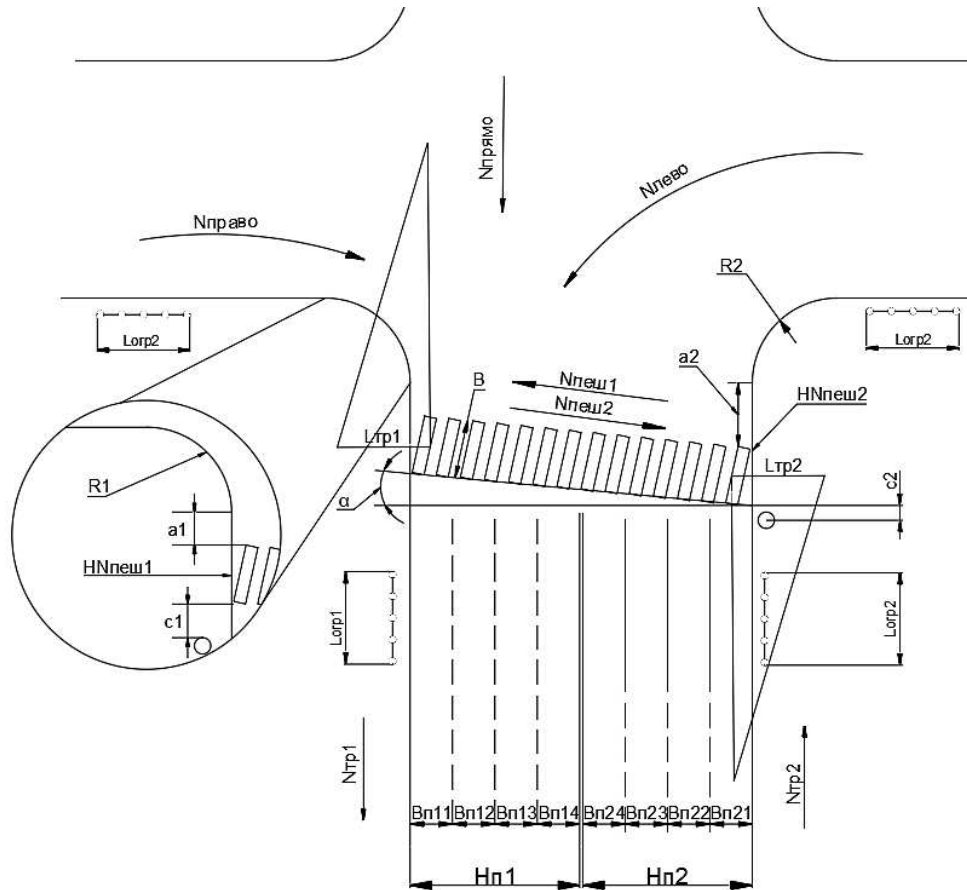


Рисунок 3. – Схема измеряемых параметров при расположении пешеходного перехода на перекрестке

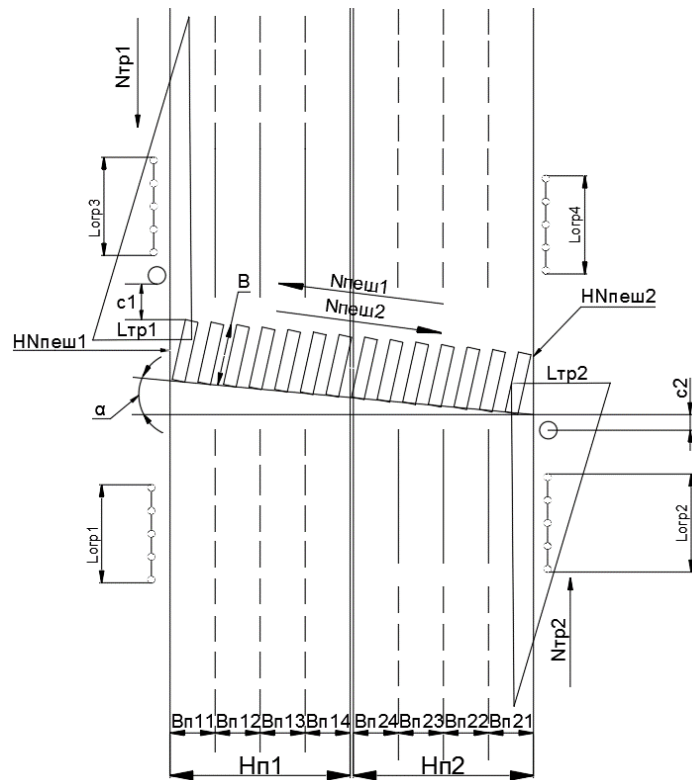


Рисунок 4. – Схема измеряемых параметров при расположении пешеходного перехода на перегоне

- количество полос в каждом направлении (Нп1, Нп2);
- ширина полос движения (Вп);
- ограничение скорости;
- наличие и ширина островка безопасности: 1 – если конструктивно выделенный; 2 – разрыв в разделительной полосе; 3 – выделенный с помощью разметки;
- интенсивность движения транспортных и пешеходных потоков (Нпрямо, Нлево, Нправо, Нтр1, Нтр2, Нпеш1, Нпеш 2);
- наличие табло вызова пешехода;
- угол расположения пешеходного перехода ( $\alpha$ );
- треугольники боковой видимости и их прозрачность (Лтр);
- высота бортового камня на пешеходных переходах (ННпеш1, ННпеш 2);
- наличие пешеходных ограждений и их протяженность (Lогр);
- радиус закругления кромки проезжей части (R1, R2);
- расстояния от окончания закругления кромки ПЧ до края ПП ( $a_1, a_2$ );
- расстояния от края ПП до края ближайшего столба ( $c_1, c_2$ );
- параметры цикла светофорного регулирования;
- наличие конфликтов с право- и левоповоротным транспортным потоками;
- параметры светофорного цикла (рисунок 5): количество рабочих программ контроллера на перекрестке; продолжительность циклов рабочих программ ( $T_{ц}$ ); продолжительность пешеходных тактов (продолжительность зеленого и зеленого моргающего ( $T_{зел}$  и  $T_{зм}$ ); продолжительность переходных интервалов (с предыдущей фазы, последующей фазы ( $T_{пр1}$  и  $T_{пр2}$ )).

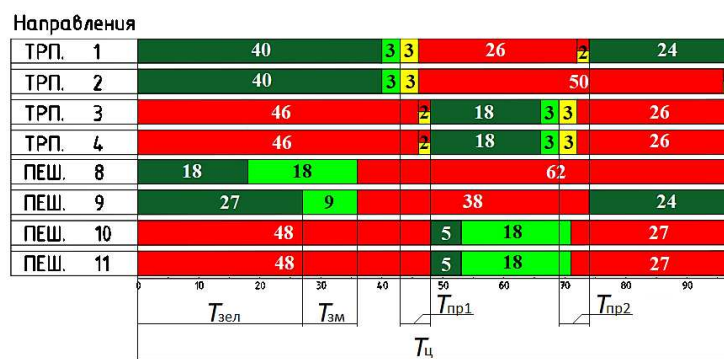


Рисунок 5. – Пример рассматриваемых параметров цикла светофорного регулирования

Данные по вышеперечисленным факторам собраны с 88 пешеходных переходов, расположенных в разных районах г. Гомеля.

В качестве зависимых переменных, описывающих аварийность, использовались следующие абсолютные и относительные показатели аварийности.

Абсолютные – общее количество ДТП, раненых и погибших:

- количество ДТП с участием пешеходов (А);
- количество погибших в ДТП пешеходов ( $A_{п}$ , чел);
- количество раненных в ДТП пешеходов ( $A_{р}$ , чел).

Относительные – показатели аварийности на 100 тыс. жителей, на 10 тыс. транспортных средств:

- количество ДТП с участием пешеходов в расчете на интенсивность ТС, пересекающих пешеходное сечение в вечерний час пик ( $O_{п}^{ТС}$ );
- количество погибших в ДТП пешеходов в расчете на интенсивность ТС, пересекающих пешеходное сечение в вечерний час пик ( $O_{п}^{ТС}$ , чел);
- количество раненных в ДТП пешеходов в расчете на интенсивность ТС, пересекающих пешеходное сечение в вечерний час пик ( $O_{р}^{ТС}$ , чел);
- количество ДТП с участием пешеходов в расчете на интенсивность пешеходов, пересекающих ПЧ по ПП ( $O_{пеш}$ );
- количество погибших в ДТП пешеходов в расчете на интенсивность пешеходов, пересекающих ПЧ по ПП ( $O_{пеш}^{пеш}$ , чел);
- количество раненных в ДТП пешеходов в расчете на интенсивность пешеходов, пересекающих ПЧ по ПП ( $O_{р}^{пеш}$ , чел).

Основной целью исследования было выявление независимых факторов, значимо влияющих на зависимость, а также установление вида такой зависимости и разработка на этой основе мероприятий по снижению числа и тяжести ДТП с участием пешеходов.

На следующем этапе для поиска зависимостей между независимыми и зависимыми переменными в программном продукте Statistica с помощью инструмента Data Mining проведен анализ и отсев наименее значимых независимых факторов, для которых  $p > 0,05$ . В результате этого была получена итоговая таблица.

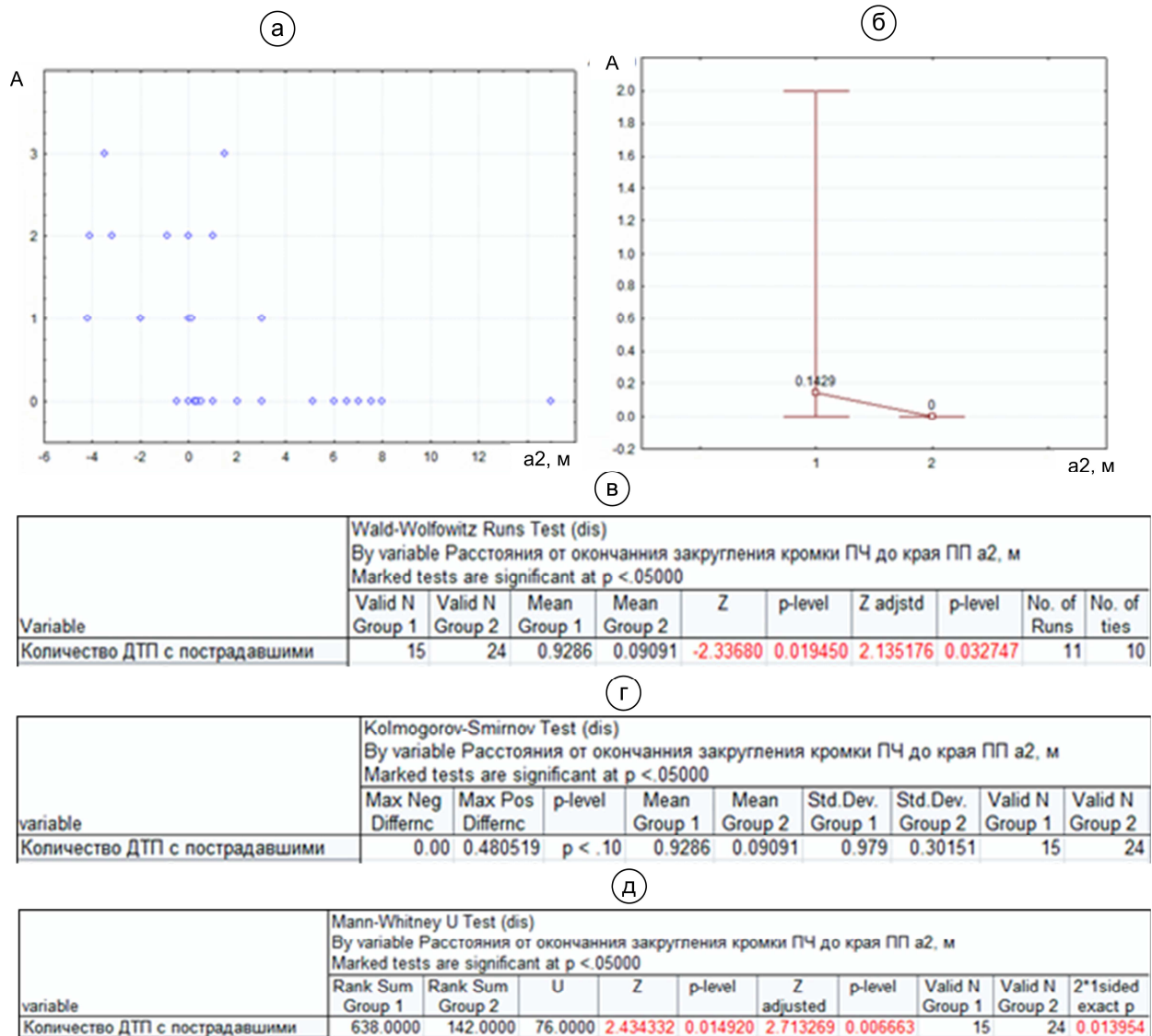
Таблица. – Факторы, значимо влияющие на аварийность

Факторы	F-значение	p-значение
<i>Количество ДТП с участием пешеходов</i>		
Радиус закругления кромки проезжей части (R, м)	7.941869	0.000002
Расстояния от окончания закругления кромки ПЧ до края ПП (a1,2, м)	4.878138	0.000187
Продолжительность зеленого пешеходного (T <sub>зел</sub> , сек)	3.819967	0.007409
Конфликт с правоповоротным транспортным потоком (ТП)	4.977352	0.028887
<i>Количество погибших в ДТП пешеходов</i>		
Продолжительность переходного интервала с предыдущей фазы для РП2 (T <sub>пр1</sub> , сек)	30.07084	0.000000
Расстояния от окончания закругления кромки ПЧ до края ПП (a1,2, м)	21.55407	0.000000
Ограничение скорости (км/ч)	6.31548	0.003029
Конфликт с левоповоротным ТП	6.66921	0.011902
<i>Количество раненых в ДТП пешеходов</i>		
Радиусы закруглений кромки проезжей части (R, м)	9.678196	0.000000
Интенсивность (N <sub>тр1</sub> +N <sub>тр2</sub> , ед/ч)	7.044104	0.000008
Расстояния от окончания закругления кромки ПЧ до края ПП (a1,2, м)	4.789843	0.000223
Конфликт с правоповоротным ТП	3.852233	0.043655
<i>Количество ДТП с участием пешеходов в расчете на 10<sup>4</sup> ТС</i>		
Ширина пешеходного перехода (B, м)	2.391898	0.030797
<i>Количество погибших в ДТП пешеходов в расчете на 10<sup>4</sup> ТС</i>		
Продолжительность переходного интервала с предыдущей фазы для РП2 (T <sub>пр1</sub> , сек)	23.07831	0.000000
Расстояния от окончания закругления кромки ПЧ до края ПП (a1,2, м)	20.82768	0.000000
Продолжительность зеленого пешеходного (T <sub>зел</sub> , сек)	6.78267	0.002045
Конфликт с левоповоротным ТП	6.83101	0.010959
<i>Количество раненных в ДТП пешеходов в расчете на 10<sup>4</sup> ТС</i>		
Ширина пешеходного перехода (B, м)	2.331753	0.034872
<i>Количество ДТП с участием пешеходов в расчете на 10<sup>5</sup> населения</i>		
Интенсивность (N <sub>тр1</sub> +N <sub>тр2</sub> , ед/ч)	2.812953	0.017013
Радиусы закруглений кромки проезжей части (R, м)	2.812596	0.017024
<i>Количество погибших в ДТП пешеходов в расчете на 10<sup>5</sup> населения</i>		
Продолжительность переходного интервала с предыдущей фазы для РП2 (T <sub>пр1</sub> , сек)	25.06558	0.000000
Расстояния от окончания закругления кромки ПЧ до края ПП (a1,2, м)	19.04920	0.000000
Ограничение скорости (км/ч)	8.22503	0.000625
Продолжительность зеленого пешеходного (T <sub>зел</sub> , сек)	8.22060	0.000096
<i>Количество раненных в ДТП пешеходов в расчете на 10<sup>5</sup> населения</i>		
Радиусы закруглений кромки проезжей части (R, м)	2.964329	0.012766
Интенсивность (N <sub>тр1</sub> +N <sub>тр2</sub> , ед/ч)	2.791861	0.017707

Согласно таблице, не каждый фактор влияет на все показатели аварийности. Наиболее значимыми факторами, воздействующими на наибольшее количество показателей аварийности, являются: расстояния от окончания закругления кромки ПЧ до края ПП, радиус закругления кромки проезжей части, продолжительность переходного интервала с предыдущей фазы для РП2, продолжительность зеленого пешеходного, конфликт с лево- и правоповоротным ТП, интенсивность N<sub>тр1</sub>+N<sub>тр2</sub>.

Далее с помощью диаграммы рассеяния рассмотрено влияние каждой независимой переменной таблицы на показатели аварийности и с помощью статистических критериев оценено наличие значимости такого влияния (рисунок 6).

Из рисунка 6, а видно, что количество ДТП с участием пешеходов равно нулю для тех из них, на которых параметр a2 больше 4 м. На рисунке 6, б данные диаграммы рассеивания рисунка 6, а представлены в виде диаграммы размаха двух групп переменных. При этом в первую группу вошли пешеходные переходы с a2 до 4 м, а во вторую – больше 4 м. Прослеживается наличие в показателе аварийности для двух рассматриваемых групп (рисунок 6, б). На рисунках 6, в, г оценена значимость в показателе аварийности А между двумя группами перекрестков соответственно по тесту Вальда–Вольфовица, тесту Колмогорова–Смирнова, U-тесту Мана–Уитни. По тесту Вальда–Вольфовица и U-тесту Мана–Уитни значения показателя аварийности А значимо отличаются в двух рассматриваемых группах пешеходных переходов.



*a* – диаграмма рассеивания; *б* – диаграмма размаха; *в* – тест Вальда–Вольфовица; *г* – тест Колмогорова–Смирнова; *д* – *U*-тест Мана–Уитни

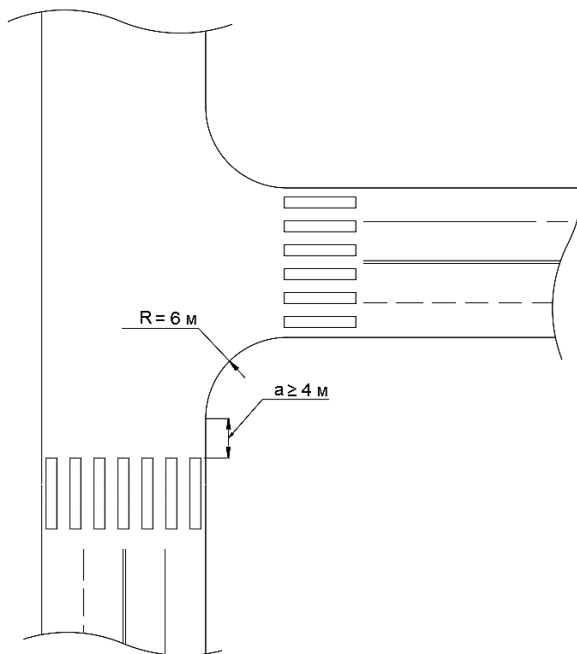
**Рисунок 6. – Определение влияния расстояния от окончания закругления кромки проезжей части до края пешеходного перехода (*a*2) на количество ДТП с участием пешеходов (*A*)**

Аналогичные статистические процедуры были применены для всех пар зависимых и независимых переменных, приведенных в таблице. Полученные при этом результаты показывают, что на показатели аварийности с участием пешеходов влияют:

- расстояния от окончания закругления кромки ПЧ до края ПП (*a*1, *a*2, см. рисунок 3);
- радиус закругления кромки проезжей части (*R*1, *R*2, см. рисунок 3);
- продолжительность переходного интервала с предыдущей фазы (*T*пр1, см. рисунок 5);
- продолжительность зеленого пешеходного (*T*зел);
- конфликт с лево- и правоповоротным транспортными потоками;
- интенсивность транспортного потока через пешеходный переход (*N*тр1+*N*тр2, см. рисунок 3).

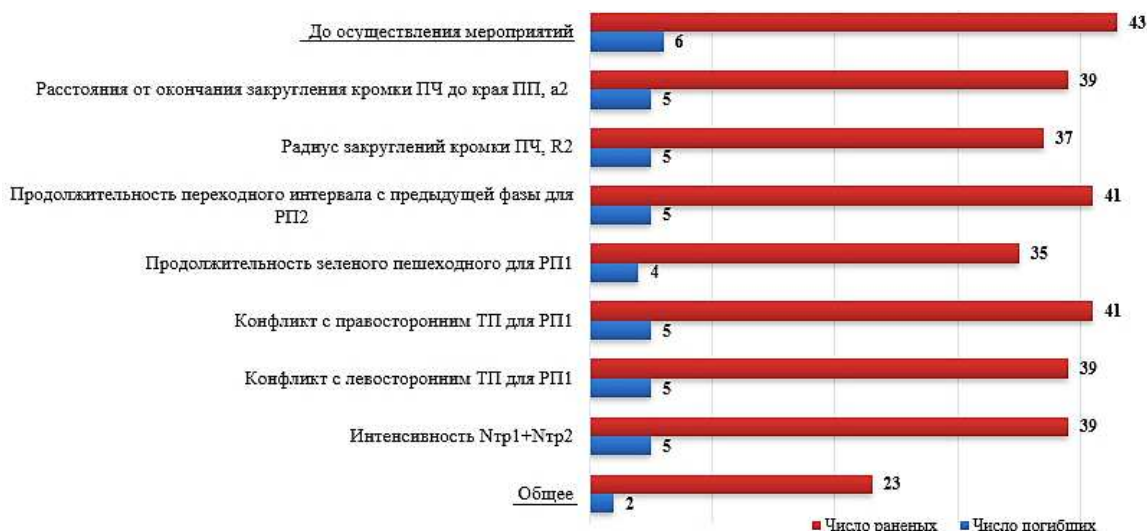
Это явилось основой для предложений следующих мероприятий для снижения количества и тяжести последствий ДТП с участием пешеходов:

- пешеходный переход на перекрестке должен быть расположен на расстояние не менее 4 м от края закругления кромки проезжей части (см. рисунок 7);
- радиус закругления кромки проезжей части на пересечениях и примыканиях в одном уровне следует принимать исходя из категории улицы согласно ТКП 45-3.03-227-2010, а в случаях, когда он равен меньше 6 м, принимать его равным 6 м (см. рисунок 7);



**Рисунок 7. – Оптимальные значения расстояния от начала закругления кромки проезжей части до пешеходного перехода и радиуса такого закругления**

- оптимизация переходных интервалов светофорного цикла;
- минимальное значение продолжительности зеленого пешеходного должна быть не менее 10 с (Тзел, см. рисунок 5);
- оптимизировать структуры циклов светофорного регулирования с учетом допустимости конфликтов пешеходных потоков с право- и левоповоротными транспортными потоками;
- разрабатывать мероприятия по снижению интенсивности транспортные потоков (платные парковки, выделенные полосы и приоритетный проезд на перекрестках общественного транспорта и т.д.).



**Рисунок 8. – Прогнозируемые значения числа погибших и раненых от внедрения предложенных мероприятий**

Для оценки экономического эффекта от рассмотренных мероприятий с помощью программного продукта Statistica методами Data Miner был создан внедряемый файл на основании имеющихся исходных данных. В данный файл вносились изменения по рассматриваемым факторам. Например, было получено что радиус закругления кромки ПЧ должен быть не более 6 м. На этом основании на всех пешеходных переходах, не удовлетворяющих данной величине, показатель заменяется на 6 м. Далее программа генерирует PMML (Predictive Models Markup Language – язык разметки для прогнозного моделирования) файл, подбирая наибо-

лее подходящий модуль для прогнозирования. Затем с помощью модуля «Rapid Deployment of Predictive Models – быстрое внедрение прогнозирующих моделей» осуществлялось вычисление прогнозного значения показателей аварийности с помощью полностью обученной модели.

При совокупности внедрения предложенных мероприятия общее число погибших снизится с 6 человек до 2, раненых – с 43 до 23, что эквивалентно более 675 тыс. долл. (см. рисунок 8).

**Заключение.** В рамках данной работы произведены натурные обследования 88 пешеходных переходов города Гомеля. В результате чего были получены значения таких независимых переменных (ширина пешеходного перехода и полос для движения ТС, ограничения скорости, интенсивность транспортных и пешеходных потоков, радиусы закругления кромки ПЧ, параметры светофорного регулирования и т.д.). Затем в программном продукте STATISTICA произведен анализ, в ходе которого было выявлено, что наиболее значимое влияние на показатели аварийности оказывают:

- расстояния от окончания закругления кромки ПЧ до края ПП (a1, a2 на рисунке 3);
- радиус закругления кромки проезжей части (R1, R2 на рисунке 3);
- продолжительность переходного интервала с предыдущей фазы (Tпр1 на рисунке 5);
- продолжительность зеленого пешеходного (Тзел);
- конфликт с лево- и правоповоротным транспортными потоками;
- интенсивность транспортного потока через пешеходный переход (Nтр1+Nтр2 на рисунке 3).

С учетом этого был предложен ряд мероприятий по повышению безопасности движения пешеходов, реализация которых позволит сократить число погибших в ДТП в г Гомеле на 66,7%, раненых на 46,5%. При этом будет достигнут экономический эффект в размере 675 тыс. долл. в год.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аземша, С.А. Применение научных методов в повышении безопасности дорожного движения / С.А. Аземша, А.Н. Старовойтов ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2017. – 191 с.
2. Боровиков, В.И. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере / В.И. Боровиков. – СПб. : Питер, 2001. – 650 с. : ил. + CD-ROM. – (Для профессионалов).
3. Боровиков, В.П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA / В.П. Боровиков. – М. : Горячая линия. Телеком, 2013. – 288 с.

#### REFERENCES

1. Azemsha, S.A. & Starovoytov, A.N. (2017). *Primeneniye nauchnykh metodov v povyshenii bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya* [Application of scientific methods in improving road safety]. Gomel': Bel-GUT. (In Russ.).
2. Borovikov, V.I. (2001). *STATISTICA: iskusstvo analiza dannykh na komp'yutere* [STATISTICA: the art of computer data analysis]. St. Petersburg: Piter. (In Russ.).
3. Borovikov, V.P. (2013). *Populyarnoye vvedeniye v sovremennyy analiz dannykh v sisteme STATISTICA* [A popular introduction to modern data analysis in the STATISTICA system]. Moscow: Goryachaya liniya. Telekom. (In Russ.).

Поступила 17.02.2022

### DEVELOPMENT OF MEASURES TO REDUCE THE NUMBERS AND SEVERITY ROAD ACCIDENTS WITH PEDESTRIAN PARTICIPATION IN GOMEL

S.A. AZEMSHA, O.N. SHUST

*The most vulnerable and unprotected road users are pedestrians. According to the State traffic inspectorate, the number of accidents involving pedestrians in the Republic of Belarus for 2020 totals 1246 cases (35,1% of the total number of accidents), in which 235 people died and 1065 were injured. Places with the most frequent pedestrian collisions:*

- regulated and unregulated pedestrian crossings and intersections;
- public transport stops;
- bridges, flyovers, overpasses;
- and other places not intended for a pedestrian crossing.

*According to the strategy for ensuring road safety in the Republic of Belarus “Good Road” approved for 2018–2025, the elimination of factors affecting road traffic accidents (RTA) should lead to a decrease in the number of deaths in road accidents to no more than 350 people by 2025.*

**Keywords:** traffic safety, pedestrian, traffic accident, data mining, contingency tables.

УДК 656.13.05

**УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ РАБОТЫ МАРШРУТНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА СЕКТОРАЛЬНЫМ МЕТОДОМ**

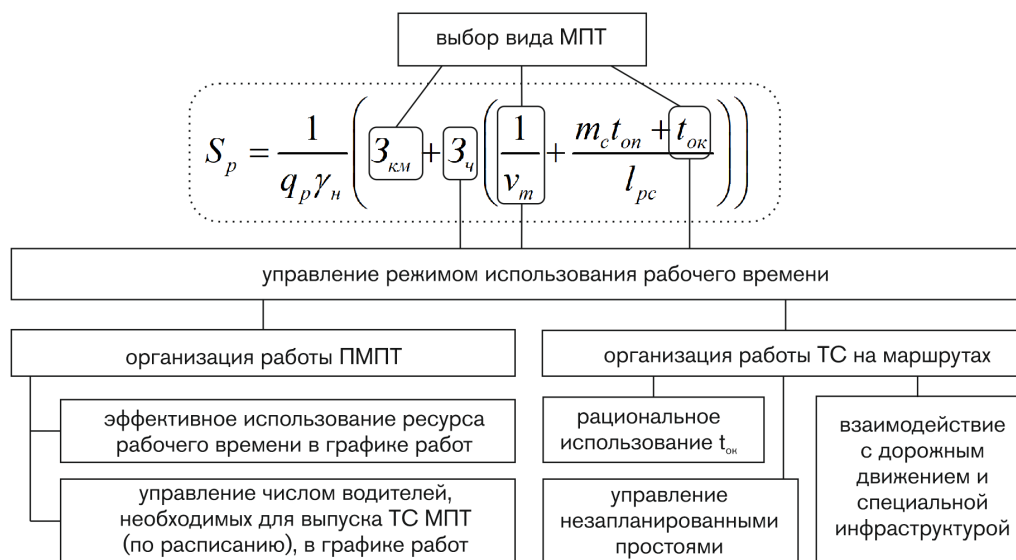
**С.В. СЕМЧЕНКОВ, д-р техн. наук, доц. Д.В. КАПСКИЙ**  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассмотрен секторальный метод управления режимом работы маршрутного пассажирского транспорта. Определены новые возможные пути повышения его эксплуатационных предприятий. Использование секторального метода позволило повысить эффективность использования ресурса рабочего времени водителей, снизить непродуктивные затраты при организации перевозок пассажиров маршрутного пассажирского транспорта в ряде городов Республики Беларусь.

**Ключевые слова:** маршрутный пассажирский транспорт, рациональные графики работы водителей, режим использования рабочего времени, непродуктивные затраты, секторальный метод, повышение эффективности работы.

**Введение.** Маршрутный пассажирский транспорт (далее – МПТ) играет неопределимую роль в жизни и экономическом развитии городов, обеспечивая основные передвижения населения, способствует улучшению экологической обстановки, повышению безопасности участников движения. Согласно современным исследованиям (В.Н. Седюкевич), затраты эксплуатационных предприятий МПТ (далее – ЭМПТ) на перевозку одного пассажира являются не только стоимостным выражением понесенных ЭМПТ расходов, но и, определяя степень эффективности, позволяют на основе выявленных зависимостей управлять процессами организации перевозок [3]. Таким образом, ЭМПТ во многом определяют такие параметры, как удельные затраты ЭМПТ на 1 км пробега, средняя дальность поездки пассажира, пассажироместность используемых транспортных средств (далее – ТС) МПТ и коэффициент ее использования.

Определены новые возможные пути повышения ЭМПТ, заключающиеся в устранении причин возникновения непродуктивных затрат ПМПТ путем выбора вида МПТ и управления РИРВ (следует учитывать, что доля заработной платы водителей в расходах в различных ЭМПТ составляет 30–50%), которые приведены на рисунке 1 в виде схемы, структурно представленной с использованием зависимости для определения удельной себестоимости перевозок на единицу транспортной работы  $S_p$  как показателя эффективности при выполнении перевозок пассажиров, предложенной в [3].



$q_p$  – пассажироместность ТС, пасс;  $\gamma_n$  – коэффициент использования пассажироместности;  $Z_{км}$  – переменные затраты на 1 км пробега ТС, BYN/км;  $Z_{ч}$  – постоянные затраты на 1 ч работы ТС, BYN/км;  $v_t$  – техническая скорость ТС, км/ч;  $m_c$  – количество остановочных пунктов;  $t_{он}$  – время нахождения ТС на остановочных пунктах, ч;  $t_{ок}$  – время нахождения ТС на конечных станциях, ч;  $l_{рс}$  – средняя дальность поездки пассажира, км

**Рисунок 1. – Возможные пути повышения эксплуатационных предприятий маршрутного пассажирского транспорта**



**Основная часть.** Обследование условий движения ТС МПТ на маршрутной сети городов Минска, Полоцка, Новополоцка и Слонима показало, что в определенных случаях наблюдаются потери времени при взаимодействии ТС МПТ с дорожным движением, порядок которого определен соответствующими схемами и обеспечивается техническими средствами. Дополнительные ограничения налагает также специальная инфраструктура отдельных видов МПТ. Все это приводит к возникновению краткосрочных «простоев», некоторого рода промедлений движения ТС МПТ, связанных с ожиданием возможности дальнейшего движения при условии обеспечения безопасности движения, необходимостью отступления от требований дорожных знаков и разметки, отсутствием права преимущественного движения и т.д. [1; 5].

При принятии решения о выборе вида МПТ традиционно учитываются технико-экономические характеристики ТС МПТ, к которым относятся их массогабаритные параметры, а также вместимость, комфортабельность, маневренность, приемистость, провозная способность. Кроме этого, учитываются расходы, связанные с созданием инфраструктуры, приобретением ТС, и расходы, возникающие при их эксплуатации. Существующие подходы, состоящие в выборе вида МПТ на основе критерия провозной способности, на сегодня не являются всеобъемлющими, не в полной мере учитывают возможности новых видов МПТ и требуют уточнения и развития. Следует отметить, что во многих случаях актуальным остается вопрос выбора вида МПТ в целом для осуществления перевозок на сложившейся маршрутной сети города, а также на отдельных существующих маршрутах или группах маршрутов [1; 6; 7].

Учитывая высокую степень гетерогенности маршрутов (как правило), проектирование секторов – сложная и ответственная задача, которая решается с помощью разработанной методики проектирования секторов (далее – МПС), которая обеспечивает формирование равнозначных по своим параметрам секторов и реализуется с помощью разработанного алгоритма формирования сектора (рисунок 2).

Управление числом водителей, необходимых для выпуска по числам месяца ТС МПТ на линию по заданному расписанию, для снижения непродуктивных затрат осуществляется на основе совместного применения разработанных в рамках секторального метода авторских методик:

- методики составления графика отпусков водителей, отличающейся определением периода начала трудового отпуска с уточнением до 10-дневного периода (декады), что позволяет равномерно распределить 39-дневные отпуска на протяжении года с учетом сезонности на основе применения алгоритма балансировки «занятости свободных ячеек», что приводит к значительному снижению неравномерности распределения числа водителей по дням каждого месяца;

- методики определения штатной численности водителей, учитывающей маршрутную технологию обслуживания, применение которой позволяет реагировать на внешние факторы;

- методики назначения режимов сменности водителей в секторе на основе применения строгого набора шаблонов графиков, применение которых исключает интерференцию последовательностей чередования водителей по сменам, при этом обеспечивая наличие нужного числа водителей, необходимых для выпуска ТС по дням месяца.

Типология режимов работы команд разработана с выделением в шаблоны секвенций всех возможных неповторяющихся последовательностей серий рабочих смен и выходных дней на основе реализации принципа гармонизации графика работ водителей с обеспечением не только надежности водителей путем строгого соблюдения режимов труда и отдыха водителей, систематического предоставления непрерывных периодов отдыха для восстановления работоспособности, но и равномерное распределение водителей по календарным дням месяца (в т.ч. на основе учета неравномерностей «рабочие–выходные» дни, «первая–вторая» смена и т.д.), объединенные в классы по признаку общности продолжительности цикла и числа водителей в команде, типичные представители которых приведены в [8].

Исследованиями установлено, что наиболее рациональными для организации команд водителей является совместное использование режимов работы с 12-дневным циклом (в вариантах команд для трех водителей и двух водителей) для обеспечения работы ТС МПТ по всем дням недели и 14-дневным циклом, для усиления сменной работы в будние дни. Работу водителей с разделением рабочего дня на части для обеспечения перевозки пассажиров в пиковое время целесообразно организовывать по специальному режиму работы с 7-дневным циклом.

Для определения режимов работы ТС и водителей каждый сектор описывается условной формулой сектора, для формирования которой разработан алгоритм, отличающийся подбором из числа кодированных такого количества шаблонов секвенций таких, которые обеспечивают выполнение описанных выше принципов.

**Заключение.** Универсальность секторального метода подчеркивается тем, что его принципы справедливы и для проектирования алгоритмов работы перспективных беспилотных ТС, для которых также будет применима и МПС, балансирующая межремонтные интервалы во времени, обеспечивающая рациональное планирование технического обслуживания и ремонта. Наличие доступных и понятных авторских методик позволяет в значительной степени сократить временные и стоимостные затраты на внедрение секторального метода, который является не капиталоемким, а наукоемким, поэтому внедряется легко и оперативно [9], в связи с чем обеспечиваются не только значимые, но и быстрые результаты по повышению ЭМПТ.



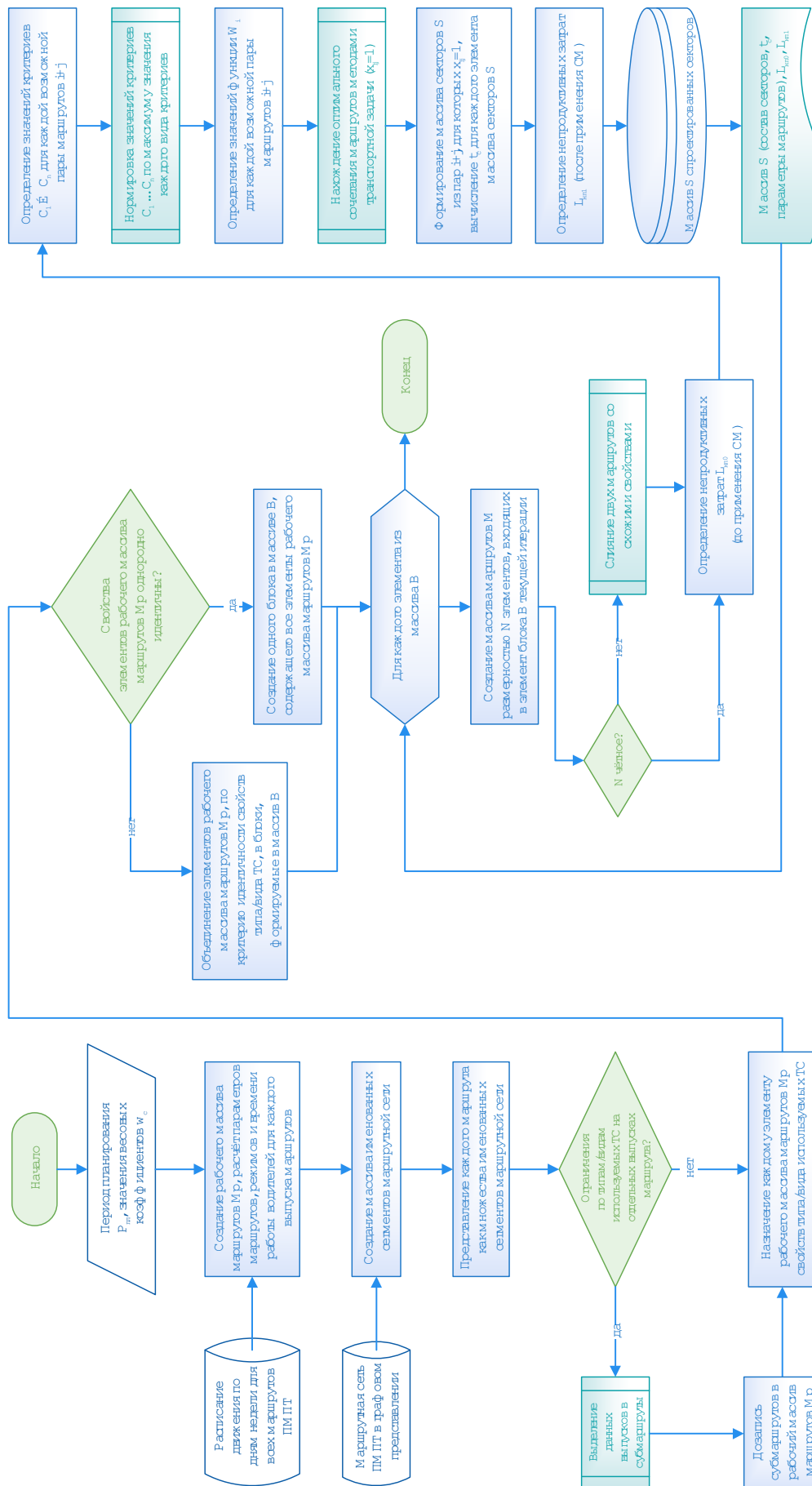


Рисунок 2. – Алгоритм формирования сектора

## ЛИТЕРАТУРА

1. Маршрутный транспорт городов Полоцка и Новополоцка: эффективность и тенденции развития / Д.В. Капский [и др.]. – Новополоцк : Полоц. гос.ун-т, 2021. – 308 с.
2. Капский, Д.В. Сравнение возможностей использования троллейбусов и электробусов для перевозок пассажиров в городах / Д.В. Капский, Е.Н. Кот, С.С. Семченков // Автомобиле- и тракторостроение : материалы конф. – Минск : БНТУ, 2019. – Т. 2. – С. 210–214.
3. Седюкевич, В.Н. Автомобильные перевозки грузов и пассажиров : учеб. пособие / В.Н. Седюкевич, А.Я. Андреев. – Минск : РИВШ, 2020. – 328 с.
4. Развитие городского транспорта в городах Полоцке и Новополоцке / Д.В. Капский [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – Новополоцк : ПГУ, 2020. – № 11. – С. 85–97.
5. Оценка состояния транспортной системы городов Полоцка и Новополоцка / Д.В. Капский [и др.]. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – Новополоцк : ПГУ, 2020. – № 11. – С. 98–102.
6. Капский, Д.В. Организация дорожного движения с учетом маршрутного пассажирского транспорта / Д.В. Капский, С.С. Семченков, Е.Н. Кот // Экономика Северо-Запада: Проблемы и перспективы развития. – СПб. : ИПРЭРАН, 2021. – 2(65). – С. 66–77.
7. Семченков, С.С. Повышение эффективности работы маршрутного пассажирского транспорта применением секторального метода / С.С. Семченков, Д.В. Капский // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии : сб. науч. ст. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 170–185.
8. Капский, Д.В. Некоторые вопросы системного подхода к планированию работы водителей городского пассажирского транспорта / Д.В. Капский, Е.Н. Кот, С.С. Семченков // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов / науч. ред. С.А. Ваксман. – Екатеринбург : АМБ, 2020. – С. 269–280.
9. Семченков, С.С. Методика автоматизации процессов организации работы водителей маршрутных транспортных средств / С.С. Семченков, Д.В. Капский // Новости науки и технологии. – Минск : БелИСА, 2021. – С. 74–82.
10. Капский, Д.В. Цифровизация управления работой водителей на предприятиях городского электротранспорта / Д.В. Капский, С.С. Семченков // X Форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства, Минск, 6–10 дек. 2021 г. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 76–77.

## REFERENCES

1. Kapskiy, D.V., Golovnich, A.K., Vigerina, T.V., Kuz'menko, V.N., Krasil'nikova, A.S., Gorelik, Ye.N., ... Kot, Ye.N. (2021). *Marshrutnyy transport gorodov Polotska i Novopolotska: effektivnost' i tendentsii razvitiya* [Route transport of the cities of Polotsk and Novopolotsk: efficiency and development trends]. Novopolotsk: Polotskiy gosudarstvennyy universitet. (In Russ.).
2. Kapskiy, D.V., Kot, Ye.N. & Semchenkov, Ye.N. (2019). *Sravneniye vozmozhnostey ispol'zovaniya trolleybusov i elektrobusev dlya perevozok passazhirov v gorodakh* [Comparison of the possibilities of using trolleybuses and electric buses for passenger transportation in cities]. *Avtomobil- i traktorostroyeniye* [Automotive and tractor building], (2), 210–214. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Sedyukevich, V.N. & Andreyev, A.YA. (2020). *Avtomobil'nyye perevozki gruzov i passazhirov* [Automobile transportation of goods and passengers]. Minsk: RIVSH. (In Russ.).
4. Kapskiy, D.V., Golovnich, A.K., Vigerina, T.V., Kuz'menko, V.N., Krasil'nikova, A.S., Gorelik, Ye.N., ... Kot, Ye.N. (2020). *Razvitiye gorodskogo transporta v gorodakh Polotske i Novopolotske* [Development of urban transport in the cities of Polotsk and Novopolotsk]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universitetata. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnyye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Sciences], (11), 85–97. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Kapskiy, D.V., Ivanov, V.P., Golovnich, A.K., Kuz'menko, V.N., Krasil'nikova, A.S., Gorelik, Ye.N., ... Kot, Ye.N. (2020). *Otsenka sostoyaniya transportnoy sistemy gorodov Polotska i Novopolotska* [Assessment of the state of the transport system of the cities of Polotsk and Novopolotsk]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universitetata. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnyye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Sciences], (11), 98–102. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Kapskiy, D.V., Semchenkov, S.S. & Kot, Ye.N. (2021). *Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya s uchetom marshrutnogo passazhirskogo transporta* [Organization of road traffic taking into account route passenger transport]. *Ekonomika Severo-Zapada: Problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: Problems and Prospects of Development], 2(65), 66–77. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Semchenkov, S.S. & Kapskiy, D.V. (2021). *Povysheniye effektivnosti raboty marshrutnogo passazhirskogo transporta primeneniym sektoral'nogo metoda* [Improving the efficiency of block passenger transport using the sectoral method]. *Transport i transportnyye sistemy: konstruirovaniye, ekspluatatsiya, tekhnologii* [Transport and transport systems: design, operation, technology] (170–185). Minsk: BNTU. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Kapskiy, D.V., Kot, Ye.N. & Semchenkov, S.S. (2020). *Nekotoryye voprosy sistemnogo podkhoda k planirovaniyu raboty voditeley gorodskogo passazhirskogo transporta* [Nekotoryye voprosy sistemnogo podkhoda k sledovaniyu raboty chauffeurs of urban passenger transport]. *Sotsial'no-ekonomicheskiye problemy razvitiya i funktsionirovaniya transportnykh sistem gorodov* [Socio-economic problems of development and functioning of transport systems of cities] (269–280). Yekaterinburg: AMB. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Semchenkov, S.S. & Kapskiy, D.V. (2021). *Metodika avtomatizatsii protsessov organizatsii raboty voditeley marshrutnykh transportnykh sredstv* [Methodology for automating the processes of organizing the work of drivers of route vehicles]. *Novosti nauki i tekhnologii* [News of science and technology] (74–82). Minsk: BelISA. (In Russ., abstr. in Engl.).

10. Kapskiy, D.V. & Semchenkov, S.S. (2021). Tsifrovizatsiya upravleniya rabotoy voditeley na predpriyatiyakh gorodskogo elektrotransporta [Digitalization of driver work management at urban electric transport enterprises]. X Forum vuzov inzhenerno-tekhnologicheskogo profilya Soyuznogo gosudarstva, Minsk, 6–10 dek. 2021 g. [X Forum of Engineering and Technology Universities of the Union State, Minsk, December 6–10, 2021] (76–77). Minsk: BNTU. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 17.06.2022

## OPERATION MODE MANAGEMENT OF ROUTE PASSENGER TRANSPORT SECTORAL METHOD

*S. SEMCHENKOV, D. KAPSKIY*

*The sectoral method of managing the operating mode of the route passenger transport is considered. New possible ways of increasing its operational enterprises are determined. The use of the sectoral method made it possible to increase the efficiency of using the working time resource of drivers, to reduce unproductive costs in organizing the transportation of passengers of route passenger transport in a number of cities of the Republic of Belarus.*

**Keywords:** *route passenger transport, rational work schedules for drivers, mode of using working time, unproductive costs, sectoral method, increase in work efficiency.*

УДК 656.13.05

## РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ ГРАФИКОВ РАБОТ ВОДИТЕЛЕЙ МАРШРУТНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СЕКТОРАЛЬНОГО МЕТОДА

*С.С. СЕМЧЕНКОВ, д-р техн. наук, доц. Д.В. КАПСКИЙ*  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Рассмотрены методы разработки рациональных графиков работ водителей маршрутного пассажирского транспорта (МПТ) и выбора режимов труда водителей. Представленный в статье графоаналитический метод распределенного назначения рабочих смен и выходных дней водителей при организации их работы секторальным методом позволил повысить эффективность использования ресурса рабочего времени водителей (РИРВ), снизить непродуктивные затраты и нашел свое применение при организации перевозок пассажиров МПТ в ряде городов Республики Беларусь.*

**Ключевые слова:** *маршрутный пассажирский транспорт, рациональные графики работы водителей, режим использования рабочего времени, непродуктивные затраты, секторальный метод, повышение эффективности работы.*

**Введение.** Формирование рационального графика работ водителей МПТ оказывает значительное влияние на эффективность маршрутного пассажирского транспорта (ЭМПТ). Однако на практике на сегодня складывается ситуация, когда этот ответственный компонент перевозочного процесса на предприятиях маршрутного пассажирского транспорта (ПМПТ) реализован путем проведения среднесрочного (на месяц) планирования работы водителей методами, не имеющими должного обоснования, зачастую интуитивным образом, на основе сложившейся практики, построенной в лучшем случае на основе учета нормативных требований режимов труда и отдыха водителей и совершенно не учитывающей критерии оптимальности и эффективности. Зачастую это приводит к возникновению непродуктивных затрат, снижению экономических показателей работы МПТ, сокращению ежедневного (междусменного), еженедельного отдыха, дроблению периодов еженедельного отдыха водителей, нерациональному РИРВ [1–5]. В связи с этим задача разработки рациональных графиков работ водителей МПТ является актуальной и востребованной.

**Основная часть.** *Степень научной разработанности исследуемой проблемы.* Анализ современных методов организации работы водителей МПТ на ПМПТ показал отсутствие применимых в условиях гибкого реагирования при разработке расписания на динамично меняющиеся потребности населения в перевозках МПТ методов определения рационального соотношения количества рабочих и выходных дней, назначения выходных дней и порядка чередования водителей по сменам. Статистическая обработка первичных документов ПМПТ, анализ сложившейся практики на ПМПТ выявили, что применяющиеся при разработке графиков работ имеют свои недостатки. При этом, рассматривая не только социальный аспект этих недостатков, следует отметить, что они, приводя к возникновению непродуктивных затрат, снижают рентабельность ПМПТ (подробно вопросы непродуктивных затрат рассмотрены в [1]). Необходимо отметить, что в совокупности со случайным, вероятностным характером наступления событий, делающих невозможным полную реализацию составленного существующими методами ПМПТ графика работ водителей, это приводит к еще большему негативному влиянию описанных выше факторов на ЭМПТ.

Обзор научных работ по вопросам ЭМПТ демонстрирует, что преимущественно они направлены на повышение ЭМПТ путем управления вместимостью применяемых транспортных средств (ТС), принятия решений на этапе разработки расписания, оптимизационных решений в области проектирования маршрутов [3; 6–8], а не совершенствованием качества эксплуатационной работы, и что задача повышения ЭМПТ (в современных условиях динамично изменяющихся систем МПТ) может быть решена путем организации выбора рационального РИРВ водителей с применением методов разработки рациональных графиков работы водителей МПТ.

Известны методы составления графиков работы водителей на основе применения типовых графиков сменности водителей. Так, д-р техн. наук И.В. Спирин, характеризуя в [7] особенности организации работы ПМПТ при составлении наряда на работу водителей, предлагает использовать типовые графики сменности, сформированные для различных систем закрепления, а далее, анализируя типовые графики сменности в [8], предлагает использовать различные варианты системы закрепления водителей за ТС в зависимости от средней продолжительности смены и, в свою очередь, применять типовые графики сменности в зависимости от выбранной по данному критерию системы закрепления. В своей работе [7] И.В. Спирин описывает способ обеспечения равенства условий труда и отдыха водителей при многосменной работе путем равномерного чередования между водителями выпусков маршрутов по сменам, при этом предлагает называть полным циклом работы водителя на закрепленном маршруте такое количество дней, за которое «каждый водитель проработает одинаковое число раз на различных выпусках в разные смены и будет иметь равное с другими водителями число выходных дней», а рабочим циклом – количество дней неповторяющейся последовательности чередования смен водителей по типовому графику сменности. Рассматривая вопросы суммированного учета рабочего

времени, И.Д. Нагаева, И.М. Улицкая [9] отмечают, что в основе разработки графиков работ лежат закрепления ТС за водителями, и выделяют простую (водители работают постоянно только в одну смену) и сложную (водители чередуются по сменам) структуры рабочих циклов. Аналогичных подходов придерживаются Д.И. Дуднев, М.И. Климова, А.А. Менн [10], И.С. Ефремов, В.М. Кобозев, В.А. Юдин [11], а Lars Schneider в [12] предлагает использовать 56-дневные циклы (8 полных недель, в течение которых для каждого из водителей произойдет полное смещение выходных дней с понедельника по воскресенье с выделением дополнительного свободного дня по потребности ПМПТ) работы водителей без закрепления их за ТС.

Исследование используемых зарубежных методов составления графиков работ водителей показало, что существуют отдельные решения задач распределения работников по сменам, заключающиеся в поиске различными математическими методами таких комбинаций, которые представляют собой выстроенные цепочки рабочих смен, полученные путем подбора последовательностей с нежестким, нефиксированным циклом работы водителя, что не всегда применимо в условиях работы большинства ПМПТ, т.к. может вызвать справедливые нарекания водителей, работающих в этом случае в режиме непредсказуемо-скользящих выходных (это приведет к невозможности планирования водителями личного времени, в т.ч. для решения социально-бытовых задач, например, взаимодействия членов семьи).

*Разработка рационального графика работ водителей.* Наиболее значимыми показателями, характеризующими режим работы водителей, являются месячное количество рабочих смен, продолжительность рабочих смен, а также их вариационный размах, время начала работы водителя, число предоставляемых водителю выходных дней в месяц, равномерность предоставления выходных дней, «спаренность» выходных дней, продолжительность периодов непрерывного отдыха и их количество, число рабочих смен между периодами отдыха (степень равномерности периодов рабочих смен).

После статистической обработки применяемых в системах МПТ расписаний движения видно, что продолжительность рабочих смен водителей колеблется в значительных пределах. На рисунке 1 приведена гистограмма распределения продолжительности рабочих смен водителей (с шагом 0,25 ч) для рабочих дней, на рисунке 2 – для выходных.

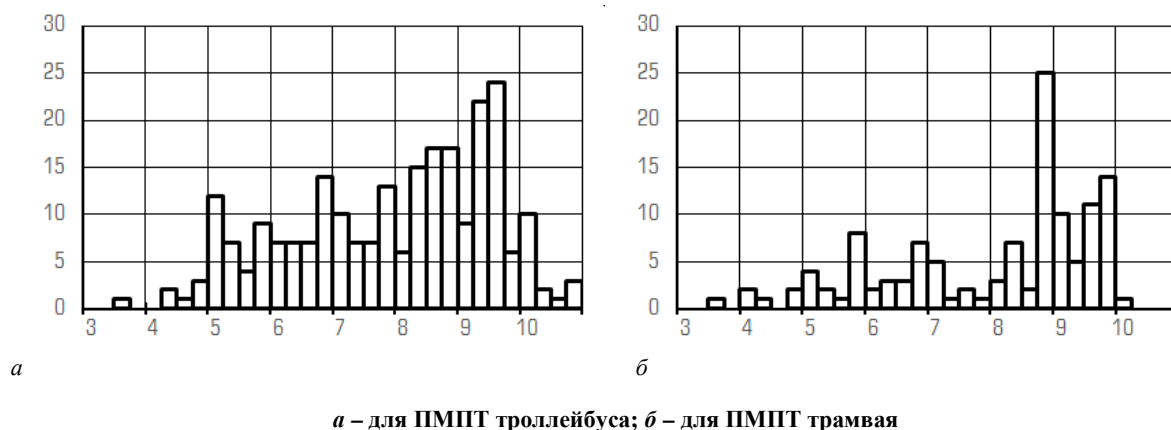


Рисунок 1. – Гистограмма распределения продолжительности смен водителей по рабочим дням недели

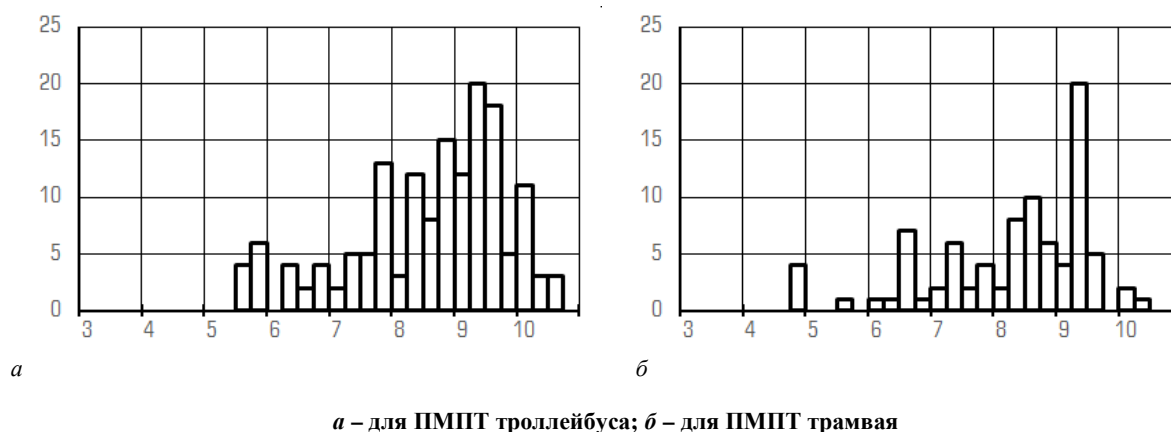


Рисунок 2. – Гистограмма распределения продолжительности смен водителей по выходным дням недели

На рисунке 3 представлен график изменения потребности в ТС МПТ в типичном представлении для троллейбуса и трамвая (на примере г. Минска), в соответствии с которым расписанием планируются режимы работы и сменности водителей.

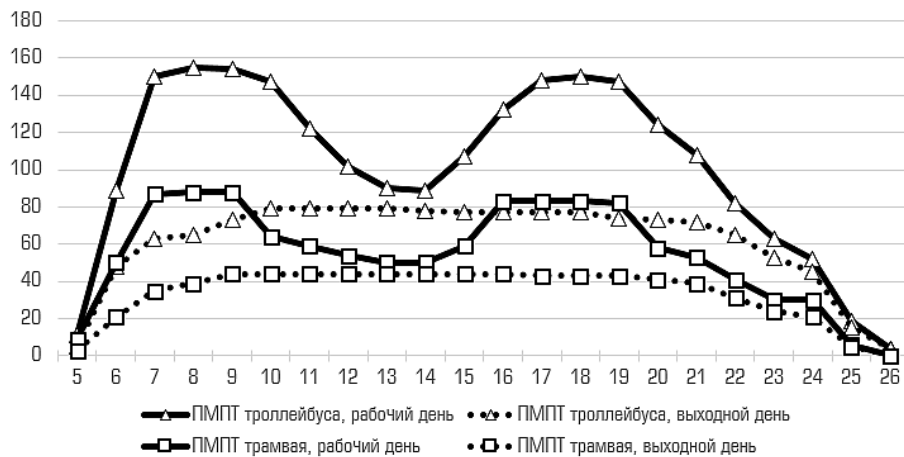


Рисунок 3. – График изменения потребности в ТС МПТ на маршрутах, обслуживаемых ПМПТ троллейбуса и трамвая (на примере г. Минска)

В качестве примера на рисунке 4 приведена диаграмма режима сменности водителей по рабочим (верхняя часть) и выходным (нижняя часть) дням недели, типичная для обслуживания маршрутов МПТ.



Рисунок 4. – Диаграмма режима сменности водителей МПТ по рабочим и выходным дням.

Предоставление выходных дней (еженедельного непрерывного отдыха) регулируется ст. 136 Трудового кодекса Республики Беларусь<sup>1</sup> [13] (ТК РБ). Положения, содержащиеся в ТК РБ, дают основание сделать ряд утверждений, а именно:

1. Еженедельный непрерывный отдых реализуется в выходные дни (абз. 1 ст. 136 ТК РБ), имеет продолжительность не менее 42 часов (абз. 1 ст. 138 ТК РБ, п. 25 Постановления<sup>2</sup> (Постановление № 82), при сменной работе, а также суммированном учете рабочего времени продолжительность может исчисляться в среднем за учетный период (абз. 3 ст. 138 ТК РБ, п. 25 Постановления № 82), при этом продолжительность еженедельного непрерывного отдыха исчисляется с момента окончания рабочего дня (смены) накануне выходного дня (выходных дней) и до момента его начала в первый после выходного дня (выходных дней) рабочий день (абз. 2 ст. 138 ТК РБ).

2. Выходной день (выходные дни) является периодом еженедельного непрерывного отдыха (абз. 1 ст. 136 ТК РБ).

3. Выходной день (выходные дни) предоставляется всем работникам (абз. 1 ст. 136 ТК РБ), не позднее чем за шесть рабочих дней подряд (абз. 8 ст. 136 ТК РБ), в количестве не менее количества полных рабочих недель текущего месяца (п. 26 Постановления № 82), в различные дни календарной недели поочередно каждой группе работников согласно графику работ (сменности) в организациях, обеспечивающих постоянное непрерывное обслуживание населения, к которым относятся организации транспорта (абз. 1 ст. 140 ТК РБ), как правило, по принципу «оба выходных дня подряд» (абз. 6 ст. 136 ТК РБ).

В данной связи следует обратить внимание, что выходной день в обязательном порядке является свободным от работы календарным днем (то есть с 00:00 до 24:00), следующим после окончания рабочего дня (смены) и свободным от работы календарным днем, предшествующим первому календарному дню после выходного. Значит, обязательным условием при разработке графика работ водителя является назначение накануне выходного дня такого режима работы, при котором время окончания работы водителя будет установлено до 24:00. Для оценки доли таких смен в расписании движения МПТ, типичном для исполнения ПМПТ троллейбуса и трамвая, выполнен его анализ, результаты которого сведены в таблицу.

Таблица. – Структурный анализ видов рабочих смен, предоставляемых расписанием МПТ

Вид ПМПТ	Вид дня	Выпуск в 1-ю смену по видам			Выпуск во 2-ю смену по видам				
		всего	разрывных	неразрывных	всего	разрывных	неразрывных		
							всего	в т.ч. до 24:00	доля смен до 24:00
ПМПТ троллейбуса	Рабочий	<b>158</b>	40	118	<b>153</b>	40	113	54	48%
ПМПТ троллейбуса	Выходной	<b>79</b>	0	79	<b>76</b>	0	76	22	29%
ПМПТ трамвая	Рабочий	<b>83</b>	19	64	<b>78</b>	19	59	24	41%
ПМПТ трамвая	Выходной	<b>44</b>	0	44	<b>43</b>	0	43	15	35%

Таким образом, помимо условий для разработки графика работ, изложенных в [1; 3]<sup>3</sup>, условий предоставления еженедельного непрерывного отдыха, основанных на вышеизложенных утверждениях, необходимо обеспечивать разработку таких после довательностей чередования водителей по сменам, при которых не наступит ситуация, при которой в каждый календарный день доля водителей, имеющих последний рабочий день второй смены перед выходным будет превышать долю неразрывных выпусков со временем окончания работа до 24:00 (для рабочего дня 41–48%, для выходного дня 29–35% по данным таблицы). В противном случае рабочее время водителей, переходящее на выходной день, повлечет возникновение непродуктивных затрат, сопряженных с оплатой данного времени водителям, и нарушит дальнейшие спроектированные режимы работы водителей.

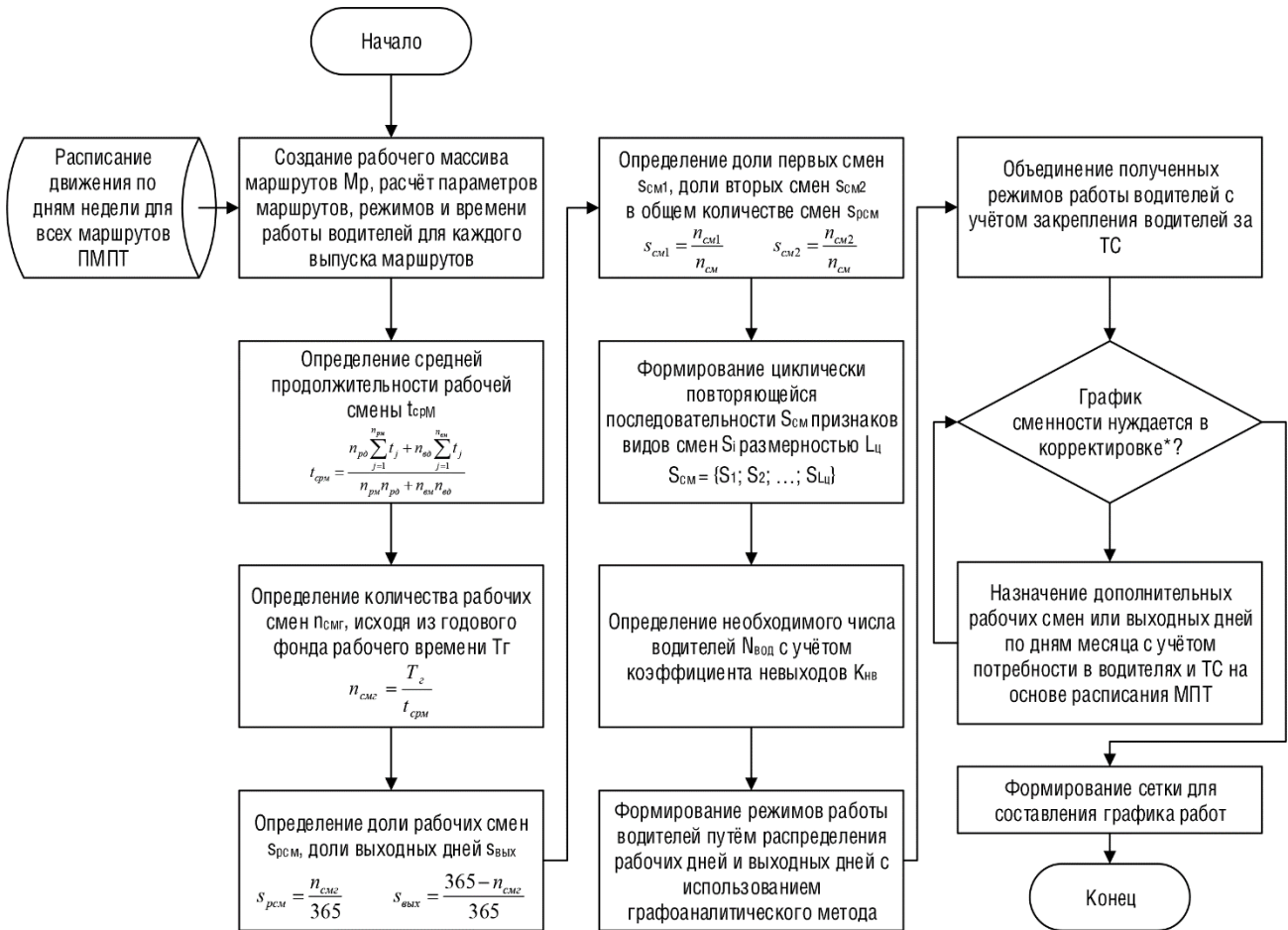
Разработка рационального графика работ водителей секторальным методом предполагает авторский поэтапный подход, который строится на реализации алгоритма (рисунок 5), предусматривающего установление циклической последовательности чередования водителей по сменам с последующим формированием из полу-

<sup>1</sup> Трудовой кодекс Республики Беларусь. – Минск : Энергопресс, 2022. – 255 с.

<sup>2</sup> Об утверждении Положения о рабочем времени и времени отдыха водителей автомобильного транспорта [Электронный ресурс] : постановление М-ва транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь, 25 нояб. 2010 г., № 82 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=W21023063>. – Дата доступа: 24.06.2022.

<sup>3</sup> Семченков, С.С. Подготовка суточных нарядов на работу водителей транспортных средств при перевозках пассажиров в регулярном сообщении / С.С. Семченков, В.Н. Седюкевич // Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов : сб. науч. тр. / ред. колл.: Ф.А. Романюк [и др.]. – Минск : БНТУ, 2014. –С. 286–292.

ченных последовательностей предварительного графика чередования водителей по сменам (с его корректировкой в случае необходимости учета неординарных ситуаций, носящих разовый характер по отношению к назначенным последовательностям) и окончательным закреплением за каждым водителем по числам месяца определенных выпусков из числа возможных при организации работы секторальным методом (порядок формирования секторов описан в [4]) и позволяет оперативно моделировать влияние графиков работ водителей на ЭМПТ в различных условиях эксплуатации путем управления непродуктивными затратами. Добавим, что так задача составления рациональных графиков работ водителей секторальным методом может решаться в двух постановках: при постоянных режимах труда водителей и при возможных гибких режимах труда водителей. При этом в комбинации могут использоваться любые, не противоречащие трудовому законодательству, режимы труда водителя.



\* критерием принятия решения является соответствие количества рабочих смен  $n_{смi}$  в  $i$ -й месяц количеству рабочих смен в данный месяц  $n_{смij}$  у  $j$ -го водителя, а также выполнения условия  $d_{mn} > r_{mn}$  для  $n$ -го вида смен в каждый  $m$ -й день месяца, где  $d_{mn}$  — число водителей,  $r_{mn}$  — выпуск

**Рисунок 5. – Алгоритм разработки рационального графика работ водителей секторальным методом**

Значительно снижает трудоемкость и повышает качество среднесрочного планирования на этапе разработки шаблонов графиков сменности графоаналитический метод, который позволяет равномерно распределить рабочие и выходные дни между водителями сектора. Исходными данными для расчета графоаналитическим методом (порядок выполнения операций поясняет рисунок 6) являются продолжительность рабочего цикла  $L_{ц}$ , доля рабочих смен  $s_{рсм}$ , доля выходных дней  $s_{вых}$ , выстроенная на основе этих данных последовательность  $S_{см}$  размерности  $L_{ц}$ , заполненная признаками видов смен («1» – первая смена, «2» – вторая смена, «В» – выходной день), начинающаяся с признака выходного дня, а также необходимое число водителей  $N_{вод}$ , для которых производится разработка графика работ.

Расчет графоаналитическим методом проводится пошагово следующим образом:

1. Выстраивается матрица размерностью  $N_{вод} \times L_{ц}$ , геометрический размер каждой ячейки которой принимается равным друг другу. Для удобства использования каждая строка матрицы обозначается  $\{B_1, B_2, \dots, B_{N_{вод}}\}$ , а каждый столбец матрицы – порядковым номером дня циклической последовательности  $\{1, 2, \dots, L_{ц}\}$ . К правому краю матрицы достраивается временная матрица такой же размерности. В ячейки, соответствующие



элементам первой строки матрицы, слева направо вносятся признаки смен  $S_1, S_2, \dots, S_{L_{ц}}$ , выбранные из последовательности  $S_{см}$ .

2. Линии, ограничивающие ячейки матрицы размерностью  $N_{вод} \times L_{ц}$ , обозначаются  $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$  (по схеме на рисунке 6). На пересечении линий  $L_1$  и  $L_4$  наносится точка  $P(L_1 \times L_4)$ , а на пересечении линий  $L_1$  и  $L_2$  – точка  $P(L_1 \times L_2)$ . Из точки  $P(L_1 \times L_4)$  в  $P(L_1 \times L_2)$  проводится опорная линия  $L_0$ , пересекающая ячейки «сетки» матрицы. Каждая строка матрицы, начиная со второй, просматривается слева направо и определяется, по построению, какую первую ячейку линия  $L_0$  пересечет по наибольшей длине. Эта ячейка обводится и является опорной для данной строки. Если линия  $L_0$  пересекает смежные ячейки по равной длине, то в качестве опорной выбирается первая пересекаемая ячейка. Далее в каждой строке матрицы, начиная с опорной, заполняются ячейки, в которые слева направо вносятся признаки смен  $S_1, S_2, \dots, S_{L_{ц}}$ , выбранные из последовательности  $S_{см}$ . Значения из ячеек, расположенных правее линии  $L_2$ , переносятся на место свободных, незаполненных ячеек основной матрицы, начиная от линии  $L_1$  вправо.

3. Производится группировка полученных последовательностей таким образом, чтобы прикрепить к каждому ТС нужное число водителей. Например, при схеме закрепления «три водителя на ТС» объединяются такие последовательности, которые будут обеспечивать наличие на ТС в каждый день последовательностей двух водителей в смежные смены.

4. После группировки формируется окончательная сетка графика работ.

В зависимости от количества используемых ТС и необходимости закрепления как можно большего или, как можно меньшего количества располагаемых ТС группировка полученных последовательностей может производиться и альтернативными способами. Например, в схеме работы для двух водителей результаты выполнения шагов 3 и 4 графоаналитического метода могут выглядеть так, как показано на рисунке 7.

Анализ полученных сеток графиков работ показывает, что каждый день цикла (а значит, и каждый календарный день месяца) равномерно обеспечен водителями 1-й и 2-й смен, выходные дни распределены равномерно, случаи, когда водители работают последний день перед 2-й сменой, также распределены по дням месяца равномерно, что позволит беспрепятственно обеспечить их сменами со временем окончания до 24:00, выполняя требования трудового законодательства без возникновения непродуктивных затрат.

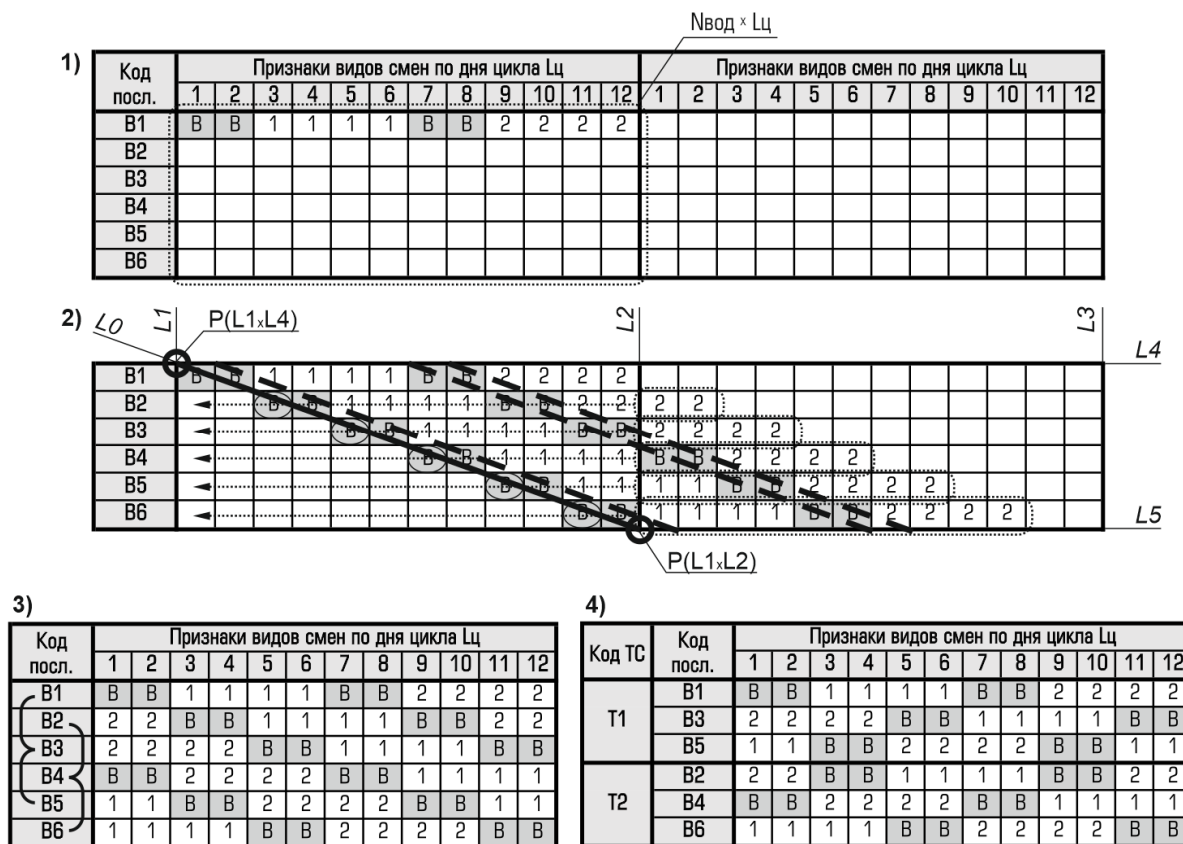


Рисунок 6. – Порядок выполнения операций при использовании графоаналитического метода

Код посл.	Признаки видов смен по дня цикла Лц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
В1	В	В	1	1	1	1	В	В	2	2	2	2
В2	2	2	В	В	1	1	1	1	В	В	2	2
В3	2	2	2	2	В	В	1	1	1	1	В	В
В4	В	В	2	2	2	2	В	В	1	1	1	1
В5	1	1	В	В	2	2	2	2	В	В	1	1
В6	1	1	1	1	В	В	2	2	2	2	В	В

Код ТС	Код посл.	Признаки видов смен по дня цикла Лц											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Т3	В1	В	В	1	1	1	1	В	В	2	2	2	2
	В4	В	В	2	2	2	2	В	В	1	1	1	1
Т4	В2	2	2	В	В	1	1	1	1	В	В	2	2
	В5	1	1	В	В	2	2	2	2	В	В	1	1
Т5	В3	2	2	2	2	В	В	1	1	1	1	В	В
	В6	1	1	1	1	В	В	2	2	2	2	В	В

Рисунок 7. – Порядок выполнения операций при использовании графоаналитического метода

Предлагаемые в результате составленных графоаналитическим методом комбинации целесообразно кодировать и выбирать для назначения режимов работы водителей, учитывая их пожелания, но только в рамках полученных кодированных последовательностей. Стоит заметить, что формализация циклически повторяющихся последовательностей, полученных графоаналитическим методом с использованием матриц шаблонов секвенции способом, изложенным в [1], значительно упрощает в последующем подход к назначению шаблонов последовательностей рабочих смен в случае необходимости замены водителя в сформированных водительских командах сектора.

Более того, в рамках секторального метода предоставляется возможность выбора также и режимов работы водителей на основе подхода рационального РИРВ, используя автоматизированную методику формирования секторов, на основе применения различных критериев оптимальности<sup>4</sup>.

В отдельных случаях могут возникать ситуации, когда составленные графики работ будут нуждаться в корректировке. Такие корректировки могут быть как запланированные, так и незапланированные. К необходимости запланированных корректировок следует относить те ситуации, когда для определенных водителей планируется трудовой отпуск, прохождение медкомиссии, повышение квалификации, занятия по подготовке к работе в осенне-зимний период и т.д. В этом случае после формирования из полученных кодированных последовательностей графика работ по числам месяца для определенных водителей, имеющих запланированные отсутствия, признаки смен заменяются на «О» и производится подсчет числа водителей, предусмотренных разрабатываемым графиком для 1-й и 2-й смен. Эти значения сравниваются с выпуском ТС МПТ на линию по сменам по дням месяца и определяются факты дефицита и профицита водителей по сменам. Дефицит водителей ликвидируется в данном случае за счет точечного переноса рабочих смен водителей, имеющих рабочие смены в дни профицита, но при условии обязательного сохранения количества периодов непрерывного отдыха. В отношении незапланированных корректировок решения должны приниматься реактивно. Для этого разработана методика оперативного сбора и обработки информации о состоянии эксплуатационной работы и алгоритм реагирования ответственного работника (инженера, диспетчера) при наступлении внезапных обстоятельств (болезнь водителя, незапланированный отпуск, чрезвычайная ситуация и т.п.) на основе критерия минимизации непродуктивных затрат в сложившейся обстановке.

При переносе рабочих дней могут возникать ситуации, когда водители, закрепленные за одним ТС, окажутся назначенными для работы в одноименные смены. В этом случае целесообразно использовать предлагаемый авторами метод полугибкого закрепления водителей за ТС, предусматривающий возможность того, что в отдельные дни месяца водители, закрепленные за одним ТС, но работающие в одноименные смены, могут быть назначены в наряде как в резерв, так и на выпуск по расписанию. Тогда водитель, работающий в смену, не предусмотренную исходной последовательностью, будет работать на других однотипных ТС своего сектора.

Полученные в условиях производства результаты позволили сделать положительный вывод о возможности использования прикладной методики в решении задач организации эксплуатационной работы ПМПТ секторальным методом.

**Заключение.** Определенные закономерности влияния РИРВ и режимов работы в графиках работ водителей на непродуктивные затраты и ЭМПТ [3; 4; 6] и методика [1] явились предпосылкой к описанному графоаналитическому методу. Необходимо отметить, что критерием анализа также может являться иной выбранный показатель, например, технико-экономический или интегральный, объединяющий в себе необходимые для анализа факторы.

Разработана прикладная методика решения задачи составления рациональных графиков работ водителей МПТ и выбора режимов труда водителей, рационального использования рабочего времени, предложены мето-

<sup>4</sup> Компьютерная программа «GRAPH-SM»: свидетельство о добровольной регистрации и депонировании объекта авторского права № 1489-КП / С.С. Семченков, Д.В. Капский // правообладатели С.С. Семченков, Д.В. Капский; регистрация и депонирование 09.03.2022; внесение записи в реестр 25.03.2022.

ды корректировки рациональных графиков работ водителей, ориентированные на обеспечение выпуска ТС МПТ на линию при одновременном сокращении уровня непродуктивных затрат. Результат решения графоаналитическим методом в рамках секторального метода задачи позволяет разработать не только рациональный график работ водителя, но и рациональное сочетание режимов труда водителя, что в совокупности приводит к повышению качества эксплуатационной работы.

Предлагаемые методы разработки рациональных графиков работ водителей МПТ и выбора режимов труда водителей позволяют повысить эффективность РИРВ, а разработанное программное обеспечение – оперативность, снизить трудоемкость процесса разработки рациональных графиков работ водителей ТС МПТ.

Экспериментальная проверка разработанной методики подтвердила ее эффективность на действующих ПМПТ как автомобильного, так и городского электрического транспорта. В результате внедрения графиков работ водителей МПТ достигнуто снижение непродуктивных затрат и повышено качество эксплуатационной работы. Разработанный графоаналитический метод назначения рабочих смен и выходных дней водителей при организации их работы секторальным методом, дающий возможность поднять эффективность использования ресурса рабочего времени водителей и снизить непродуктивные затраты, нашел применение при организации перевозок пассажиров МПТ в ряде городов Республики Беларусь.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Семченков, С.С. Снижение непродуктивных затрат маршрутного пассажирского транспорта секторальным методом / С.С. Семченков, Д.В. Капский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2022. – № 3. – С. 85–90.
2. Маршрутный транспорт городов Полоцка и Новополоцка: эффективность и тенденции развития / Д.В. Капский [и др.]. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2021. – 308 с.
3. Развитие городского транспорта в городах Полоцке и Новополоцке / Д.В. Капский [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – Новополоцк : ПГУ, 2020. — С. 85–97.
4. Семченков, С.С. Повышение эффективности работы маршрутного пассажирского транспорта применением секторального метода / С.С. Семченков, Д.В. Капский // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии : сб. науч. ст. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 170–185.
5. Иванов, В.П. Подготовка ремонтного производства / В.П. Иванов, А.П. Кастрюк. – Новополоцк : ПГУ, 2011. – 271 с.
6. Седюкевич, В.Н. Автомобильные перевозки грузов и пассажиров : учеб. пособие / В.Н. Седюкевич, А.Я. Андреев. – Минск : РИВШ, 2020. – 328 с.
7. Спирин, И.В. Городские автобусные перевозки / И.В. Спирин. – М. : Транспорт, 1991. – 238 с.
8. Спирин, И.В. Организация и управление пассажирскими автомобильными перевозками / И.В. Спирин. – М. : Акад., 2010. – 400 с.
9. Нагаева, И.Д. Организация и оплата труда на автомобильном транспорте / И.Д. Нагаева, И.М. Улицкая. – М. : Транспорт, 1989. – 208 с.
10. Дуднев, Д.И. Организация перевозок пассажиров автомобильным транспортом / Д.И. Дуднев, М.И. Климова, А.А. Менн. – М. : Транспорт, 1974. – 296 с.
11. Ефремов, И.С. Теория городских пассажирских перевозок / И.С. Ефремов, В.М. Кобозев, В.А. Юдин. – М. : Высш. шк., 1980. – 535 с.
12. Schneider, Lars. Betriebsplanung im öffentlichen Personennahverkehr Ziele, Methoden, Konzepte / Lars Schneider. – Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. – 193 с.

#### REFERENCES

1. Semchenkov, S.S. & Kapskiy, D.V. (2022). Snizheniye neproduktivnykh zatrat marshrutnogo passazhirskogo transporta sektoral'nym metodom [Reduction of unproductive costs of route passenger transport by the sectoral method]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universitetata. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnyye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Sciences], (3), 85–90. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Kapskiy, D.V., Golovnich, A.K., Vigerina, T.V., Kuz'menko, V.N., Krasil'nikova, A.S., Gorelik, Ye.N., ... Kot, Ye.N. (2021). *Marshrutnyy transport gorodov Polotska i Novopolotska: effektivnost' i tendentsii razvitiya* [Route transport of the cities of Polotsk and Novopolotsk: efficiency and development trends]. Novopolotsk: Polotskiy gosudarstvennyy universitet. (In Russ.).
3. Kapskiy, D.V., Golovnich, A.K., Vigerina, T.V., Kuz'menko, V.N., Krasil'nikova, A.S., Gorelik, Ye.N., ... Kot, Ye.N. (2020). *Razvitiye gorodskogo transporta v gorodakh Polotske i Novopolotske* [Development of urban transport in the cities of Polotsk and Novopolotsk]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universitetata. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnyye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Sciences], (11), 85–97. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Semchenkov, S.S. & Kapskiy, D.V. (2021). *Povysheniye effektivnosti raboty marshrutnogo passazhirskogo transporta primeneniym sektoral'nogo metoda* [Improving the efficiency of block passenger transport using the sectoral method]. *Transport i transportnyye sistemy: konstruirovaniye, ekspluatatsiya, tekhnologii* [Transport and transport systems: design, operation, technology] (170–185). Minsk: BNTU. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Ivanov, V.P. & Kastruyuk, A.P. (2011). *Podgotovka remontnogo proizvodstva* [Preparation of repair production]. Novopolotsk: Polotskiy gosudarstvennyy universitet. (In Russ.).
6. Sedyukevich, V.N. & Andreyev, A.YA. (2020). *Avtomobil'nyye perevozki грузов i passazhirov* [Automobile transportation of goods and passengers]. Minsk: RIVSH. (In Russ.).
7. Spirin, I.V. (1991). *Gorodskiy avtobusnyye perevozki* [City bus transportation]. Moscow: Transport. (In Russ.).

8. Spirin, I.V. (2010). *Organizatsiya i upravleniye passazhirskimi avtomobil'nymi perevozkami* [Organization and management of passenger road transport]. Moscow: Akademiya. (In Russ.).
9. Nagayeva, I.D. (1989). *Organizatsiya i oplata truda na avtomobil'nom transporte* [Organization and remuneration of labor in road transport]. Moscow: Transport. (In Russ.).
10. Dudnev, D.I., Klimova, M.I. & Menn, A.A. (1974). *Organizatsiya perevozok passazhirov avtomobil'nyim transportom* [Organization of transportation of passengers by road]. Moscow: Transport. (In Russ.).
11. Yefremov, I.S., Kobozev, V.M. & Yudin, V.A. (1980). *Teoriya gorodskikh passazhirskikh perevozok* [Theory of urban passenger transportation]. Moscow: Vysshaya shkola. (In Russ.).
12. Schneider, Lars. (2015). *Betriebsplanung im öffentlichen Personennahverkehr Ziele, Methoden, Konzepte*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. [In German].

Поступила 17.06.2022

**DEVELOPMENT OF RATIONAL WORK SCHEDULES  
FOR DRIVERS OF ROUTE PASSENGER TRANSPORT  
USING THE SECTORAL METHOD**

**S. SEMTCHENKOV, D. KAPSKY**

*In this article, the methods of developing rational work schedules for drivers of route passenger transport (RPT) and the choice of working modes of drivers, which allow to increase the efficiency of the mode of using working time, are considered. The graphoanalytic method presented in the article for assigning working shifts and days off for drivers when organizing their work by the sectoral method has made it possible to increase the efficiency of using the resource of drivers' working time, reduce unproductive costs and has found its application in organizing the transportation of RPT passengers in a number of cities of the Republic of Belarus.*

**Keywords:** *route passenger transport, rational work schedules of drivers, the mode of use of working time, unproductive costs, operational work, route vehicles, sectoral method, increase in work efficiency.*

УДК 856.12

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ  
НА РАБОТУ ОСТАНОВОЧНЫХ ПУНКТОВ  
НА МАГИСТРАЛЬНОЙ СЕТИ КРУПНЕЙШИХ СИМБИОТИЧЕСКИХ ГОРОДОВ**

*ЛЮ ЮЙВЭЙ, д-р техн. наук, доц. Д.В. КАПСКИЙ, канд. техн. наук, доц. С.В. СКИРКОВСКИЙ  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Рассмотрены результаты исследования влияния размещения остановочных пунктов, расположенных на магистральной улично-дорожной сети симбиотических крупнейших городов, на эффективность транспортной системы и условий движения маршрутного безрельсового пассажирского транспорта. Выявлены специфические закономерности при наличии остановочных пунктов маршрутного пассажирского транспорта на перегоне, в зоне перекрестков. Предложены формулы для определения времени стоянки маршрутных пассажирских транспортных средств на остановочных пунктах в зависимости от количества входящих и выходящих пассажиров. Проанализированы интенсивность движения и зависимость количества перестроений от интенсивности движения маршрутных транспортных средств.*

**Ключевые слова:** транспортная система, маршрутный пассажирский транспорт, остановочные пункты, условия движения, интенсивность движения, эффективность.

**Введение.** Современный симбиотический город является сложным, саморазвивающимся организмом, который постоянно пытается сделать свою транспортную систему более устойчивой<sup>1,2</sup> [1]. Это, как правило, достигается за счет разработки планов устойчивой городской мобильности, совершенствования работы маршрутного пассажирского транспорта и городской логистики, развития систем и средств индивидуальной мобильности, а также альтернативных (немоторизованных) видов транспорта (велосипедный, самокатный и пр.) и многих других аспектов [1–5]. Таким образом происходит трансформация транспортной системы и организации городского движения [2; 4; 6–9]<sup>2,3</sup>. Согласно докладу ООН, посвященному изучению перспектив урбанизации, к 2050 г. около 70% жителей нашей планеты будут проживать в городах. Это создает новые вызовы в вопросах планирования городского пространства и стратегий бизнес-сообщества в плане обслуживания конечных потребителей (распределение товаров в розничных точках и обеспечение интернет-продаж), обеспечения рабочей силой предприятий, планирования развития маршрутного пассажирского транспорта как со стороны исполкомов (муниципалитетов), так и как совокупности коммерческих услуг (такси, аренда транспортных средств, коммерческие маршруты). Согласно данным Всемирного Банка, именно города и мегаполисы генерируют 80% глобального ВВП и являются центрами экономического и социального взаимодействия. В связи с этим необходимо сделать транспортную систему более устойчивой, способной к дальнейшим вызовам развитию за счет эффективной системы маршрутного пассажирского транспорта, в которую входит подвижные единицы и инфраструктура (участки улиц и дорог, терминалы, пересадочные узловые станции с перехватывающими парковками, заездные карманы и остановочные пункты с их обустройством, и пр.). Однако в настоящее время мало внимания уделяется оптимизации размещения остановочных пунктов маршрутного пассажирского транспорта, особенно на магистральной улично-дорожной сети симбиотических городов, за счет которой можно снизить непродуктивные издержки (потери) дорожного движения (время простоя маршрутного пассажирского транспорта, задержки при выезде с заездного кармана, задержки перед стоп-линией при ожидании разрешающего сигнала при подъезде к остановочному пункту, перепроход пешеходов между остановочными пунктами (например, через перекресток) при неоптимальном размещении остановочных пунктов в зоне перекрестков и пр.).

**Методы исследования.** Исследования проводились с целью выявления поведения маршрутных пассажирских транспортных средств (МПТС) и основного транспортного потока в зоне остановочных пунктов (ОП) МПТС при расположении, указанном на рисунке 1 (при размещении ОП МПТС в кармане, без кармана, при наличии и отсутствии стоянки за ОП МПТС), а также при аналогичном расположении относительно СФО при другом типе пересечения или отсутствии перекрестка.

<sup>1</sup> Капский, Д.В. Градостроительные аспекты организации движения / Д.В. Капский, А.С. Луцкович // Перспективы развития транспортного комплекса : материалы IV Междунар. заоч. науч.-практ. конф. – 2018. – С. 90–95.

<sup>2</sup> Капский, Д.В. Некоторые вопросы дорожного движения: проблемы, подходы и правовые аспекты / Д.В. Капский // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния : материалы XXIV Междунар. (XXVII Екатеринбургской, II Минской) науч.-практ. конф., 2018. – С. 296–311.

<sup>3</sup> Капский, Д.В. Проблемы дорожного движения / Д.В. Капский, Ф.Г. Глик // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф. (68-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов БНТУ) : в 4 т. – 2015. – С. 234–235.

В ходе исследования было выбрано 23 ОП МПТ, по 4–5 каждого вида. Определялись геометрические параметры зоны ОП МПТ, фиксировалось время прибытия (убытия) МПТС к (от) ОП МПТ (относительно времени цикла СФО), интенсивность движения (ИД) по крайней правой полосе, количество перестроений в зоне ОП МПТ.

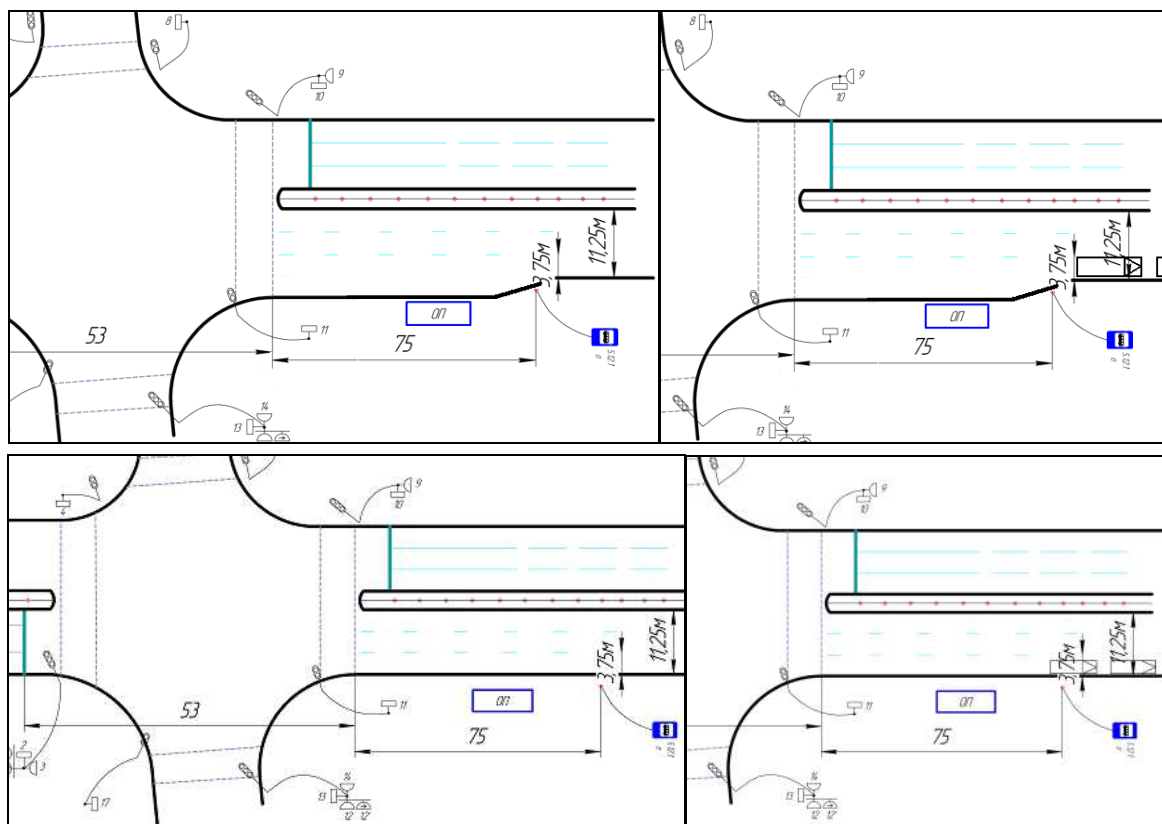


Рисунок 1. – Расположение исследуемых ОП МПТ

**Основная часть.** При исследовании времени прибытия (убытия) установлено, что при наличии кармана выезд МПТС из кармана 35% на ЗС и 65% начало движение МПТС на ЗС, при отсутствии кармана 45% на ЗС и 55% на КС. 40% МПТС прибывает на последнюю треть горения ЗС, 38% МПТС выезжает на последнюю треть горения ЗС (т.е. большая часть). Выезд МПТС из кармана при наличии стоянки за ОП МПТ происходит дольше, чем при отсутствии стоянки.

Проведенные исследования доказывают, что при расчете пропускной способности ОП МПТ нельзя опираться на ИД по крайней правой полосе. Во-первых, если есть стоянка перед ОП МПТ по ходу движения, МПТС перестраивается уже не в первую полосу, а во вторую. Во-вторых, при отсутствии кармана выезде МПТС из ОП МПТ вообще ничего не препятствует. В-третьих, при наличии кармана при любой интенсивности движения МПТС разница в ИД основного потока по крайней правой полосе будет различна, т.е. важно еще учитывать время суток, что усложняет исследования и расчеты. Если после ОП МПТ есть поворот МПТС налево, то оно перестраивается не в крайнюю правую полосу при выезде из кармана, а в ту, с которой разрешен поворот налево, т.е. в любом случае учитывать надо общую ИД по проезжей части. При маленьком интервале движения МПТС на ОП МПТ зачастую прибывает более одного МПТС. Длины кармана на практике часто не хватает, ввиду этого МПТС останавливаются в начале отгона уширения (рисунок 2), вследствие чего перекрывают частично крайнюю правую полосу движения.

На рисунке 3 показана зависимость ИД по крайней правой полосе от ИД в направлении движения при отсутствии стоянки и наличии кармана в зоне ОП МПТ. МПТС, останавливающиеся на ОП МПТ, не включались в состав потока. Доля ИД по крайней правой полосе при наличии кармана и отсутствии стоянки – 38% и 46% соответственно при наличии трех и двух полос на проезжей части или части дороги для движения в одном направлении.

На рисунке 4 показана зависимость ИД по крайней правой полосе от ИД в направлении движения при отсутствии кармана в зоне ОП МПТ. Доля ИД по крайней правой полосе при отсутствии кармана – 26% и 36% соответственно при наличии трех и двух полос на проезжей части или части дороги для движения в одном направлении. Количество исследуемых ОП МПТ ограничено, поэтому для построения графиков предварительно группировались по интенсивности движения МПТС.

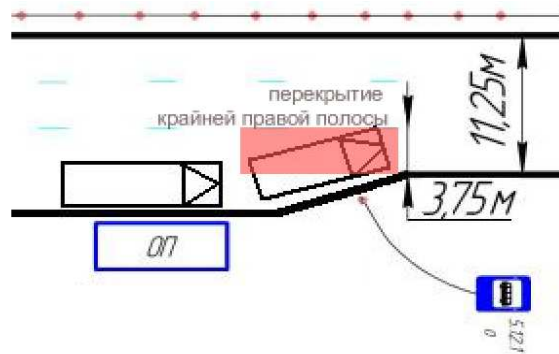


Рисунок 2. – Перекрытие крайней правой полосы МПТС

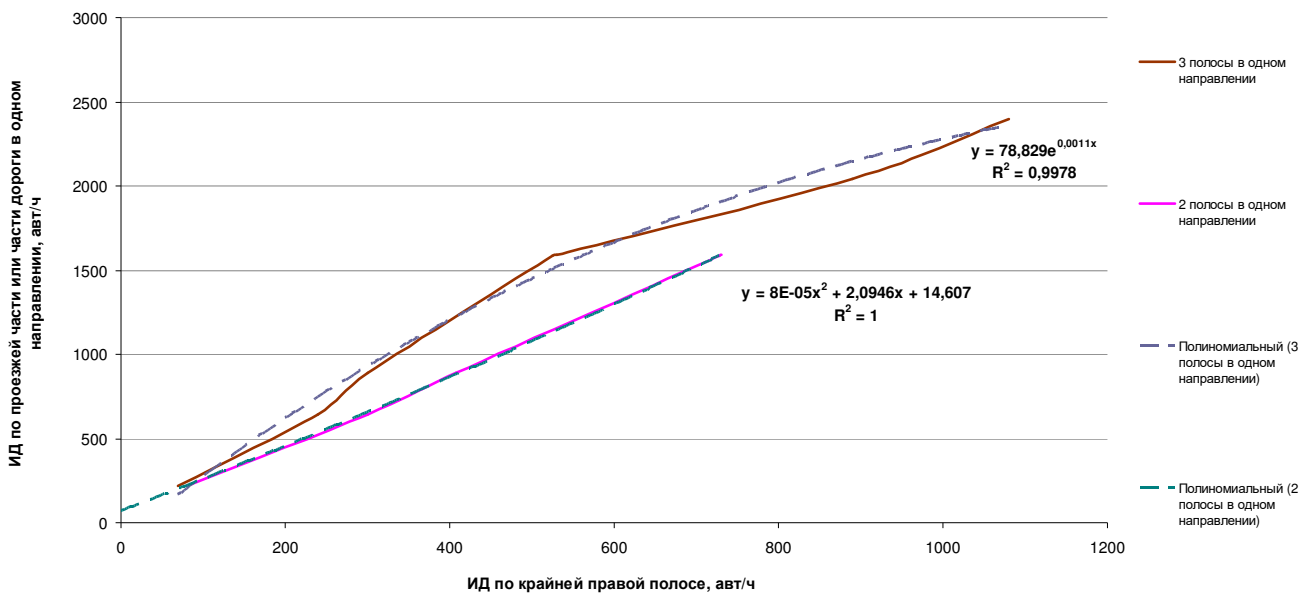


Рисунок 3. – Интенсивность движения по крайней правой в зоне ОП МПТС при отсутствии стоянки, наличии кармана шириной не менее 3 м (интенсивность движения МПТС – 42 п.е./ч)

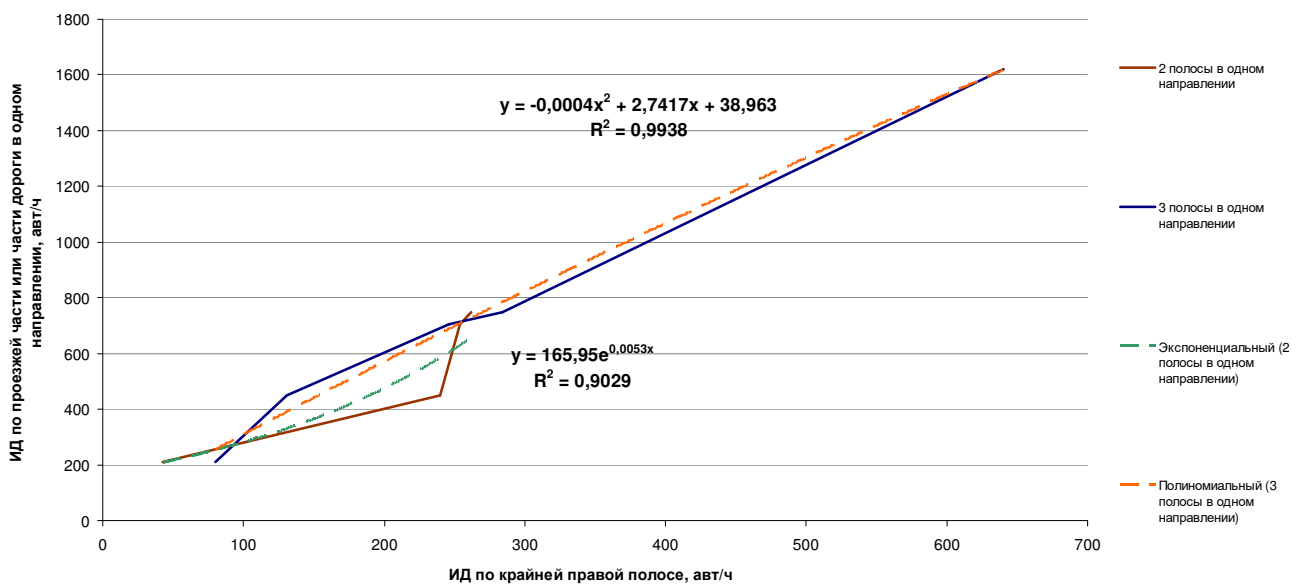


Рисунок 4. – Интенсивность движения по крайней правой при отсутствии кармана, (интенсивность движения МПТС – 23 п.е./ч)

Влияние интенсивности движения МПТС на интенсивность движения по крайней правой полосе показано на рисунках 5–7.

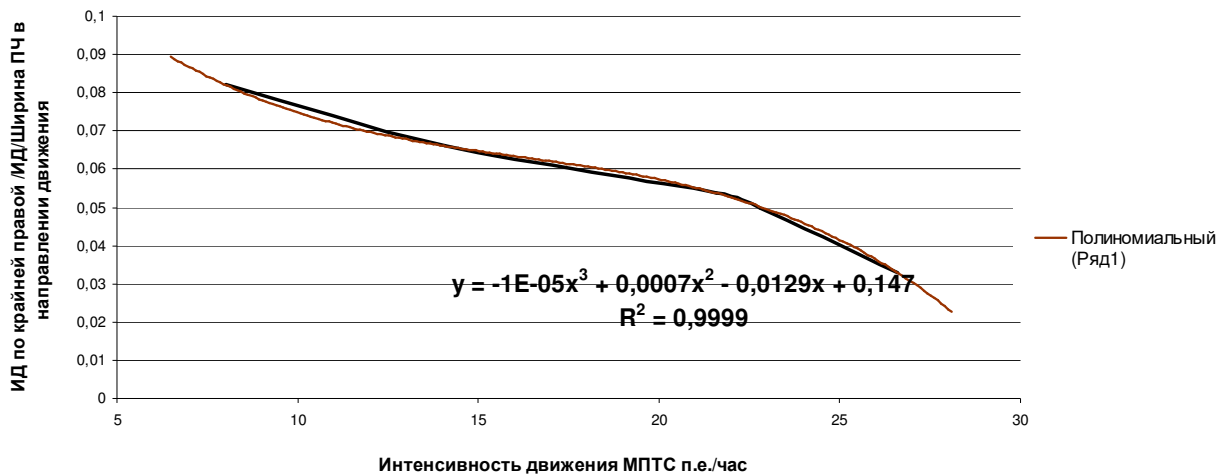


Рисунок 5. – Зависимость отношения ИД по крайней правой/ИД/ширина проезжей части в направлении движения от интенсивности движения МПТС при наличии кармана

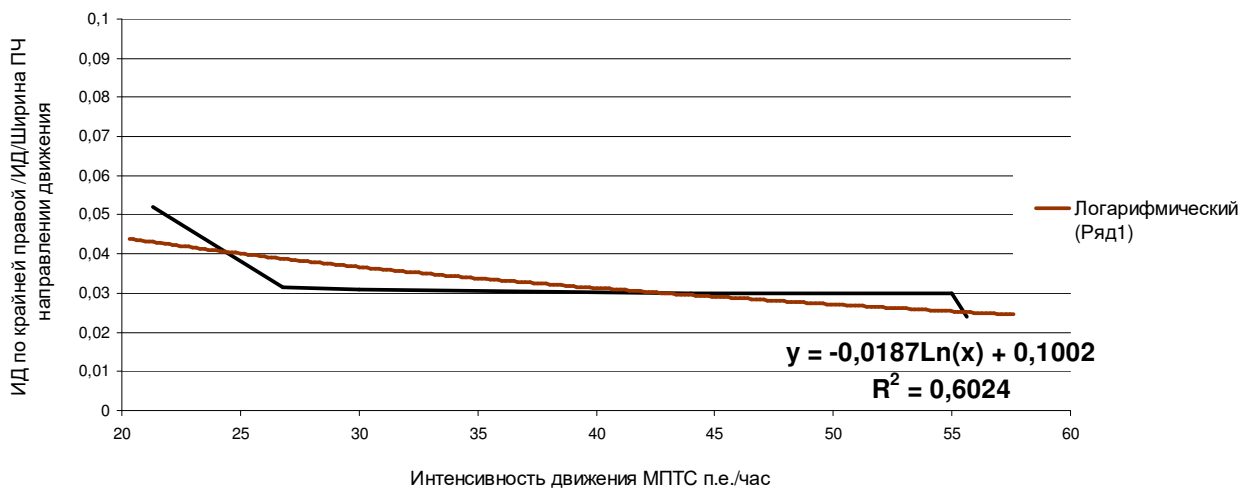


Рисунок 6. – Зависимость отношения ИД по крайней правой/ИД/ширина проезжей части в направлении движения от интенсивности движения МПТС при отсутствии кармана

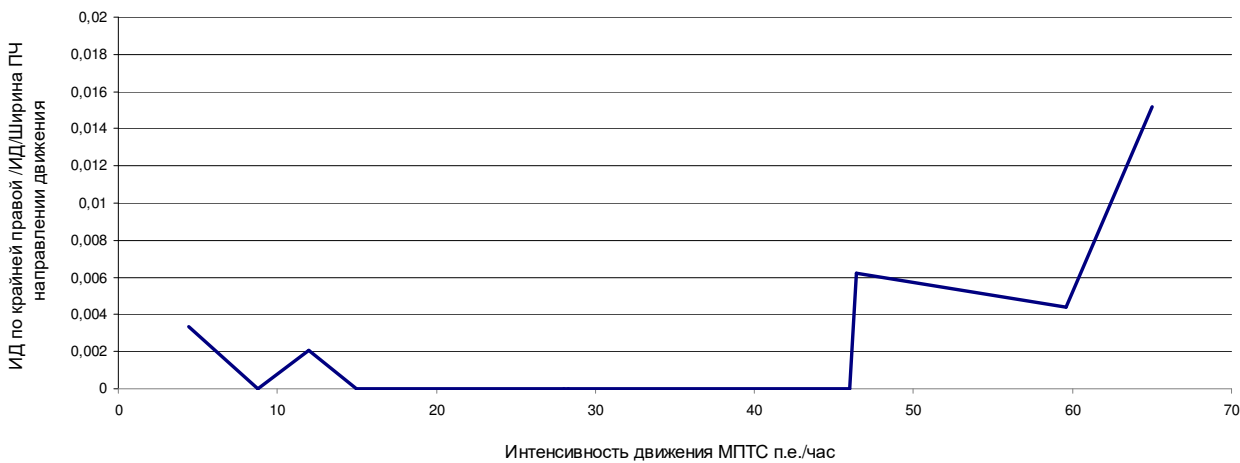


Рисунок 7. – Зависимость отношения ИД по крайней правой/ИД/ширина проезжей части в направлении движения от интенсивности движения МПТС при наличии стоянки



Как видно из рисунка 7, при наличии стоянки четкой зависимости нет, т.к. влияние оказывает еще и длина расположения припаркованных автомобилей на проезжей части. Кроме того, здесь нет разделения по наличию или отсутствию карманов. Видно, что при высокой интенсивности движения МПТС график идет вверх, это обусловлено именно наличием карманов при такой интенсивности.

Что касается перестроений, то в зоне ОП МПТ их можно разделить на следующие: при наличии кармана на выезде МПТС с ОП МПТ с первой и второй полосы; перестроения при недостаточной ширине кармана с первой полосы; перестроения при отсутствии кармана с первой полосы; при наличии стоянки за ОП МПТ при выезде МПТС. На рисунке 8 приведена зависимость доли перестроений (от общей ИД в данном направлении) при выезде из кармана от интенсивности движения МПТС. Здесь учитывались общая ИД, т.к. при выезде перестраивались не только с крайней правой, но и со второй полосы. Перестроения обусловлены именно выездом из кармана, а не другими причинами. Такие перестроения происходят в зоне ОП МПТ или за 10–20 м от остановившегося МПТС на ОП МПТ.

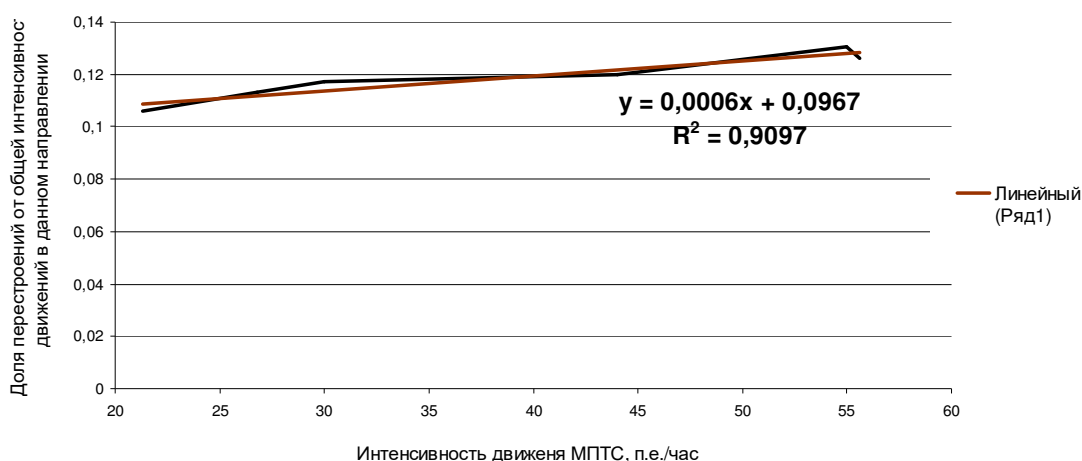


Рисунок 8. – Зависимость доли перестроений от ИД МПТС при выезде из кармана

На рисунке 9 показана зависимость доли перестроений от ИД по крайней правой полосе при отсутствии кармана или при наличии стоянки. Учитывались перестроения, совершаемые с крайней правой полосы при стоящем МПТС на ОП МПТ. В некоторых случаях перестроений при отсутствии кармана и наличии сплошной стоянки не было именно ввиду того, что интенсивность по крайнему правому ряду была равна нулю.

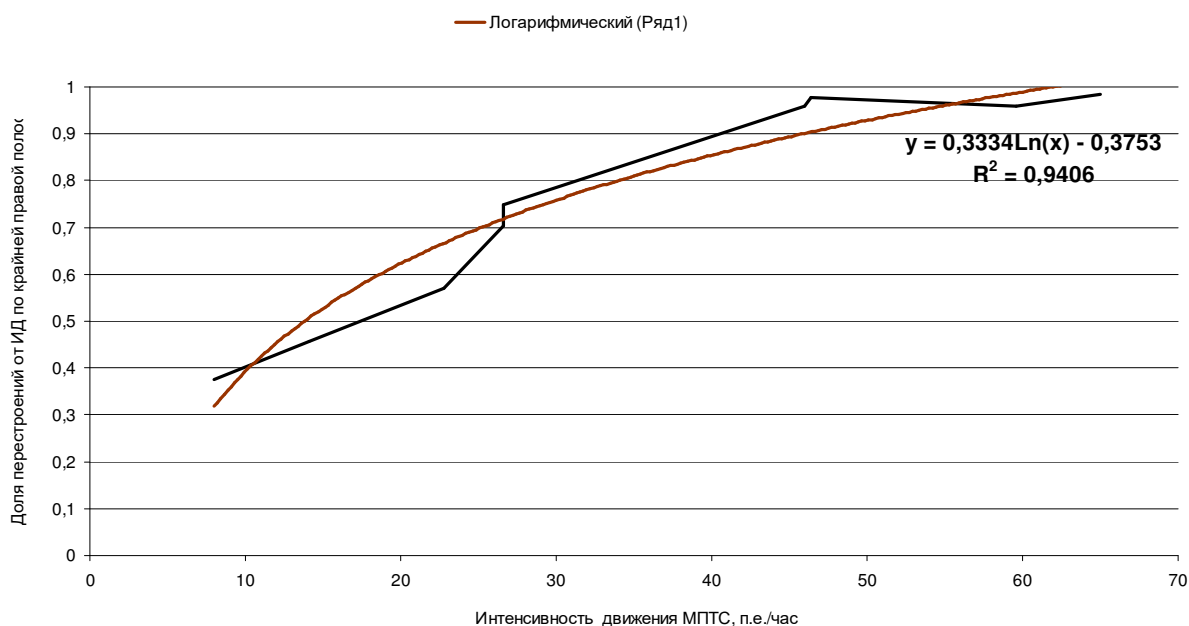


Рисунок 9. – Зависимость доли перестроений от ИД по крайней правой полосе при отсутствии кармана или при наличии стоянки

На рисунке 10 показано распределение перестроений по количеству и месту при отсутствии кармана или наличии стоянки перед карманом по ходу движения. Количество перестроений в зоне ОП МПТ и до 20 м от остановившегося МПТС существенно выше за счет входящего правоповоротного потока. Следует отметить, что в большинстве случаев в это время основному транспортному потоку горел КС, поэтому у входящего справа была возможность беспрепятственно перестраиваться в первую полосу при наличии кармана и во вторую полосу (через первую) при его отсутствии.

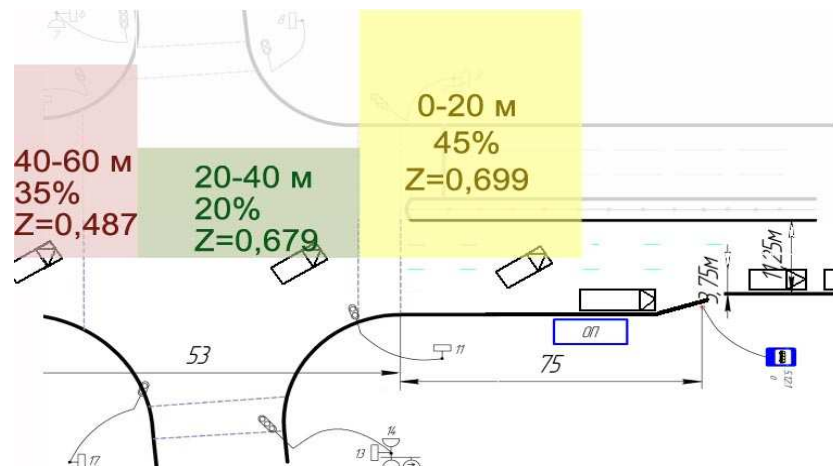


Рисунок 10. – Перестроения при отсутствии кармана или при наличии стоянки

**Заключение.** Установлено, что при наличии ОП МПТ на перегоне, при отсутствии кармана при ширине проезжей части 9 м и расстоянии между ОП МПТ 30 м и менее возникают проблемы при объезде МПТС на ОП МПТ. При интервале движения МПТС 3 мин и времени обслуживания 20 с вероятность одновременной стоянки двух МПТС на противоположных ОП МПТ равна 67%. Чтобы достичь интервала движения МПТС в 3 мин, необходимо всего лишь 4 маршрута с интервалом в 10 мин для каждого из них. Предложены формулы для вычисления времени стоянки МПТС в зависимости от количества входящих и выходящих пассажиров. В ходе выполнения исследования была определена однородность данных интервала движения по информационным таблицам и фактического интервала движения МПТС на ОП МПТ. Определены зависимости ИД по крайней правой полосе от ИД МПТС, количества перестроений от ИД МПТС.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Капский, Д.В. Обобщенные подходы к решению задач формирования сети городского пассажирского транспорта / Д.В. Капский // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 4(73). – С. 15–25.
- Скиркоцкий, С.В. Моделирование функционально-планировочной структуры города / С.В. Скиркоцкий, Д.В. Капский, Л.А. Лосин // Вест. Белорус. гос. ун-та транспорта. – 2021. – № 2(43). – С. 11–15.
- Семченков, С.С. Снижение непродуктивных затрат маршрутного пассажирского транспорта секторальным методом / С.С. Семченков, Д.В. Капский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2022. – № 3. – С. 85–90.
- Капский, Д.В. Транспортные передвижения для построения сети городского пассажирского транспорта и транспортной системы в целом / Д.В. Капский // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 1(74). – С. 17–30.
- Капский, Д.В. Методология повышения качества дорожного движения / Д.В. Капский. – Минск : БНТУ, 2018. – 370 с.
- Капский, Д.В. Повышение качества дорожного движения в очагах аварийности / Д.В. Капский // Наука и техника. – 2015. – № 3. – С. 36–43.
- Капский, Д.В. Методические аспекты проектирования транспортных объектов / Д.В. Капский, Р.Ю. Лагерева // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. – 2014. – № 7(90). – С. 78–85.
- Капский, Д.В. Исследование влияния светофорного объекта на функционирование ОП МПТ / Д.В. Капский, Т.Н. Самойлович // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 2(39). – С. 46–54.
- Капский, Д.В. Повышение безопасности дорожного движения на основе комплексного учета потерь / Д.В. Капский, А.И. Рябчинский // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2012. – № 5(77). – С. 37–40.

#### REFERENCES

- Kapский, D.V. (2021). Obobshchennyye podkhody k resheniyu zadach formirovaniya seti gorodskogo passa-zhirskogo transporta [Generalized approaches to solving problems of urban passenger transport network formation], *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta* [Bulletin of the Belarusian-Russian University], 4(73), 15–25. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Skirkovskiy, S.V. & Losin, L.A. (2021). Modelirovaniye funktsional'no-planirovochnoy struktury goroda [Modeling of the functional planning structure of the city]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta* [Bulletin of the Belarusian State University of Transport], 2(43), 11–15. (In Russ., abstr. in Engl.).

3. Semchenkov, S.S. & Kapskiy, D.V. (2022). Snizheniye neproduktivnykh zatrat marshrutnogo passazhirskogo transporta sektoral'nym metodom [Reduction of unproductive costs of route passenger transport by the sectoral method]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnyye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science], (3), 85–90. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Kapskiy, D.V. (2022). Transportnyye peredvizheniya dlya postroyeniya seti gorodskogo passazhirskogo transporta i transportnoy sistemy v tselom [Transport movements for building a network of urban passenger transport and the transport system as a whole]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta* [Bulletin of the Belarusian-Russian University], 1(74), 17–30. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Kapskiy, D.V. (2018). *Metodologiya povysheniya kachestva dorozhnogo dvizheniya* [Methodology for improving the quality of road traffic]. Minsk: BNTU. (In Russ.).
6. Kapskiy, D.V. (2015). Povysheniye kachestva dorozhnogo dvizheniya v ochagakh avariynosti [Improving the quality of traffic in the centers of accidents]. *Nauka i tekhnika* [Science and technology], (3), 36–43. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Kapskiy, D.V. & Lagerev, R.Yu. (2015). Metodicheskiye aspekty proyektirovaniya transportnykh ob'yektov [Methodological aspects of the design of transport facilities]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 7(90), 78–85. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Kapskiy, D.V. & Samoylovich, T.N. (2013). Issledovaniye vliyaniya svetofornogo ob'yekta na funktsionirovaniye OP MPT [Study of the influence of a traffic light object on the functioning of the OP MPT]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta* [Bulletin of the Belarusian-Russian University], 2(39), 46–54. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Kapskiy, D.V. & Ryabchinskiy, A.I. (2012). Povysheniye bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya na osnove kompleksnogo ucheta poter' [Improving road safety based on integrated loss accounting]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Brest State Technical University], 5(77), 37–40. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 17.06.2022

**INFLUENCE OF TRAFFIC ORGANIZATION CONDITIONS  
ON THE OPERATION OF STOPPING POINTS  
ON THE MAIN NETWORK OF THE LARGEST SYMBIOTIC CITIES**

**LIU YUWEI, D. KAPSKY, S. SKIRKOVSKY**

*The article discusses the results of a study of the influence of the location of stopping points and traffic conditions on the operation of routeless passenger transport and its stopping points located on the main street and road network of symbiotic largest cities and the impact on the efficiency of its transport system. Specific patterns were identified in the presence of stopping points of route passenger transport on the stretch, in the area of intersections, formulas were proposed for determining the time of parking of route passenger vehicles at stopping points depending on the number of incoming and outgoing passengers, studies of their traffic intensity, the number of rebuildings from traffic intensity were carried out. route vehicles.*

**Keywords:** transport system, route passenger transport, stopping points, traffic conditions, traffic intensity, efficiency.

УДК 621.431-044.3

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

**И.А. СЕРЕБРЯКОВ**

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Представлены результаты исследования типовой практики диагностирования двигателей автомобилей в условиях предприятий автомобильного транспорта и автосервиса. В практике обслуживания и ремонта автомобилей сформированы различные подходы к технологии диагностирования и соответствующая им документация. Установлено, что на дилерских предприятиях автосервиса наиболее широкое применение находит подход, использующий алгоритм диагностирования с выбором последующего шага на каждом действии. Для оценки эффективности диагностического алгоритма разработан показатель, основанный на средней трудоемкости диагностирования. Анализ эффективности применяемых технологий на примере автомобиля Lada Vesta показал, что порядок операций не является оптимальным и его варьирование может влиять на трудоемкость всего алгоритма. В результате проведенных исследований обоснована целесообразность разработки методов оптимизации алгоритмов диагностирования, обеспечивающих снижение трудозатрат вплоть до их минимизации.*

**Ключевые слова:** диагностирование, алгоритм поиска неисправности, диагностическая карта, граф алгоритма диагностирования, эффективность диагностирования, электронная система управления двигателем внутреннего сгорания.

**Введение.** В современной практике работы предприятий автомобильного транспорта и автосервиса поиск неисправности, как правило, начинается либо с жалобы водителя на работу автомобиля, со ссылкой на несоответствие определенных параметров работы норме (шум, потеря мощности и неравномерность работы двигателя, загорание контрольной лампы на приборной панели), либо при установлении этого же несоответствия при диагностических операциях во время инструментального контроля транспортных средств [1].

Диагностирование можно подразделить на две параллельно существующие составляющие: методы и алгоритмы диагностирования. Методы диагностирования задают технологию выполнения каждой отдельной операции. Для поиска неисправной системы двигателя и отказавшего элемента этой системы могут быть задействованы разные методы: визуальное, компьютерное, стендовое диагностирование и др. Алгоритм диагностирования, в свою очередь, определяет последовательность действий при осуществлении диагностирования<sup>1</sup>.

В связи с тем, что двигатели внутреннего сгорания современных легковых автомобилей являются технически сложными объектами, повышаются и требования к диагностированию, поскольку различным неисправностям этих двигателей могут соответствовать одинаковые или очень похожие симптомы. Это, в свою очередь, повышает требования к алгоритмам диагностирования – они должны обеспечивать быструю и точную локализацию места и выявление причин отказа.

Цель исследования состоит в анализе эффективности существующей практики диагностирования, выявлении неоптимальных мест с точки зрения технологии диагностирования и обосновании значимости дальнейших исследований в данном направлении.

**Основная часть.** *Виды представления диагностической информации.* Завод-изготовитель, его подразделения, другие организации прогнозируют жизненный цикл автомобиля<sup>2</sup>. Они разрабатывают документы, предусматривающие ремонт и диагностирование автомобиля в процессе эксплуатации. Предметом нашего рассмотрения являются алгоритмы выявления неисправностей, от которых может зависеть длительность и стоимость процесса диагностирования. Документация по диагностированию может быть представлена в следующем виде:

1. *Таблица соответствия.* Представляет собой перечень симптомов, в описании каждого из которых приводятся возможные для него неисправности. Данный способ представления диагностической информации подразумевает проверку вариантов в произвольном порядке и положительно зарекомендовал себя, когда каждая неисправность обусловлена своими уникальными симптомами либо же каждому симптому соответствует одна неисправность. Если же симптом присущ большому числу возможных неисправностей (например, «двигатель неустойчиво работает»), применять его неэффективно.

<sup>1</sup> Техническая диагностика. Термины и определения: ГОСТ 20911-89. – Взамен ГОСТ 20911-75; введ. РБ 01.01.91. – М. : Гос. ком-т по управлению качеством продукции и стандартам, 1989. – 10 с.

<sup>2</sup> Dealer Management System - Porsche Informatik [Электронный ресурс] / Volkswagen A.G. – Режим доступа: <https://www.porscheinformatik.com/loesungen-und-services/loesungen/dealer-management-system/>. – Дата доступа: 14.06.2022.

2. *Безусловный алгоритм.* Представляет собой перечень действий, по завершению которого диагност должен обнаружить неисправность. Данный способ подразумевает фиксированную последовательность проверок. По факту, это является неким обходом возможных вариантов (безусловный алгоритм диагностирования с безусловной остановкой [2]).

3. *Алгоритм с выбором последующего действия.* В данном случае результат каждого проверочного действия обуславливает выбор следующей проверочной операции. Таким образом, траектория поиска неисправности состоит из нескольких последовательных действий, суммарная трудоемкость которых значительно меньше полного набора операций. Такой алгоритм потенциально позволяет получить результат при минимуме действий.

*Алгоритмы диагностирования и диагностические карты.* Наиболее широкое распространение в современной практике диагностирования получают условные алгоритмы, которые, как правило, представляются в виде диагностических карт. Их содержание задает порядок операций и правила условных переходов между операциями в зависимости от результата, полученного на предыдущем шаге. Предметом нашего исследования является определение реальных стоимостных характеристик существующих диагностических карт и оценка возможности их оптимизации с целью снижения затрат.

Рассмотрим заводские диагностические карты на практическом примере документации АО «АвтоВАЗ»<sup>3</sup> для нашедшего широкое применение двигателя ВАЗ 21129, устанавливаемого на автомобили марки Lada моделей Vesta, XRay, Largus, Granta.

На рисунке 1 представлена диагностическая карта, используемая при возникновении кода неисправности электронной системы управления двигателем, соответствующего некорректному сигналу от датчика температуры охлаждающей жидкости, для автомобиля Lada Vesta.

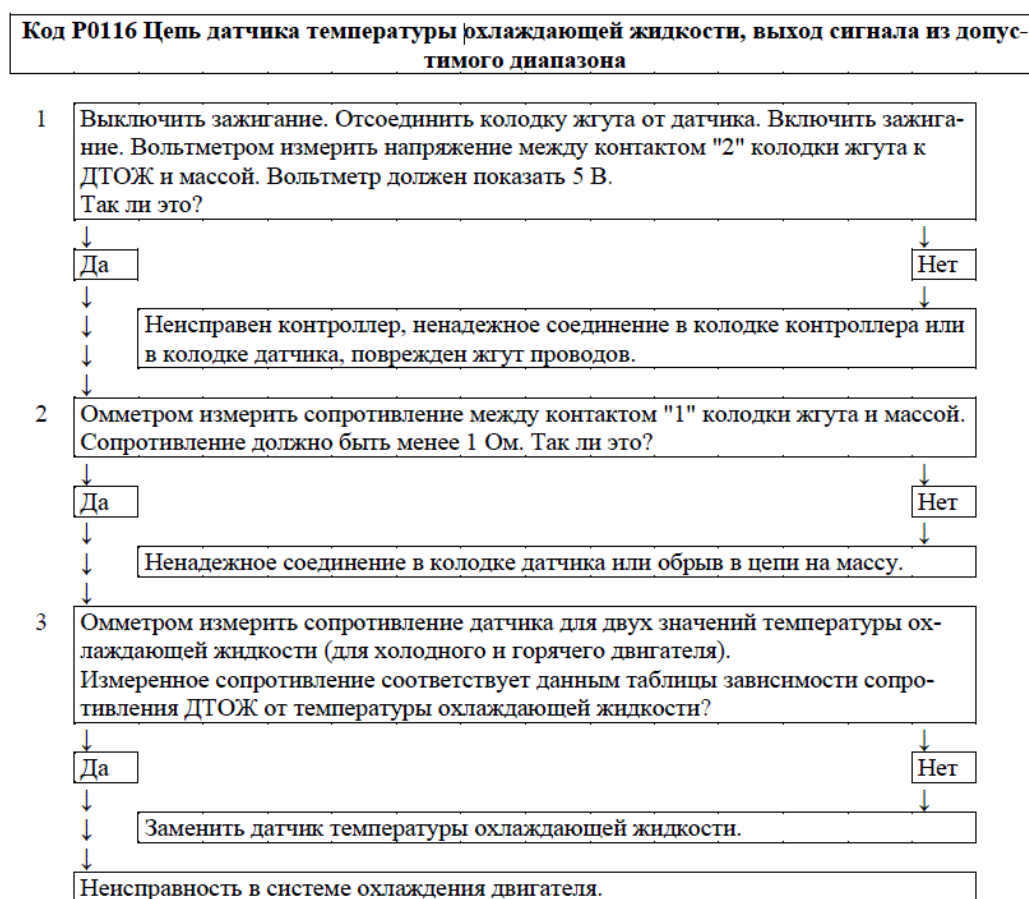


Рисунок 1. – Диагностическая карта проверки электрической цепи датчика температуры охлаждающей жидкости

<sup>3</sup> Электронная система управления двигателем 21129 автомобилей семейства Lada Vesta с контроллером M86 Евро-5 – устройство и диагностика [Электронный ресурс] / АО «АвтоВАЗ». – Режим доступа: [https://zinref.ru/avtomobili/VAZ/001\\_00\\_lada\\_vesta\\_rukovodstvo/138.htm](https://zinref.ru/avtomobili/VAZ/001_00_lada_vesta_rukovodstvo/138.htm). – Дата доступа: 30.05.2022.

Согласно рисунку, карта содержит следующие элементы: действия (графически обозначены прямоугольниками), переходы между действиями (стрелки). В прямоугольники также заключены логические операторы (да/нет). Работа с картой подразумевает выбор следующей операции в зависимости от результатов проверки на предыдущем шаге. В общем случае карта может содержать безальтернативные переходы. Кроме того, прямоугольниками обозначены конечные точки проверок (их называют исходами).

Основные недостатки диагностических карт такого типа:

- одинаковое графическое обозначение действий (решающих, промежуточных, безальтернативных) затрудняет восприятие информации;
- неоднозначность осуществления диагностических проверок в силу того, что одна операция может содержать несколько действий.

*Анализ эффективности диагностической карты.* Для оценки эффективности представленной карты необходимо ввести некоторую численную величину, характеризующую эффективность. Исходя из сложившейся практики, в этой роли целесообразнее всего использовать трудоемкость диагностирования. Это обусловлено тем, что завод-изготовитель автомобиля, как правило, предоставляет своей дилерской сети полный перечень нормативов трудоемкости на выполнение всех необходимых операций при техническом обслуживании, ремонте и диагностировании автомобиля. Стоимость диагностирования является объективной величиной, характеризующей процесс диагностирования, но менее пригодна для оценки алгоритма по причине постоянного изменения как себестоимости диагностирования в связи с постоянным изменением цен на широкий перечень ее составляющих, так и стоимости нормо-часа для клиента автосервиса.

Имеющийся вид диагностической карты не позволит объективно оценить ее эффективность в первую очередь по причине того, что в большинстве диагностических карт проверочные операции не являются элементарными проверками [3]. Это означает, что внутри элементов структуры карты (исходов, операций) содержатся проверочные действия, каждое из которых необходимо выделять как отдельное. Например, в диагностической карте (см. рисунок 1), в первом исходе (проистекает из первой операции по логической ветви «нет») содержится целый перечень неисправностей (неисправен контроллер, ненадежное соединение проводов, неисправен жгут проводки), и какая конкретно окажется истинной в определенном случае, необходимо будет установить. Кроме того, целесообразно графически разделить проверочные операции и исходы между собой.

Для удобства восприятия и анализа диагностической карты и последующего расчета стоимости диагностирования ее предлагается представить в следующем виде (рисунок 2).

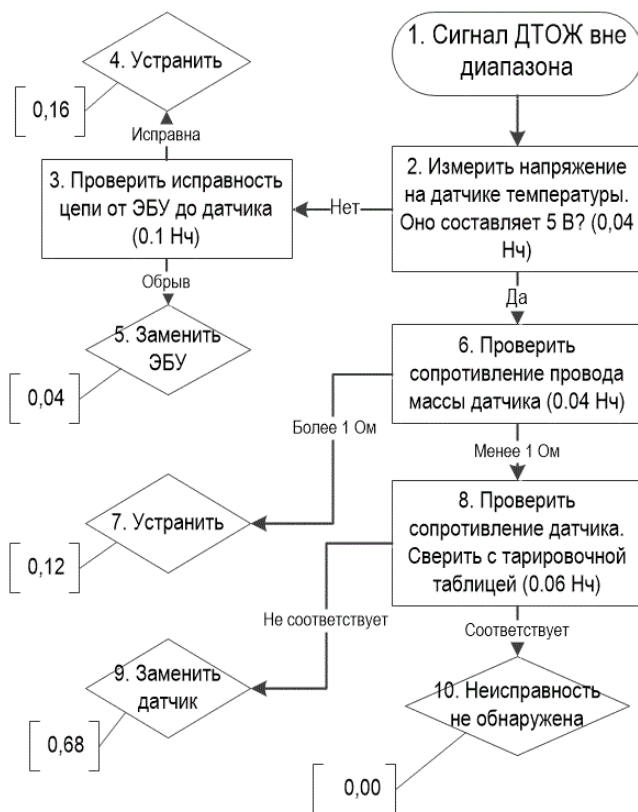


Рисунок 2. – Расширенный граф диагностической карты проверки электрической цепи датчика температуры охлаждающей жидкости

Следует констатировать, что данный вид обладает свойствами графа [4], а также некоторым дополнительными свойствами, которые будут описаны далее. Назовем его расширенным графом.

Расширенный граф построен следующим образом: начало алгоритма (оно же его заглавие) обозначено овалом. Переходы (связи между элементами) обозначены стрелками, причем стрелки включают в себя логическую сущность (да/нет и т.п.). Проверочные действия обозначены прямоугольниками. В скобках после наименования каждой отдельно взятой проверки указана ее трудоемкость. Проверочные действия имеют логический выбор – выходящие из них стрелки. Алгоритм выполнен в виде дихотомического дерева, т.е. любая из вершин имеет не более 2-х исходов [4]. Исходы (диагнозы, причины неисправности) обозначены ромбами. Они характеризуются вероятностью (вынесена за пределы ромба в квадратных скобках). Все узлы алгоритма имеют цифровой индекс, который указан перед началом описания каждого узла.

Принятые величины трудоемкости и вероятности, характеризующие узлы и исходы, такие как стоимость и вероятность соответственно, базируются на реальной практике предприятия автосервиса Минск-Лада. Вероятности различных отказов были получены анализом статистических данных на основе заказ-нарядов на диагностирование автомобилей. Помимо этого, для ранжирования вероятностей редко возникающих отказов использовался метод экспертных оценок. Вероятность 0.00 у исхода с индексом 10 (см. рисунок 2) означает, что этот исход в данном конкретном случае не является статистически значимым. Трудоемкость взята из перечня операций по ремонту и диагностированию автомобилей, разработанного АО «АвтоВАЗ».

*Расчет эффективности алгоритма диагностирования.* После проведенных манипуляций карта становится пригодной для дальнейшего анализа. Следует обратить внимание на следующие особенности диагностического графа:

- исходами являются все «висячие» узлы графа, т.е. не имеющие исходящих связей;
- каждый исход связан с началом диагностирования однозначной траекторией, содержащей все родительские элементы по восходящей линии.

В качестве показателя, характеризующего эффективность карты, примем среднюю трудоемкость диагностирования (далее – СТД), единицей измерения которой является норма-час (н-ч). Процесс появления неисправностей и обращения в организации автосервиса является стохастическим, поэтому оценкой величины является ее математическое ожидание, которое вычисляется как сумма математического ожидания затрат по каждому исходу<sup>4</sup>. Затраты по исходу оцениваются как произведение вероятности исхода на трудоемкость всех операций, принадлежащих к траектории, связывающей исход с началом алгоритма. СТД будет рассчитываться по формуле

$$СТД = \sum_{i=1}^n \left( P_i \sum_{j=1}^i S_j \right), \text{ н-ч}, \quad (1)$$

- где  $i$  – индексы, относящиеся к исходам;  
 $j$  – индексы всех родительских элементов  $i$ -го исхода;  
 $P_i$  – вероятность  $i$ -го исхода;  
 $S_j$  – трудоемкость диагностирования  $j$ -й операции;  
 $n$  – количество исходов.

Проведем расчет СТД для диагностического алгоритма проверки электрической цепи датчика температуры охлаждающей жидкости по формуле (1):

$$СТД = P_4 (S_3 + S_2) + P_5 (S_3 + S_2) + P_7 (S_6 + S_2) + P_9 (S_8 + S_6 + S_2) + P_{10} (S_8 + S_6 + S_2) = 0,133 \text{ н-ч}.$$

Для удобства восприятия и расчета в формуле (1) индексы трудоемкостей и вероятностей соответствуют индексам операций, к которым они относятся. В результате полученная средняя трудоемкость диагностирования для первоначальной структуры диагностической карты составила 0,133 н-ч. Изменим структуру карты, поменяв местами операцию с индексом 8 на операцию с индексом 2 с соответствующими им исходами. Получим алгоритм, соответствующий первоначальному по полноте диагностирования, однако иной с точки зрения математического ожидания трудоемкости [5]. Новая структура алгоритма представлена на рисунке 3. Принятый граф алгоритма диагностирования назван модернизированным.

Проведем расчет СТД для модернизированного графа алгоритма, представленного на рис. 3, по формуле (1):

$$СТД = P_9 \cdot S_8 + P_7 (S_8 + S_6) + P_5 (S_3 + S_2) + P_4 (S_8 + S_6 + S_2 + S_3) + \\ + P_4 (S_8 + S_6 + S_2 + S_3) + P_{10} (S_8 + S_6 + S_2) = 0,1 \text{ н.-ч.}$$

<sup>4</sup> Танкович, В.С. Разработка оптимального алгоритма диагностирования дизельного двигателя в условиях автотранспортных предприятий : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.22.10 / В.С. Танкович ; Харьков. автомоб.-дорож. ин-т. – Харьков, 1987. – 18 с.

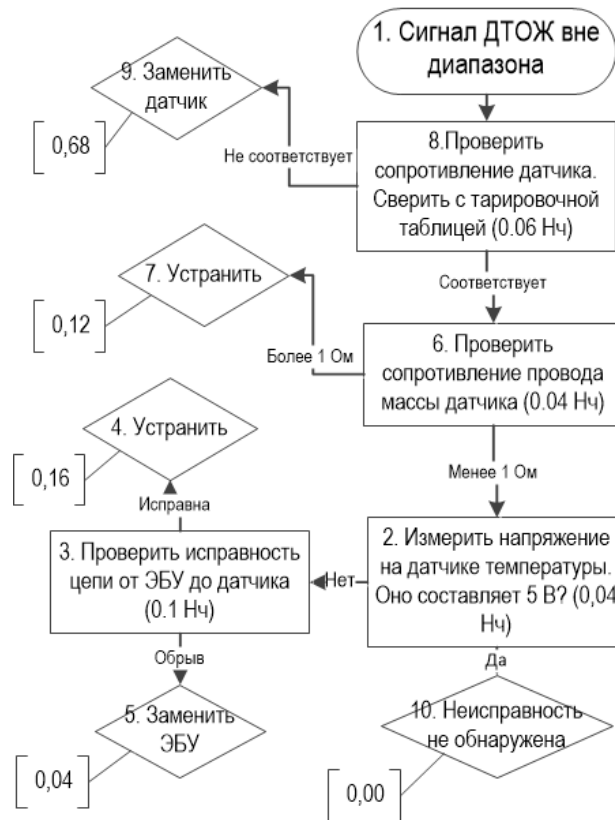


Рисунок 3. – Модернизированный расширенный граф диагностической карты проверки электрической цепи датчика температуры охлаждающей жидкости

Полученный результат означает, что, изменив структуру диагностической карты, т.е. сохранив ее полноту и свойства входящих в нее элементов, но изменив связи между ними и, как следствие, порядок проводимого диагностирования, удалось добиться снижения трудоемкости диагностирования с 0,133 н-ч до 0,101 н-ч, или на 24,8%. Стоит также отметить, что указанное снижение касается лишь отдельно взятого процесса поиска неисправности<sup>5</sup>. В перечень работ, включаемых в заказ-наряд на диагностирование автомобиля, помимо непосредственно поиска неисправности, входит также ряд обязательных к исполнению операций, которые на данный момент не подвержены оптимизации.

Показанный пример демонстрирует, что используемые алгоритмы диагностирования не всегда являются оптимальными [6]. Автор выдвигает предположение о необходимости разработки, по возможности, простого и наглядного метода оптимизации структуры алгоритмов диагностирования силовых установок автомобилей.

**Заключение.** На основе проведенных исследований сделано заключение о перспективности и целесообразности разработки методов оптимизации диагностических алгоритмов, обеспечивающих минимизацию общих трудозатрат диагностирования и обладающих возможностью как можно более простого и быстрого внедрения в практику предприятий автосервиса. Разрабатываемые методы должны учитывать соотношение вероятностей возможных неисправностей и трудоемкости операций по их выявлению. Данные о фактических распределениях вероятностей исходов и трудоемкостей операций должны быть получены на основе статистического анализа практических данных работы предприятий автосервиса [7].

**Выводы.** 1. В существующей практике диагностирования двигателей внутреннего сгорания автомобилей наиболее распространены условные алгоритмы поиска неисправностей, которые в практической реализации приобретают форму диагностических карт.

2. Для целей анализа эффективности диагностическая карта была преобразована к виду расширенного дихотомического графа, в котором узлы, представляющие собой выполняемые операции и возможные исходы, содержат дополнительную информацию о вероятностях событий и трудоемкости операций.

<sup>5</sup> Серебряков, И.А. Совершенствование процесса диагностирования силовых установок автомобилей / И.А. Серебряков // Сб. материалов IX форума вузов инженер.-технол. профиля Союз. государства. / Белорус. нац. техн. ун-т ; ред.: С.В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2020. – С. 70–71.



3. На примере диагностической карты проверки датчика топлива показано, что алгоритм диагностирования не является оптимальным, а модификация расширенного графа, направленная на снижение уровня трудоемкости, позволила снизить математическое ожидание с 0,133 н-ч до 0,100 н-ч, или на 24,8%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Савич, Е.Л. Инструментальный контроль автотранспортных средств : учеб. пособие / Е.Л. Савич, А.С. Кручек. – Минск : Новое знание, 2008. – 399 с.
2. Пархоменко, П.П. Основы технической диагностики : в 2 кн. / П.П. Пархоменко, Е.С. Согомонян ; под ред. П.П. Пархоменко. – М. : Энергия, 1981. – Кн. 2 : Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства. – 320 с.
3. Бахвалов, С.В. Анализ оптимальных алгоритмов технического диагностирования / С.В. Бахвалов, А.М. Дунаев // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. – 2016. – № 7. – С. 55–59.
4. Казимиров, Н.И. Архетипы математики: общие методы, приемы, конструкции, идеи математики и ее оснований / Н.И. Казимиров. – М. : Юстицинформ, 2019. – 612 с.
5. Ефанов, Д.В. Построение оптимальных алгоритмов поиска неисправностей в технических объектах : учеб. пособие / Д.В. Ефанов. – СПб. : ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2014. – 49 с.
6. Аржененко, А.Ю. Оптимальные бинарные вопросники / А.Ю. Аржененко, Б.Н. Чугаев. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.
7. Мириленко, А.П. Сравнительный анализ эффективности оптимизированных алгоритмов диагностирования двигателей автомобилей / А.П. Мириленко, И.А. Серебряков // Изобретатель. – 2022. – № 1–2 (246–247). – С. 25–30.

## REFERENCES

1. Savich, Ye.L. & Kruchek, A.S. (2008). *Instrumental'nyy kontrol' avtotransportnykh sredstv [Instrumental control of vehicles]*. Minsk: Novoye znaniye. (In Russ.).
2. Parkhomenko, P.P. & Sogomonyan Ye.S. (1981). *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki. Kn. 2. Optimizatsiya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnyye sredstva [Fundamentals of technical diagnostics. Book 2. Optimization of diagnostic algorithms, hardware]*. Moscow: Energiya. (In Russ.).
3. Bakhvalov, S.V. & Dunayev, A.M. (2016). Analiz optimal'nykh algoritmov tekhnicheskogo diagnostirovaniya [Analysis of optimal algorithms for technical diagnostics]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Irkutsk State Technical University]*, (7), 55–59. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Kazimirov, N.I. (2019). *Arkhetipy matematiki: obshchiye metody, priyemy, konstruksii, idei matematiki i yeye osnovaniy [Archetypes of mathematics: general methods, techniques, constructions, ideas of mathematics and its foundations]*. Moscow: Yustitsinform. (In Russ.).
5. Efanov, D.V. (2014). *Postroyeniye optimal'nykh algoritmov poiska neispravnostey v tekhnicheskikh ob'yektakh [Construction of optimal algorithms for troubleshooting in technical objects]*. St. Petersburg: FGBOU VPO PGUPS (In Russ.).
6. Arzhenenko, A.Yu. & Chugayev, B.N. (1989). *Optimal'nyye binarnyye voprosniki [Optimal binary questionnaires]*. Moscow: Energo-atomizdat. (In Russ.).
7. Mirilenko, A.P. & Serebryakov, A.P. (2022). *Sravnitel'nyy analiz effektivnosti optimizirovannykh algoritmov diagnostirovaniya dvigateley avtomobiley [Comparative analysis of the effectiveness of optimized algorithms for diagnosing car engines]*. *Izobretatel' [Inventor]*, 1–2(246–247), 25–30. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 04.07.2022

## ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF ALGORITHMS FOR DIAGNOSING INTERNAL COMBUSTION ENGINES OF A CARS

I. SEREBRYAKOV

*The article presents the results of a study of the typical practice of car engines diagnosing in the conditions of different car services. In the practice of car maintenance and repair are formed various approaches to diagnostic technology and the corresponding documentation. Established that the most widely used approach at car service dealerships is the approach that uses the diagnostic algorithm with the choice of the next step for each action. To assess the effectiveness of the diagnostic algorithm, an indicator based on the average complexity of diagnosing has been developed. An analysis of the effectiveness of the technologies used on the example of the Lada Vesta. Showed that the order of operations is not optimal and its variation can affect the complexity of the entire algorithm. The research results that the expediency of developing methods for optimizing diagnostic algorithms that ensure a reduction in labor costs up to their minimization.*

**Keywords:** diagnostics, troubleshooting algorithm, diagnostic map, diagnostic algorithm graph, diagnostic efficiency, electronic control system for internal combustion engine.

УДК 656.13; 656.051

**РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ  
ПО СНИЖЕНИЮ АВАРИЙНОСТИ В ПОПУТНОМ ТРАНСПОРТНОМ ПОТОКЕ****д-р техн. наук, доц. Д.В. КАПСКИЙ***(Белорусский национальный технический университет, Минск),***Д.П. ХОДОСКИН***(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)*

Дорожно-транспортные происшествия (ДТП) с материальным ущербом составляют более 90% от их общего количества, причем суммарные потери от них превышают потери от дорожно-транспортных происшествий с пострадавшими, по экспертным оценкам, практически в 3 раза и продолжают возрастать. Анализ публикаций белорусских, а также ученых стран СНГ (Б.Е. Боровский, В.И. Васильев, А.В. Ноздричев и др.) показывает, что данному направлению внимание уделено недостаточно, по большей мере в контексте решения других задач организации дорожного движения. Зарубежные ученые (G.L. Chang, H. Chen, M.M. Abbas, A.Al-Mudhaffar, Д. Гейзис, Р. Херман и др.) хотя и рассматривали исследуемую проблему как самостоятельную, однако в их работах также отсутствует детальная ее проработка, которая может быть применена к современным условиям Республики Беларусь. В данной статье приведены положения по новым теоретико-методическим основам определения зоны дилеммы (и ее типов), механизма конфликтного взаимодействия лидирующего и ведомого автомобилей при приближении к РПК, новой методики определения зоны дилеммы и практических рекомендаций по нейтрализации действия ее зоны и снижения уровня аварийности в попутном транспортном потоке.

**Ключевые слова:** попутный транспортный поток, зона дилеммы, аварийность, конфликтная зона, регулируемый перекресток.

**Введение.** В нашей стране среди общего количества ДТП, произошедших на регулируемых перекрестках (РПК) подавляющее большинство, принадлежит дорожно-транспортным происшествиям (ДТП) в попутном транспортном потоке (ТП), а именно – столкновениям с ударом сзади и попутным столкновениям (60–70% в Республике Беларусь, по данным зарубежной статистики аварийности – 35–60% ежегодно). Чаще всего такие ДТП происходят в попутном ТП на подходах к РПК и преимущественно при экстренном торможении лидирующего автомобиля. Причиной экстренного торможения в большинстве ситуаций является нахождение водителей в так называемой зоне дилеммы, которая возникает при смене разрешающего сигнала светофора.

**Основная часть.** В отечественных источниках<sup>1</sup> [1] зоной дилеммы называется отрезок дороги, попадая на который, водитель должен сделать выбор – либо ускориться и проехать перекресток, либо резко затормозить и остановиться перед стоп-линией. В первом случае высока вероятность ДТП с потоком, начинающим движение, во втором – ДТП в попутном потоке (столкновение с ударом сзади или попутное столкновение).

В работах [2; 3] делается вывод о необходимости выделения отдельных типов и даже подтипов зоны дилеммы. Таким образом, выделены:

– инертная зона дилеммы – при нахождении в ней водитель не может ни безопасно остановиться (с необходимостью применения аварийного замедления и с выездом за стоп-линию), ни безопасно пересечь перекресток (что с высокой вероятностью может привести к межфазным столкновениям);

– активная зона дилеммы – при нахождении в ней водитель может выбрать из двух вариантов – продолжить движение через перекресток либо остановиться перед стоп-линией, с разделением данной зоны согласно применяемой величине замедления на два подтипа:

- с замедлением больше служебного (определенного экспериментальными исследованиями и равного  $3,28 \text{ м/с}^2$  [3]), что с учетом улучшающихся за последние 20 лет состояния дорожного покрытия и тормозных качеств автомобилей более соответствует действительности, чем значения, указанные в источниках<sup>1</sup> [1], равного  $2 \text{ м/с}^2$ ) и меньше аварийного либо равного ему, что с высокой вероятностью может привести к созданию очагов столкновений с ударом сзади и попутных столкновений;

- с замедлением меньше служебного или равного ему, что не создаст очагов аварийности по причине плановости выполнения маневра.

Новые теоретико-методические основы определения зоны дилеммы базируются на определении ее местоположения и типа с помощью трех расстояний:  $S_{\min}$  – минимальное расстояние до полной остановки у стоп-линии (при загорающемся ЖС) при использовании служебного замедления;  $S_{\min.c}$  – минимальное расстояние до полной остановки у стоп-линии (при загорающемся ЖС) при использовании аварийного замедления;  $S_{\max}$  – максимальное расстояние до стоп-линии, при котором автомобиль может проехать перекресток в течение действия переходного интервала.

<sup>1</sup> Капский, Д. В. Совершенствование метода прогнозирования аварийности на регулируемых перекрестках для повышения безопасности дорожного движения : дис. ...канд. техн. наук : 05.22.10 / Д.В. Капский. – Минск, 2003. – 132 л.

Эта теория связана со следующими причинами: во-первых, не все автомобили, находящиеся в зоне дилеммы (при решении проезда), могут успеть проехать перекресток в течение действия переходного интервала (исходя из положений отечественного подхода<sup>2</sup> [1]), что приводит к столкновениям с потоком, начинающим движение, или наездам на пешеходов на удаленном пешеходном переходе (для которых загорается ЗС); во-вторых, на РПК вероятность столкновений в попутном ТП в значительной мере зависит от параметров светофорного регулирования – времени оповещения о смене сигнала светофора и величины переходного интервала ( $S_{max}$  – это и есть расстояние, характеризующее последний интервал). Варьируя данными расстояниями, можно определить местоположение, тип и подтип зоны дилеммы. Причем расстояния  $S_{min}$  и  $S_{min,c}$  не меняют своего положения по отношению друг к другу (т.к.  $S_{min}$  будет всегда находиться ближе к стоп-линии, чем  $S_{min,c}$ ). Меняет свое положение относительно остальных только расстояние  $S_{max}$ , т.к. оно зависит в т.ч. и от параметров светофорного регулирования и расстояния до конфликтной точки. Теоретически в методике возможно пять случаев [2–4], наиболее опасным из которых является соотношение расстояний  $S_{max} < S_{min} < S_{min,c}$  (рисунок 1).

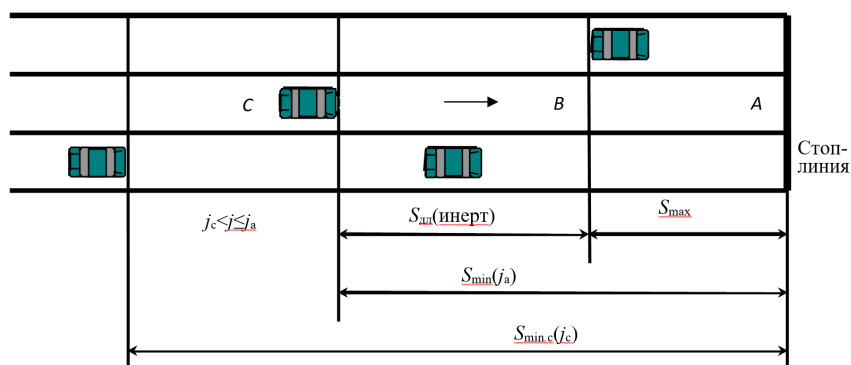


Рисунок 1. – Расположение инертной зоны дилеммы в случае  $S_{max} < S_{min} < S_{min,c}$

На рисунке 1 зоне B возникает инертная зона дилеммы, т.е. водитель не сможет проехать безопасно перекресток, т.к. находится на расстоянии до стоп-линии большем, чем  $S_{max}$ , и не сможет безопасно остановиться у стоп-линии потому, что находится на расстоянии меньшем, чем  $S_{min}$ . Следовательно, в данном случае зона дилеммы ограничена расстояниями  $S_{min}$  и  $S_{max}$ . Опасными при этом являются зоны B и C, длина которых определяется как

$$S_{длB} = S_{min} - S_{max}, \tag{1}$$

$$S_C = S_{min,c} - S_{min}. \tag{2}$$

Таким образом, водителям автомобилей, находящихся в зонах A, B и C, необходимо предоставить возможность безопасного проезда перекрестка посредством увеличения продолжительности переходного интервала. Кроме того, водителю необходимо сообщить о ее наличии посредством нанесения ТСОДД, а именно – дорожной разметки (предложенной версии 1.1 – желтого цвета). Водителям, находящимся на расстоянии большем  $S_{min,c}$ , необходимо предоставить достаточно времени для выполнения запланированного торможения перед стоп-линией со служебным замедлением посредством обеспечения достаточной продолжительности времени оповещения водителя о смене сигнала светофора, а именно – такой установки светофоров, которая бы обеспечивала наибольшее расстояние их видимости – оптимально с выносом над каждой полосой (но возможны также и другие варианты, например, расположением на консольной опоре (Г-образной) с вертикальным или горизонтальным расположением сигналов).

Следовательно, управление ТП при подъезде к РПК при смене разрешающего сигнала светофора предопределяет работу с двумя группами автомобилей. Первая группа – это автомобили, проезжающие перекресток, вторая – совершающие остановку перед стоп-линией. Поэтому сутью предложений является обеспечение безопасных условий проезда для автомобилей, входящих в каждую из групп. Таким образом, основным регулирующим параметром для автомобилей первой группы является продолжительность переходного интервала, а для второй – время оповещения водителей о смене разрешающего сигнала светофора.

Для определения местоположения зоны (зон) дилеммы разработан соответствующий модуль, учитывающий все возможные соотношения искомых расстояний. Пример определения размеров конфликтной зоны при соотношении расстояний, указанных на рисунке 1, приведен на рисунке 2.

<sup>2</sup> Капский, Д. В. Совершенствование метода прогнозирования аварийности на регулируемых перекрестках для повышения безопасности дорожного движения : дис. ...канд. техн. наук : 05.22.10 / Д.В. Капский. – Минск, 2003. – 132 л.

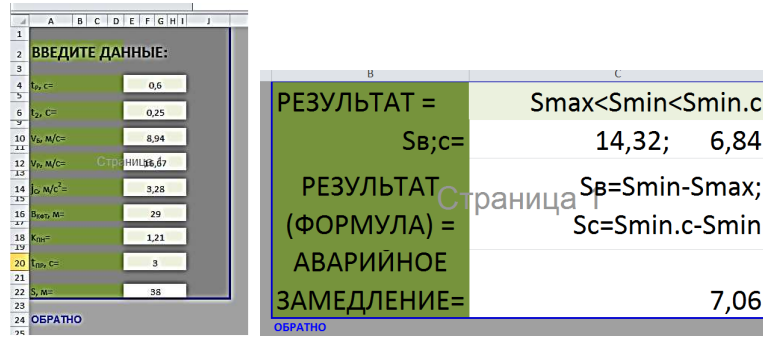


Рисунок 2. – Пример применения модуля алгоритма для определения местоположения зоны дилеммы

Для определения достаточности переходного интервала разработан соответствующий модуль (рисунок 3), основанный на новом формализованном механизме конфликтного взаимодействия лидирующего и ведомого автомобилей при приближении к РПК с использованием следующей основной системы неравенств:

$$\begin{cases} S_A^\Phi \geq S_A + S_{0A}, \\ S_B^\Phi - l_B \geq S_{0B}, \\ S_\Delta \geq 1,5 \text{ м.} \end{cases} \quad (3)$$

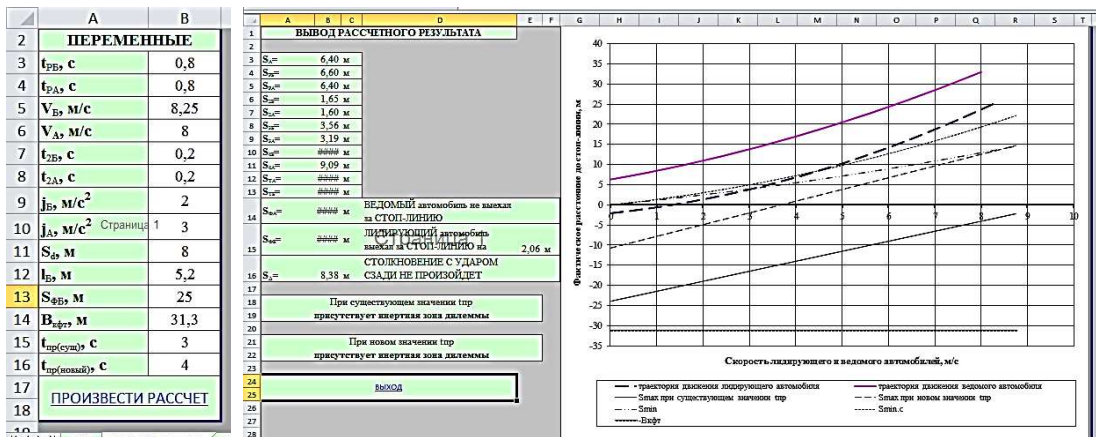


Рисунок 3. – Пример применения модуля алгоритма для определения достаточности переходного интервала

При соблюдении первого и второго неравенств выезда ведомого и лидирующего автомобилей за стоп-линию не произойдет. При соблюдении третьего неравенства – не произойдет столкновения с ударом сзади и не будет спровоцирована КФС. Столкновение с ударом сзади будет иметь место при  $S_\Delta \leq 0$ , а конфликтная ситуация в случае  $0 < S_\Delta < 1,5$  [3; 4].

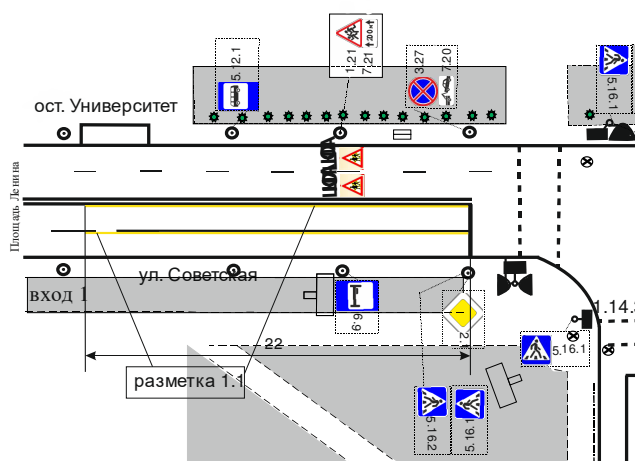
Именно за счет увеличения продолжительности переходного интервала водителям предоставляется достаточно времени для бесконфликтного проезда перекрестка или, более точная предложенная формулировка, до наиболее удаленной конфликтной точки (основным параметром в этом случае является  $V_{кфт}$ ). Таким образом, для определения достаточности интервала предложен графический способ, в соответствии с которым анализируется соотнесение кривых  $S_{max}$  и  $S_{min.c}$ . При достаточной величине рассматриваемого интервала кривая  $S_{max}$  должна располагаться выше кривой  $S_{min.c}$ .

Основным параметром, влияющим на время оповещения о смене сигнала светофора, является фактическое расстояние видимости ТСР ( $S_B$ ). Зависимость расстояния до стоп-линии от начальной скорости торможения автомобиля (аналогичная той, которая приведена на рисунке 3) (рисунок 4) может применяться для анализа достаточности времени оповещения ( $t_{оп}$ ) на основе сравнения значения расстояний  $S_B$  и  $S_{min.c}$  при различных значениях скоростей автомобилей. Продолжительность времени оповещения будет достаточной, если значение  $S_B$  будет больше  $S_{min.c}$ . При этом применяемое водителями замедление будет равно или менее служебного.



**Рисунок 4. – Зависимость расстояния до стоп-линии от начальной скорости торможения автомобиля (при различных значениях скоростей)**

При этом необходимо указать водителям с помощью ТСОДД возможность как безопасного проезда, так и безопасного торможения. Данная задача была разрешена предложением дорожной разметки. Исходя из принципов существующей в нашей стране системы дорожной разметки, для выделения указанной выше зоны может применяться разметка 1.1 (желтого цвета). Пример ее нанесения слева на каждой полосе указан на рисунке 5.



**Рисунок 5. – Пример нанесения предложенной разметки на опытном перекрестке**

Следовательно, для второй группы автомобилей (т.е. совершающих остановку перед стоп-линией и не достигших начала разметки 1.1) обеспечивается данная безопасная возможность, причем с замедлением меньше служебной величины. Данное мероприятие особенно ориентированно на неместных водителей. Увеличения фактического расстояния видимости ТСР и, как следствие, времени оповещения можно достигнуть следующими путями:

- 1) расположением светофоров не перед перекрестком справа от проезжей части, а либо перед перекрестком над проезжей частью (или над каждой полосой), либо за перекрестком над проезжей частью. При этом возможно использование как светофоров Т.1, так и Т.1.г.;
- 2) применением светофоров с размерами сигналов в диаметре 300 мм;
- 3) введением различных конструкций индикаторов, предоставляющих цифровую информацию об оставшемся времени горения разрешающего сигнала (либо до КС) начиная с 9–8 с.

Эти мероприятия (особенно 1) призваны улучшить видимость сигналов светофора водителями и существенно уменьшить помехи, создаваемые особенно крупногабаритным МТС, движущимся по крайним полосам.

Результатами применения некоторых, из указанных в статье мероприятий при организации координированного регулирования по ул. Советской в г. Гомеле, а также на ряде РПК гг. Минска, Витебска, Гродно, Могилева, Бреста, Мозыря, Барановичи и Бобруйска стали следующие

- устройство светофора на РПК с вертикальным расположением сигналов приводит к сокращению числа ДТП на 30%;
- устройство светофора на РПК с горизонтальным расположением сигналов приводит к сокращению числа ДТП на 26,7%;

- при наличии светофоров с индикаторами достигается сокращение числа ДТП на 21,7%.
- при оборудовании перекрестков, имеющих входы с полосами, на которых динамический коэффициент более 1,2, светофорами над проезжей частью достигается сокращение числа ДТП на 19%;
- вынос светофора над проезжей частью приводит к увеличению расстояния видимости на 20–40% и соответственно к увеличению времени оповещения порядка 35–50%;
- сокращение экономических и экологических потерь на перекрестках порядка 15% и увеличение пропускной способности на 5–10%.

Как было доказано результатами исследований, создаваемые МТС помехи достаточно значительны и согласно статистике приводят к росту ДТП в попутном ТП, поэтому в соответствии с предложенными мероприятиями выработаны и предложения в нормативно-правовые акты дорожного движения:

- положения пункта 10.6 подпункта 10.6.2<sup>3</sup> дополнить абзацем:

При наличии на входе перекрестка полос с интенсивным движением МТС (коэффициентом приведения ТП более 1,2) светофоры Т.1, Т.1.г предпочтительно должны размещаться над проезжей частью на высоте 5–6 м;

- положения пункта 6.2 подпункта 6.2.3 б) дополнить абзацем:

Перед регулируемыми перекрестками с левой стороны полосы при необходимости выделить для водителей зону, попав в которую, водитель имеет безопасную возможность проехать перекресток при смене разрешающего сигнала светофора (имеет желтый цвет).

Годовой экономический эффект от внедрения определенного ряда мероприятий (из тех, которые были указаны выше) на двенадцати РПК г. Гомеля составил 84 795 бел. руб.

Необходимо отметить, что автором базовой методики отмечается необходимость ее совершенствования для других видов типовых объектов и конфликтов для различных режимов регулирования [5–7]. Вместе с тем, как показали исследования, данная методика доведена до практического внедрения и уже на данном этапе позволяет оценивать мероприятия и обосновывать решения по организации и безопасности дорожного движения [8–10].

#### **Заключение.**

1. Приведены некоторые новые положения теоретико-методических основ понятия и расположения зоны (зон) дилеммы.
2. Формализована и апробирована модель конфликтного взаимодействия лидирующего и ведомого автомобилей при приближении к РПК в попутном ТП при смене разрешающего сигнала светофора.
3. Приведены результаты разработанного комплексного алгоритма, предназначенного для моделирования конфликтного взаимодействия лидирующего и ведомого автомобилей, для определения местоположения конфликтной зоны и прогнозирования приведенной аварийности в попутном ТП (относительная погрешность прогноза по новой методике не превышает 20%).
4. Разработана система мероприятий по снижению аварийности в попутном ТП (достигается снижение аварийности от 5 до 30%).

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Врубель, Ю.А. Организация дорожного движения. В 2 ч. / Ю.А. Врубель. – Минск : Беларус. фонд безопасности до-рож. движения, 1996. – Ч. 1. – 328 с.
2. Ходоскин, Д.П. Расположение зоны дилеммы: методика, недостатки существующих подходов / Д.П. Ходоскин // Вестн. Беларус. гос. ун-та транспорта. – 2012. – Вып. 1(24). – С. 32–38.
3. Лапский, С.Л. Разработка компьютерной модели прогнозирования столкновений с ударом сзади / С.Л. Лапский, Д.П. Ходоскин, Р.Ю. Лагереv // Вестн. Беларус. гос. ун-та транспорта. – 2011. – Вып. 2(23). – С. 49–54.
4. Ходоскин, Д.П. Совершенствование метода исследования столкновений с ударом сзади при подъезде к регулируемому перекрестку / Д.П. Ходоскин, Р.Ю. Лагереv // Молодеж. вестн. Иркутс. гос. техн. ун-та (интерн. верс.). – 2011. – Вып. 2. – С. 45–52.
5. Капский, Д.В. Разработка методики прогнозирования аварийности в дорожном движении / Д.В. Капский // Вестн. БНТУ. – 2004. – № 5. – С. 41–43.
6. Капский, Д.В. Разработка мероприятий по повышению безопасности движения на регулируемых перекрестках / Д.В. Капский // Вестн. БНТУ. – 2005. – № 1. – С. 55–58.
7. Кухаренко, Г.М. Повышение безопасности дорожного движения на основе оценки аварийности на конфликтных объектах / Д.В. Капский, Г.М. Кухаренко // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. Сер. Транспорт, машиностроение, металлургия, электротехника. – 2006. – № 3(12). – С. 33–38.
8. Капский, Д.В. Методика оперативной оценки эффективности мероприятий по повышению безопасности движения / Д.В. Капский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2011. – № 11. – С. 17–24.
9. Совершенствование организации дорожного движения на магистральной улице общегородского значения / Д.В. Капский [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2012. – № 3. – С. 15–20.

<sup>3</sup> Технические средства организации дорожного движения. Правила применения = Технічныя сродкі арганізацыі дарожнага руху. Правілы прымянення : СТБ 1300-2014. – Введ. 01.01.2019. – Минск : Госстандарт : Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2019. – 144 с.

10. Капский, Д.В. Прогнозирование аварийности по потенциальной опасности – направления совершенствования / Д.В. Капский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2012. – № 11. – С. 67–73.

## REFERENCES

1. Vrubel', YU.A. (1996). *Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya [Organization of traffic]*. Minsk: Belarus. fond bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya. (In Russ.).
2. Khodoskin, D.P. (2012). Raspolozheniye zony dilemmy: metodika, nedostatki sushchestvuyushchikh podkhodov [Location of the dilemma zone: methodology, shortcomings of existing approaches]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universitetata transporta [Bulletin of the Belarusian State University of Transport]*, 1(24), 32–38. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Lapskiy, S.L., Khodoskin, D.P. & Lagerev, R.Yu. (2011). Razrabotka komp'yuternoy modeli prognozirovaniya stolknoveniy s udarom szadi [Development of a computer model for predicting collisions with a rear impact]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universitetata transporta [Bulletin of the Belarusian State University of Transport]*, 2(23), 49–54. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Khodoskin, D.P. & Lagerev, R.Yu. (2011). Sovershenstvovaniye metoda issledovaniya stolknoveniy s udarom szadi pri pod'yezde k reguliruyemomu perekrestku [Improving the method of studying collisions with a rear impact at the entrance to a controlled intersection]. *Molodezhnyy vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universitetata (Internet-versiya) [Youth Bulletin of the Irkutsk State Technical University (Internet version)]*, (2), 45–52. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Kapskiy, D.V. (2004). Razrabotka metodiki prognozirovaniya avariynosti v dorozhnom dvizhenii [Development of a methodology for predicting accidents in road traffic]. *Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Belarusian National Technical University]*, (5), 41–43. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Kapskiy, D.V. (2005). Razrabotka meropriyatiy po povysheniyu bezopasnosti dvizheniya na reguliruyemykh perekrestkakh [Development of measures to improve traffic safety at regulated intersections]. *Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Belarusian National Technical University]*, (1), 55–58. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Kapskiy, D.V. & Kukharenek, G.M. (2006). Povysheniye bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya na osnove otsenki avariynosti na konfliktnykh ob'yektakh [Improving road safety based on the assessment of accidents at conflict sites]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta. Seriya Transport, mashinostroyeniye, metallurgiya, elektrotekhnika [Bulletin of the Belarusian-Russian University. Series Transport, mechanical engineering, metallurgy, electrical engineering]*, 3(12), 33–38. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Kapskiy, D.V. (2011). Metodika operativnoy otsenki effektivnosti meropriyatiy po povysheniyu bezopasnosti dvizheniya [Methods of operational assessment of the effectiveness of measures to improve traffic safety]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnyye nauki [Bulletin of the Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, (11), 17–24. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Kapskiy, D.V., Kuz'menko, V.N., Korzhova, A.V., Gorelik, Ye.N. & Polkhovskaya, A.S. (2012). Sovershenstvovaniye organizatsii dorozhnogo dvizheniya na magistral'noy ulitse obshchegorodskogo znacheniya [Improving the organization of traffic on the main street of citywide significance]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnyye nauki [Bulletin of the Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, (3), 15–20. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Kapskiy, D.V. (2012). Prognozirovaniye avariynosti po potentsial'noy opasnosti – napravleniya sovershenstvovaniya [Forecasting accidents by potential hazard - directions for improvement]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnyye nauki [Bulletin of the Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, (11), 67–73. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 04.07.2022

## DEVELOPMENT OF ACTIVITIES FOR REDUCING ACCIDENTS IN FOLLOWING TRAFFIC STREAM

**D. KAPSKIY, D. KHODOSKIN**

*Accidents with material damage account for more than 90% of their total number, and the total losses from them exceed the losses from road traffic accidents with victims, according to expert estimates, by almost 3 times and continue to grow. An analysis of the publications of Belarusian, as well as scientists from the CIS countries (B.E. Borovsky, V.I. Vasiliev, A.V. Nozdrichev, etc.) shows that this direction insufficiently given, at least in the context of solving other problems of traffic management. Foreign scientists (G. L. Chang, H. Chen, M.M. Abbas, A. Al-Mudhaffar, D. Geyzis, R. Herman and others), although they considered the problem under study as an independent one, however, their works also lack a detailed study of it, which can be applied to the modern conditions of the Republic of Belarus. This article presents some provisions on the new theoretical and methodological foundations for determining the dilemma zone (and its types), the mechanism of conflict interaction between the leading and driven vehicles when approaching the RPK, a new methodology for determining the dilemma zone and practical recommendations for neutralizing the effect of the dilemma zone and reducing the accident rate in passing traffic.*

**Keywords:** passing traffic flow, dilemma zone, accident rate, conflict zone, controlled intersection.

## ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 620.172:620.178

### ОЦЕНКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

*д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ, канд. техн. наук, доц. А.Г. КУЛЬБЕЙ, А.С. БОНДАРЕВ  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

*Установлены повреждения оборудования нефтехимического комплекса, касающиеся магистральных нефтегазопроводов, с выделением устранимых и неустранимых неисправностей. Эксплуатация трубопровода со стенками, пораженными общей коррозией, может быть продлена, если их толщина находится в допустимых пределах, установленных нормативными документами. Ударная вязкость материала конструкций может быть использована в качестве основного свойства среди других механических свойств при оценке склонности материала к хрупкому разрушению. Она обладает высокой чувствительностью к эксплуатационной деградации как основного металла, так и материала сварных соединений. Предложена технология восстановительного ремонта линейной части магистральных трубопроводов, позволяющая повысить примерно в два раза ударную вязкость их материала с продлением срока службы трубопровода до следующего диагностирования.*

**Ключевые слова:** *оборудование нефтехимического комплекса, магистральные трубопроводы, повреждение, остаточный ресурс, восстановление.*

**Введение.** Оборудование нефтехимического комплекса связано с переработкой и перемещением взрывопожароопасных и агрессивных высокотоксичных веществ при высокой температуре (до 550 °С) и давлении (до 10 МПа). Работа этого оборудования отличается возрастающей интенсификацией технологических процессов с повышением их основных параметров. Более 60% опасного в технологическом отношении нефтеперерабатывающего оборудования (НПО), подконтрольного органам Госпромнадзора, эксплуатируется свыше 30 лет и выработало нормативный срок службы. Замена сложного и дорогостоящего оборудования новым не представляется возможным по причине нехватки финансовых средств. Поэтому для такого оборудования исследуется и назначается остаточный ресурс по критерию безопасности.

Чрезвычайные ситуации, обусловленные достижением предельного состояния нефтехимического оборудования, приводят к экономическим издержкам, связанным с дорогостоящим ремонтом и неиспользуемой выгодой от реализации продукции, человеческим травмам и жертвам, а также к загрязнению окружающей среды. Около 43% инцидентов связаны с эксплуатационным повреждением материала этого оборудования, 10% причин травматизма – с разрушением его частей. Более половины причин инцидентов сопряжены со снижением механических свойств материала и потерей несущей способности конструкции во время эксплуатации по причине старения материала, в т.ч. из-за его коррозии.

Можно предположить, что без принятия необходимых мер количество отказов оборудования будет расти [1]. Опыт его эксплуатации показывает, что увеличение срока службы без научного обоснования может приводить к аварийным разрушениям. Изменения материала оборудования должны быть выявлены на ранней стадии их проявления путем контроля этого материала, т.е. одним из основных направлений решения задачи безопасной работы нефтеперерабатывающего оборудования является мониторинг структуры и свойств материала при эксплуатации.

**Основная часть.** В материале трубопроводов, например, выявляют следующие повреждения, которые учитывают при оценке его состояния и определении остаточного ресурса:

- общая поверхностная коррозия (рисунок 1);
- межкристаллитная коррозия (рисунок 2);
- сероводородное расслоение (рисунок 3);
- коррозионное растрескивание под напряжением (рисунок 4);
- тепловая хрупкость (рисунок 5);
- сфероидизация перлита (рисунок 6).

Общая поверхностная коррозия приводит к постепенному уменьшению толщины стенки элементов оборудования. Срок эксплуатации оборудования ограничивается временем до достижения минимального значения толщины стенки.

В развитии коррозионных процессов значительна роль химического состава и структуры сталей. При протекании электрохимических процессов коррозии гетерогенность структуры материала с разными электродными потенциалами способствует локальной коррозии. Межкристаллитная коррозия свойственна хромоникелевым сталям и проявляется в образовании сетки трещин по границам зерен, обедненным хромом. Срок службы оборудования из этих сталей определяется временем образования в стали склонности к межкристаллитной коррозии.





Рисунок 1. – Общая коррозия трубы змеевика печи (сталь 20)

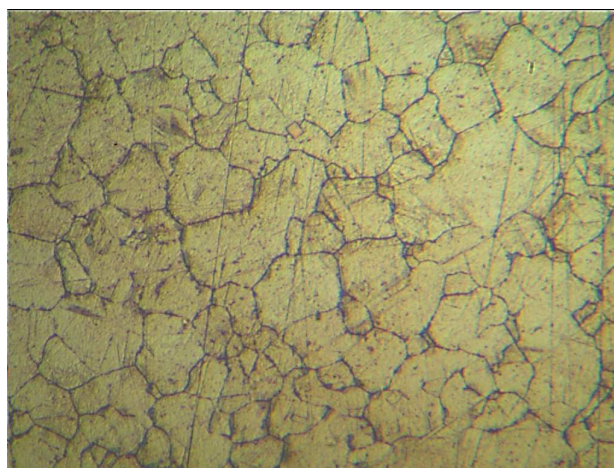


Рисунок 2. – Межкристаллитная коррозия стали 12Х18Н10Т (труба сажеобдувателя) (x500)



Рисунок 3. – Сероводородное расслоение стенки пропановой емкости

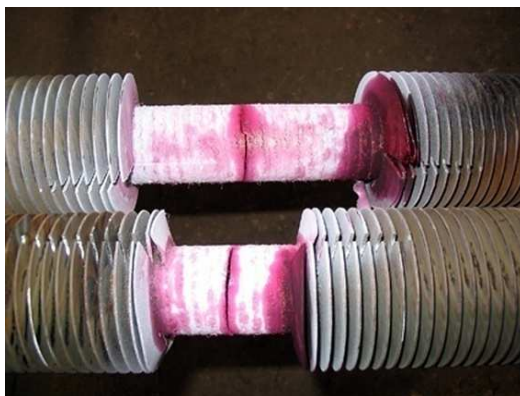


Рисунок 4. – Коррозионное растрескивание под напряжением труб подогревателя



Рисунок 5. – Разрушение сварного соединения трубопровода вследствие тепловой хрупкости металла

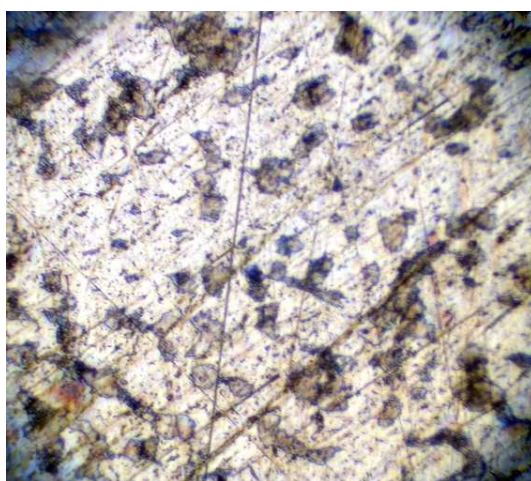


Рисунок 6. – Сфероидизация перлита в структуре металла ректификационной колонны (феррит + перлит) (сталь ВСтЗсп, увеличение  $\times 400$ )

Сероводородное расслоение материала относится к замедленному разрушению и возникает вследствие продолжительной эксплуатации оборудования в сероводородсодержащей среде. Расслоение возникает из-за проникновения атомарного водорода в поверхностный слой материала, его диффузии вглубь толщины стенки и скопления вблизи несплошностей (поры, пустоты) и включений (сульфиды, окисульфиды и др.). Водород образуется при взаимодействии водного раствора сероводорода с железом. Время эксплуатации оборудования с таким повреждением материала ограничено предельно допустимым размером расслоений. Наибольшую склонность к образованию отдулин обнаруживают сосуды и аппараты из кремнемарганцевых (09Г2С, 16ГС) и марганцовистых (09Г2, 14Г2) сталей.

Коррозионное растрескивание под напряжением возникает под действием на материал статических растягивающих напряжений и среды, содержащей ионы хлора. При этом в микроструктуре материала наблюдаются повреждения в виде растрескивания по участкам, обладающим наименьшей коррозионной стойкостью.

Тепловая хрупкость возникает по причине охрупчивания материала при длительном воздействии высокой температуры (250–550 °С), вызывающей снижение прочности материала по границам зерен и выделения по этим границам частиц дисперсной фазы.

При сфероидизации перлита происходит превращение его составляющей структуры в виде выделения цементита сферической формы. При этом границы перлитных зерен размываются, и возникает большое количество обособившихся сферических частиц цементита по границам зерен. Последствием сфероидизации перлита является развитие межзеренной хрупкости и снижение пластичности.

Применительно к магистральным нефтепроводам диаметром от 377 до 720 мм, длина которых на территории Республики Беларусь составляет 4112 км, предельным состоянием являются межкристаллитная коррозия, сероводородное расслоение и коррозионное растрескивание под напряжением (в виде трещин). С допустимой толщиной стенок, пораженных коррозией, эксплуатация трубопровода может быть продлена, а тепловая хрупкость и сфероидизация перлита могут быть устранены.

Научные основы определения остаточного ресурса оборудования с целью принятия решения о возможности его дальнейшей безопасной эксплуатации включают определение критериев достижения предельного состояния и установление механизма деградации материала. Оценка остаточного ресурса НПО проводится путем экстраполяции изменения значений измеряемых характеристик, определенных при текущем диагностировании, при сохранении существующих условий эксплуатации (рисунок 7).

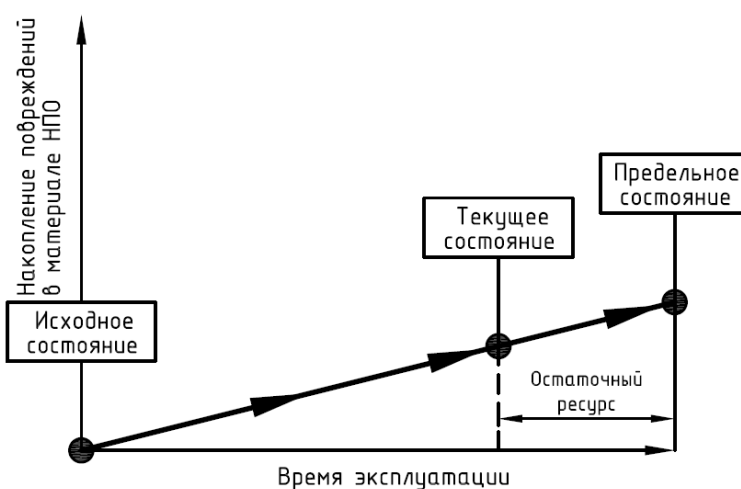


Рисунок 7. – Схема определения остаточного ресурса оборудования

Остаточный ресурс оборудования и трубопроводов  $T_{ост}$ , повреждающим фактором для которых является уменьшение толщины стенок из-за общей коррозии, определяют по формуле<sup>1,2</sup>

$$T_{ост} = k \frac{S_{ф} - S_{о}}{A_{ф}}, \text{ лет}, \quad (1)$$

<sup>1</sup> Методика оценки остаточного ресурса технологических трубопроводов. – Волгоград : АОТ «ВНИКТИнефтехимоборудование», 1996. – 25 с.

<sup>2</sup> Неразрушающий контроль и диагностика : справ. / В.В. Ключев [и др.] ; под ред. В.В. Ключева. – М. : Машиностроение, 2002. – 488 с.

где  $k$  – коэффициент, зависящий от категории и срока службы объекта ( $k = 0,9-1,0$ );

$S_{\phi}$  – фактическая толщина элемента, мм;

$S_0$  – отбраковочная (предельная) толщина элемента, мм;

$A_{\phi}$  – скорость коррозионного изнашивания, мм/год.

Толщину элементов конструкции измеряют ультразвуковыми толщиномерами во время ее диагностирования.

Классический подход к анализу материала конструкций НПО предусматривает оценку во взаимосвязи изменений во времени его химического состава, структуры и механических свойств в зависимости от влияния внешних факторов (температуры, давления и воздействия агрессивных сред). Пониженные значения пределов текучести и прочности, относительного удлинения и ударной вязкости обусловлены старением материала в течение длительной эксплуатации. Предложены корреляционные уравнения механических свойств материалов в зависимости от химического состава материала сталей [2]:

$$\sigma_b = 28,31C + 13,39Mn + 10,30Si + 18,61S + 57,53P + 28,92; \quad (2)$$

$$\sigma_{0,2} = 24,17C + 8,14Mn + 8,56Si + 2,36S + 45,74P + 18,19; \quad (3)$$

$$\delta_5 = -32,37C - 8,05Mn - 14,11Si - 104,37S - 53,96P + 47,78, \quad (4)$$

где  $\sigma_b$  – предел прочности, МПа;

$\sigma_{0,2}$  – предел текучести, МПа;

$\delta_5$  – относительное удлинение, %;

C, Mn, Si, S и P – содержание в стали углерода, марганца, кремния, серы и фосфора, соответственно.

Однако достоверность определения механических характеристик по приведенным данным невелика (коэффициенты корреляции – 0,33; 0,44 и 0,35<sup>3</sup> для уравнений (1), (2) и (3), соответственно). Таким образом, методы, основанные на использовании химического состава материала оборудования нефтехимического комплекса, не могут быть применены при определении структурного состояния и механических свойств этого материала.

Особое место среди других механических свойств занимает ударная вязкость – ее значение характеризует склонность материала к хрупкому разрушению [3], она обладает высокой чувствительностью к эксплуатационной деградации основного металла и сварных соединений материала конструкции. Если при оценке старения сталей по пределу прочности отсеивают 20% конструкций, по пределу текучести – 14%, по относительному удлинению – 28%, то по ударной вязкости (которая не учитывается в расчетах на прочность) – 46% конструкций [1]. В связи с этим целесообразно использовать ударную вязкость в качестве основной характеристики динамики деградации механических свойств материала нефтехимического оборудования.

Восстановление пластичных свойств материала нефтегазопроводов обеспечивает рекристаллизационный отжиг [3], включающий нагрев кольцевого элемента трубопровода до температуры 680–700 °С, выдержку при этой температуре в течение 40–50 мин и охлаждение на воздухе<sup>4</sup>. Нагрев изделия до указанной температуры обеспечивает индукционная установка с высокочастотным нагревом материала или устройство с пламенным нагревом материала при сгорании пропан-бутана в кислороде. Использование устройства второго вида в производственных условиях более предпочтительно. Восстановление структуры и ударной вязкости материала объясняется укрупнением зерен, растворением карбидов, образовавшихся по их границам зерен, и закруглением вершин игл видманштеттовой структуры, образовавшейся в начале жизненного цикла трубопроводов при сварке их стыков.

Предложенная технология восстановительного ремонта линейной части магистральных трубопроводов позволяет повысить примерно в два раза ударную вязкость их материала, приблизив ее к начальному значению параметра при вводе объекта в эксплуатацию.

**Заключение.** Выявлены эксплуатационные повреждения оборудования нефтехимического комплекса, касающиеся магистральных нефтегазопроводов, с выделение устранимых (тепловая хрупкость и сфероидизация перлита) и неустраняемых (межкристаллитная коррозия, сероводородное расслоение и коррозионное растрескивание под напряжением в виде трещин) повреждений. С допустимой толщиной стенок, пораженных коррозией, эксплуатация трубопровода может быть продлена. Минимальную толщину стенок устанавливают нормативные документы.

<sup>3</sup> Горицкий, В.М. Учет охрупчивания конструкционных материалов в процессе эксплуатации и дефектности при определении остаточного ресурса ответственного оборудования / В.М. Горицкий // Новые методы технического диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса конструкций и оборудования, работающего под давлением : материалы совещания – Новополоцк, 1997. – С 27–30.

<sup>4</sup> Способ восстановления ударной вязкости кольцевого сварного соединения магистрального трубопровода : пат. МТ ВУ, МПК С21D 9/50, С21D 9/08, С21D 9/14, В23P 6/00 / А.С. Снарский, А.Н. Янушонок. – Оpubл. 30.08.2014.

Обосновано использование ударной вязкости материала конструкций в качестве основного свойства среди других механических свойств. Она характеризует склонность материала к хрупкому разрушению и обладает высокой чувствительностью к эксплуатационной деградации как основного металла, так и материала сварных соединений.

Предложена технология восстановительного ремонта линейной части магистральных трубопроводов, позволяющая повысить примерно в два раза ударную вязкость их материала с продлением срока службы трубопровода до следующего диагностирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, В.П. Обеспечение безопасной работы оборудования нефтехимического комплекса / В.П. Иванов, А.В. Крыленко. – Новополоцк : ПГУ, 2015. – 180 с.
2. Бондаренко, В.А. Использование нестандартных методов для контроля механических свойств углеродистой стали / В.А. Бондаренко, Р.Г. Айсин, В.В. Третьяков // Завод. лаборатория. – 1974. – № 5 (Т. 40). – С. 601–603.
3. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М. : Металлургия, 1978. – 648 с.

## REFERENCES

1. Ivanov, V.P. & Krylenko, A.V. (2015). *Obespecheniye bezopasnoy raboty oborudovaniya neftekhimicheskogo kompleksa* [Ensuring the safe operation of equipment for the petrochemical complex]. Novopolotsk: PGU. (In Russ.).
2. Bondarenko, V.A., Aysin, R.G. & Tret'yakov, V.V. (1974). *Ispol'zovaniye nestandartnykh metodov dlya kontrolya mekhanicheskikh svoystv uglevodistoy stali* [Use of non-standard methods to control the mechanical properties of carbon steel]. *Zavodskaya laboratoriya* [Factory laboratory], 5 (T. 40), 601–603. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Gulyayev, A.P. (1978). *Metallovedeniye* [Metal science]. Moscow: Metallurgiya. (In Russ.).

Поступила 04.07.2022

## EVALUATION AND USE OF RESIDUAL RESOURCE EQUIPMENT FOR A PETROCHEMICAL COMPLEX

V. IVANOV, A. KUL'BEY, A. BONDAREV

*The damage to the equipment of the petrochemical complex, related to the main oil and gas pipelines, was established, with the identification of removable and irreparable damage. Operation of a pipeline with walls affected by general corrosion can be extended if their thickness is within the permissible limits established by regulatory documents. The impact strength of a material of structures can be used as the main property among other mechanical properties in assessing the tendency of a material to brittle fracture. It is highly sensitive to operational degradation of both the base metal and the material of the welded joints. The technology of restoration repair of the linear part of main pipelines has been proposed, which makes it possible to approximately double the impact toughness of their material with an extension of the service life of the pipeline until the next diagnosis.*

**Keywords:** *equipment of the petrochemical complex, main pipelines, damage, residual life, restoration.*

УДК 614.8.084

**АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫМИ РИСКАМИ  
В ОРГАНИЗАЦИЯХ ТОПЛИВНОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ****В.Н. САМУСЕВИЧ***(Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Минск),**канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА**(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

*Предложен алгоритм управления профессиональными рисками в организациях топливной и химической отраслей Республики Беларусь, который содержит анализ стохастических и нестохастических опасных факторов, оценку их значимости и выбор наиболее приоритетных опасных факторов с использованием нейросетевого метода анализа. Цифровизация предлагаемого алгоритма позволит оперативно и эффективно провести процедуру идентификации опасностей, определить и обеспечить оперативное управление приоритетными опасностями, а также снизить риск возникновения внештатных ситуаций и несчастных случаев на опасных производственных объектах топливной и химической промышленности.*

**Ключевые слова:** *охрана труда, идентификация опасности, топливная промышленность, химическая промышленность, профессиональный риск.*

**Введение.** Применение инструментов риск-ориентированного подхода в обеспечении безопасных условий труда закреплено на законодательном уровне Республики Беларусь. Нормативно-правовыми актами Республики Беларусь предусматривается обязанность работодателей выполнять идентификацию опасностей, оценку профессиональных рисков, определять и разрабатывать эффективные меры для управления профессиональными рисками, осуществления анализа результативности реализованных профилактических мероприятий [1–9]. К настоящему времени научным сообществом сформированы основы теории анализа профессиональных рисков, разработаны методы их оценки, однако отсутствует общепринятый алгоритм управления профессиональными рисками, а существующие блок-схемы управления рисками носят фрагментарный характер, что не позволяет в полном объеме решать важные практические задачи по эффективному управлению охраной труда в организациях. Особенно актуальна разработка единого алгоритма управления профессиональными рисками для организаций топливной и химической отраслей в связи с ростом общей численности потерпевших при несчастных случаях на производстве [10; 11].

**Методы исследований.** Выполнен анализ процедур идентификации опасностей, применяемых предприятиями топливной и химической отраслей, на основании которого разработан алгоритм управления профессиональными рисками для организаций топливной и химической промышленности Республики Беларусь.

**Результаты и их обсуждение.** Возникновение несчастных случаев на производстве обусловлено присутствием стохастических и нестохастических факторов, оказывающих неблагоприятное воздействие на работников. Качество функционирования систем менеджмента безопасности труда и охраны здоровья в рамках конкретного предприятия определяется эффективностью устранения либо снижения воздействия данных факторов [10].

Ведущими факторами, являющимися причиной более 80% несчастных случаев на производстве в организациях топливной и химической промышленности, являются именно стохастические, характеризующиеся высокой степенью неопределенности по параметрам их вероятности реализации и величине нанесенного ущерба, определяемого тяжестью последствий [10].

Сравнительный анализ процедур идентификации опасностей, применяемых организациями химической и нефтехимической отрасли Республики Беларусь, позволил определить:

- исчерпывающий перечень анализируемой информации (документации) и показателей (факторов) опасностей;
- оптимальное количество анализируемых режимов работы организации;
- необходимость участия в процессе идентификации опасностей работника непосредственного рабочего места;
- необходимость проведения идентификации опасностей для поставщиков, подрядчиков и посетителей и оценки их влияния на непосредственные рабочие места;
- необходимость применения в процедуре идентификации опасностей логических методов анализа («дерево событий», «а что будет, если?» и др.);
- необходимость максимального исключения влияния личностного фактора эксперта (субъективного подхода) при осуществлении процедуры идентификации и ранжирования опасностей.

На основании выводов и рекомендаций, полученных в ходе сравнительного анализа, а также в целях определения, минимизации и управления стохастическими и нестохастическими факторами предложен алгоритм управления профессиональными рисками на опасных производственных объектах (ОПО) для организаций топливной и химической отрасли Республики Беларусь, приведенный на рисунке.

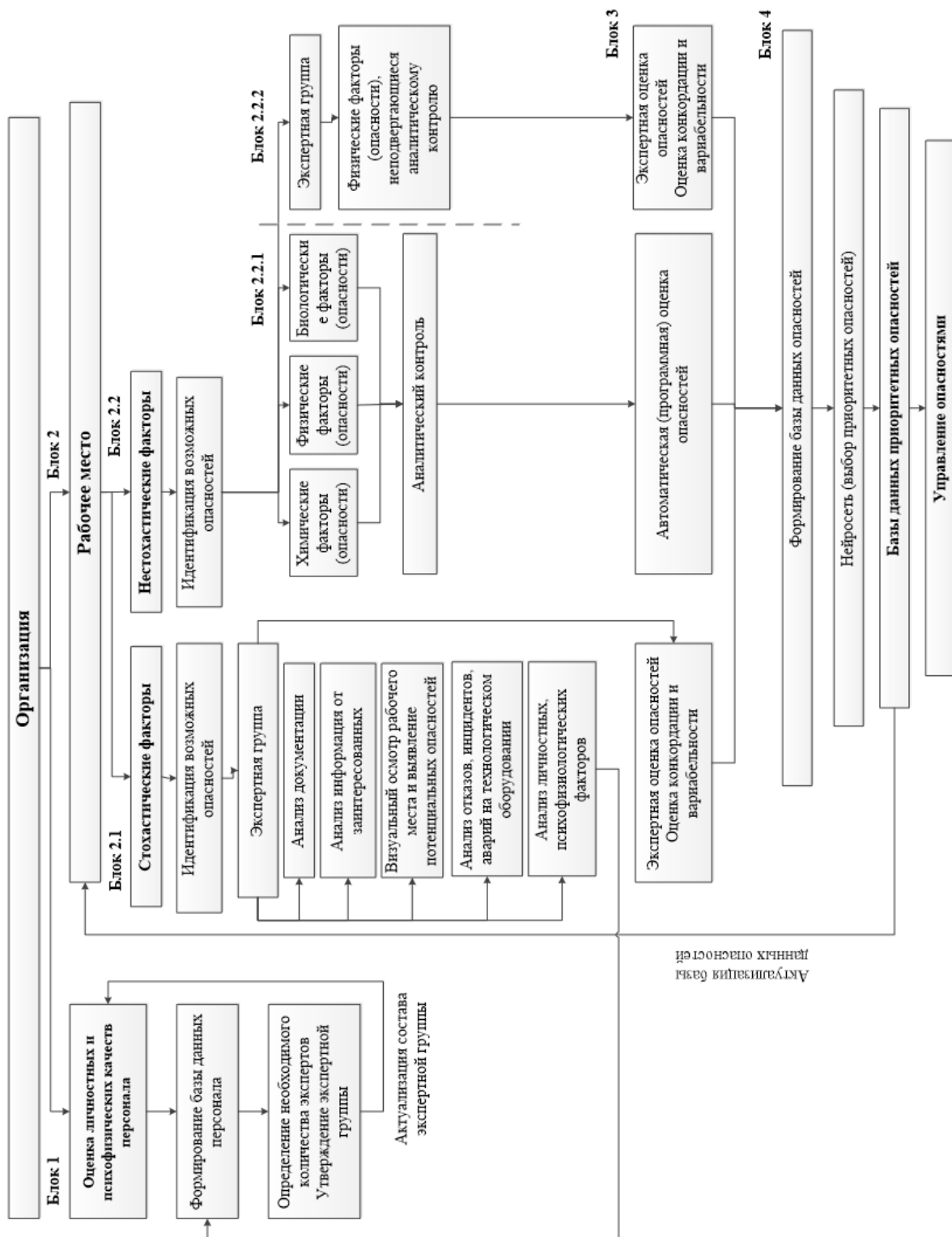


Рисунок. – Алгоритм управления профессиональными рисками на ОАО топливной и химической отрасли Республики Беларусь



### *Блок 1. Формирование экспертной группы.*

Для проведения процедуры идентификации опасностей и оценки профессиональных рисков и разработки мер по управлению ими формируется экспертная группа из работников организации, имеющих соответствующий стаж работы и компетенцию. Методология формирования экспертной группы, определения квалификации экспертов представлена в материалах<sup>1, 2</sup>[12].

*Блок 2. Определение перечня рабочих мест, определение режимов, области и периодичности проведения процедуры идентификации опасностей:*

1. Предлагается учитывать следующие производственные условия (режимы) работы организации: нормативный (регламентированный); режим пуска и остановки технологического процесса, оборудования; аварийный. При нормативном (регламентированном) режиме работы организации рассматриваются производственные процессы и условия соответствующие проектным, регламентным показателям. Режим запуска и остановки технологического процесса, оборудования включает в себя процессы и условия пуска остановки вновь вводимого технологического оборудования, оборудования, подвергшегося этапу реконструкции и модернизации, капитальному и текущему ремонту. Аварийный режим работы включает анализ возможных аварии, инцидентов и происшествий, произошедших как непосредственно в организации, так в зоне ее непосредственного расположения (природного и техногенного характера) и включает в себя условия проведения и характеристики производственного процесса.

2. Виды деятельности организации: основная производственная деятельность (основные плановые и промежуточные технологические процессы, операции, работы и т.д.); вспомогательная производственная деятельность (работы, не отнесенные к основным видам деятельности, работы, осуществляемые подрядными организациями). Например, остановка, пуск установки, плановый ремонт и очистка технологического оборудования, разовые работы, материально-техническое обеспечение, проектирование и т.п.

3. Все структурные подразделения, профессии (должностей), рабочие места, вторые и смежные профессии, виды работ (в т.ч. не предусмотренные должностными или рабочими инструкциями) и т.д.

4. Посетители, подрядчики и т.п.

5. Этапы периодичности проведения идентификации опасностей: первоначальный (изначально), периодический (не реже 1 раза в год), внеплановый (при выполнении разработанных мероприятий по снижению недопустимых рисков; получении результатов расследования произошедших в текущем году несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний; получении результатов расследования произошедших в текущем году аварий и инцидентов, пожаров; изменении НПА и ТНПА, в т.ч. локальных; изменении организационной структуры управления организации; создании (изменении, перемещении) рабочих мест, производств, процессов, операций и т.д.; использовании новых видов сырья, материалов и т.п.; получении предписаний от органов, уполномоченных на осуществление контроля и надзора).

*Блок 2.1. Стохастические факторы.* К стохастическим опасностям отнесены: опасности, возникающие в случае отклонения от установленных норм и правил; опасности, связанные с отказами, инцидентами, авариями на технологическом оборудовании; личностные, психофизиологические опасности; иные опасности, установление которых возможно по средствам визуального контроля рабочего места или поступления информации от заинтересованных лиц.

*Блок 2.2. Нестохастические факторы.* К нестохастическим опасностям отнесены: факторы, не подвергающиеся аналитическому контролю (химические; физические; биологические); факторы, не подвергающиеся аналитическому контролю (физические).

*Блок 2.2.1. К факторам, подвергающимся аналитическому контролю, относятся [13]:*

– факторы физической опасности, такие как освещенность, шум, инфразвук, ультразвук, вибрация, влажность, подвижность воздуха, содержание аэроионов в воздухе, действие электрического тока, статическое электричество, электромагнитные излучения и др.;

– факторы биологической опасности, обусловленные контактом с макро- и микроорганизмами: растениями, животными, бактериями, вирусами и др.;

– факторы химической опасности, обусловленные контактом с вредными веществами, обладающими различным эффектом воздействия: токсическим, раздражающим, канцерогенным, мутагенным, сенсибилизирующим, влияющим на репродуктивную функцию.

<sup>1</sup> Самусевич, В.Н. Выбор экспертной группы для оценки рисков в области охраны труда и промышленной безопасности / В.Н. Самусевич, Ю.А. Булавка // Проблемы обеспечения безопасности людей при пожаре и взрыве : сб. материалов VII Междунар. заоч. науч.-практ. конф. – Минск : УГЗ, 2021. – С 117–120.

<sup>2</sup> Волохина, А.Т. Научно-методические основы совершенствования системы управления промышленной безопасностью на предприятиях магистрального транспорта газа с использованием компетентностного подхода к персоналу : дис. ... д-ра техн. наук : 05.26.03 / А.Т. Волохина. – М., 2018. – С. 117.



Оценка физических, химических и биологических опасностей, подвергающихся аналитическому контролю, определяется путем сравнения с предельно допустимыми уровнями воздействия (концентрациями).

**Блок 2.2.2. Идентификация физических опасностей, измерение которых аналитическими методами невозможно, осуществляется методом экспертной оценки.**

**Блок 3. Оценка опасностей. Оценка конкордации и вариабельности.**

Оценка опасных факторов осуществляется по каждой единичной возможной опасности посредством ее экспертной оценки – определение индивидуального индекса опасности в баллах от 1 до 10.

Коэффициент множественной ранговой корреляции, так называемый коэффициент конкордации Кендалла, может выступать эффективным инкрементом выполнения числовой оценки степени согласованности мнений нескольких экспертов. Данный параметр позволит количественно в пределах от 0 до 1 оценить согласованность между собой рядов предпочтительности, выбранных отдельным экспертом. При этом полную несогласованность экспертов проиллюстрирует цифра 0, а полное совпадение – 1. Хорошая достоверность экспертной оценки – при значении коэффициента конкордации Кендалла в интервале от 0,5 до 0,8. Основной недостаток коэффициента конкордации – невозможность исключения «промахов», т.е. тех данных, которые можно исключить. Для сглаживания данного недостатка возможно применение дополнительного коэффициента вариации, позволяющего рассматривать внутреннюю структуру данных, представляющих величину разброса мнений экспертов.

Средняя и сильно выраженная вариабельность в совокупности со значениями коэффициента конкордации от средних до очень высоких свидетельствуют об однородности представленных данных. В случае если вариабельность и конкордация сильно выражены, в качестве индивидуального индекса опасности применяется среднее значение индивидуальных индексов.

Также целесообразно проводить сравнение индивидуальных индексов текущего года с прошедшим. Такое сравнение позволяет определить эффективность принятых мер по снижению влияния опасностей, а также необходимость разработки дополнительных мероприятий.

**Блок 4. Формирование базы данных. Нейросетевой анализ полученных данных. Выбор приоритетных опасностей.**

Учет стохастических и нестохастических факторов предлагается осуществлять посредством формирования электронной базы данных с отображением в ней результатов контроля и оценки. Для дальнейшего нейросетевого анализа и определения приоритетных опасностей предлагается использовать многослойные нейронные сети, представляющие собой множество нейронов, связанных между собой [14]. Многослойные нейронные сети характеризуются такими параметрами и свойствами, как  $M$  – число слоев сети,  $N_\mu$  – число нейронов  $\mu$ -го слоя, связи между нейронами в слое отсутствуют, нейроны соседних слоев соединяются между собой: выходы нейронов  $\mu$ -го слоя,  $\mu = 1, 2, \dots, (M - 1)$  поступают на входы нейронов только следующего  $(\mu + 1)$ -го слоя. Внешний векторный сигнал  $x$  поступает на входы нейронов только первого слоя, выходы нейронов последнего,  $M$ -го слоя, образуют вектор выходов сети  $y(M)$ . Каждый  $j$ -й нейрон  $\mu$ -го слоя ( $\mu j$ -й нейрон) преобразует входной вектор  $x(\mu, j)$  в выходную скалярную величину  $y(\mu, j)$  [14]:

$$y(\mu, j) = \Psi \left( w^{(\mu, j)} + \sum_{i=1}^{N_{\mu-1}} w^{(\mu, j)} x^{(\mu, j)} \right), \quad (1)$$

где  $w^{(\mu, j)}$  – вес  $i$ -го входа  $j$ -го нейрона  $\mu$ -го слоя;

$\Psi$  – монотонная и ограниченная функция активации.

Предлагается следующий алгоритм оценки значимости опасности на основе многослойной нейронной сети:

1. Загрузка и подготовка данных, необходимых для работы нейросети (библиотеки для манипуляции массивов и чтения csv-файлов, библиотеки для построения и обучения нейросети, библиотеки для нормализации исходных данных и их разделение на обучающий и тестовые наборы).

2. Создание модели нейронной сети и ее обучение на основе обучающего множества данных с помощью определенного алгоритма.

3. Нейросетевой анализ опасностей (эвристическая оценка значимости опасностей, оценка значимости с фиксацией значений опасностей, комбинированный отбор опасностей) [14]. Исключение опасностей со значимостями меньше пороговых (пороговое значение задается пользователем от 0 до 1).

4. Формирование перечня приоритетных опасностей. Полученную выборку опасностей предлагается принять как приоритетные опасности, обеспечить их учет в базе данных и обеспечить последующее управление ими.

**Заключение.** Предлагаемая методика, а также ее цифровая модель, в т.ч. интегрированная в общую цифровую модель управления рисками в области охраны труда объектов топливной и химической отрасли, позволяет оперативно и эффективно провести процедуру идентификации опасностей, определить и обеспечить оперативное управление неприемлемыми рисками, а также снизить риск возникновения внештатных

ситуаций и несчастных случаев на опасных производственных объектах<sup>3,4,5,6</sup> [15]. Предлагаемый алгоритм позволяет сформировать личностные критерии для конкретной профессии, исключить прием на работу людей, не обладающих соответствующими профессиональными важными качествами, а также обеспечить постоянную актуализацию экспертной группы с возможностью привлечения в ее состав наиболее квалифицированных специалистов, повышения достоверности экспертных оценок и снижения неопределенности определения уровня профессионального риска объектов топливной и химической отрасли.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Старовойтов, И.Г. Методы оценки риска в системе управления охраной труда / И.Г. Старовойтов, В.А. Бирюк, Ю.А. Булавка // Вестн. Ун-та граждан. защиты МЧС Респ. Беларусь. – 2018. – № 1, т. 2. – С. 5–17.
2. Булавка, Ю.А. Современное состояние и совершенствование методики экспертной оценки профессионального риска на рабочих местах / Ю.А. Булавка // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – № 3. – С. 156–163.
3. Булавка, Ю.А. Концептуальный подход к оценке профессионального риска на опасных производственных объектах / Ю.А. Булавка, О.О. Смиловенко // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2013. – Т. 8, № 1. – С. 125–131.
4. Булавка, Ю.А. Совершенствование технологии экспертной оценки профессионального риска на рабочих местах / Ю.А. Булавка // Безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 7. – С. 9–15.
5. Булавка, Ю.А. Развитие комплексной оценки профессионального риска путем учета суммарной вредности условий труда / Ю.А. Булавка // Гигиена и санитария. – 2013. – № 4. – С. 47–54.
6. Булавка, Ю.А. Нечетко-множественный подход к экспертной оценке профессиональных рисков на примере условий труда работников нефтеперерабатывающего завода / Ю.А. Булавка // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундамент. науки. – 2013. – № 12. – С. 59–66.
7. Булавка, Ю.А. Анализ влияния экологически неблагоприятных условий труда на состояние здоровья работников производства смазочных масел и битумов / Ю.А. Булавка // Актуальные вопросы антропологии / Ин-т истории НАН Беларуси. – Минск : Беларус. навука, 2014. – Вып. 9. – С. 349–360.
8. Булавка, Ю.А. Анализ последствий воздействия производственных факторов на состояние здоровья работающих на нефтеперерабатывающем предприятии / Ю.А. Булавка // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 11. – С. 144–149.
9. Kozhemyatov, K.Y. The improving of the safety level of the equipment working under excessive pressure / K.Y. Kozhemyatov, Y.A. Bulavka // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. – 2019. – Vol. 2. – P. 822–831. DOI: 10.1201/9781003014638
10. Сердцов, И.С. Управление рисками в области промышленной безопасности, охраны труда и окружающей среды / И.С. Сердцов // Молодой ученый. – 2020. – № 7 (297). – С. 54–56.
11. Булавка, Ю.А. Анализ производственного травматизма на нефтеперерабатывающем предприятии / Ю.А. Булавка // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 3. – С. 130–137.
12. Самусевич, В.Н. Выбор экспертной группы для оценки профессионального риска / В.Н. Самусевич, Ю.А. Булавка // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2021. – № 3. – С. 61–66.
13. Горжанов, В.В. Расчет рисков при разработке мероприятий по охране труда в процессе дипломного проектирования / В.В. Горжанов, В.С. Волобуев // Высш. техн. образование. – 2017. – Т. 1, № 1. – С. 46–51.
14. Дубровин, В.И. Оценка значимости признаков на основе многослойных нейронных сетей в задачах диагностики и распознавания / В.И. Дубровин, С.А. Субботин // Информатика и системы управления. – 2002. – № 1(3). – С. 66–72.
15. Булавка, Ю.А. Использование цифровых инструментов интегрированных решений в области охраны труда / Ю.А. Булавка, В.Н. Самусевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2019. – № 11. – С. 72–81.

## REFERENCES

1. Starovoytov, I.G., Biryuk V.A. & Bulavka Yu.A. (2018). Metody otsenki riska v sisteme upravleniya okhranoy truda [Risk assessment methods in the labor protection management system]. *Vestnik Universiteta grazhdanskoj zashchity MCHS Resp. Belarus' [Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic Belarus]*, 1 (T. 2), 15–17. (In Russ., abstr. in Engl.).

<sup>3</sup> Булавка, Ю.А. Цифровая трансформация в обеспечении охраны труда в нефтегазовой отрасли / Ю.А. Булавка, В.Н. Самусевич // Нефть и газ – 2020 : сб. тез. докл. 74-й Междунар. молодеж. науч. конф., Москва, 28 сент.–02 окт. 2020 г. – М. : РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2020. – Т. 4. – С. 264–265.

<sup>4</sup> Булавка, Ю.А. Цифровые технологии в системах управления охраной труда на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях / Ю.А. Булавка, В.Н. Самусевич // Актуальные задачи нефтегазохимического комплекса : материалы науч.-практ. конф., Москва, 19–20 нояб. 2020 г. – М. : РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2020. – С. 25–27.

<sup>5</sup> Булавка, Ю.А. Цифровые технологии в обеспечении безопасности труда в нефтегазовой отрасли / Ю.А. Булавка, В.Н. Самусевич // Современные технологии извлечения нефти и газа. Перспективы развития минерально-сырьевого комплекса (российский и мировой опыт : сб. материалов III междунар. науч.-практ. конф. им. В.И. Кудинова, Ижевск, 21–22 мая 2020 г. – Ижевск: Удмуртский университет, 2020. – С. 220–221.

<sup>6</sup> Самусевич, В.Н. Цифровая трансформация в обеспечении безопасности труда в нефтегазовой отрасли / В.Н. Самусевич, Ю.А. Булавка // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы : сб. материалов XIV междунар. науч.-практ. конф. курсантов (студентов), слушателей и адъюнктов (аспирантов, соискателей) ученых. В 2 т. – Минск : УГЗ, 2020. – Т. 2. – С. 225–227.

2. Bulavka, Yu.A. (2013). Sovremennoye sostoyaniye i sovershenstvovaniye metodiki ekspertnoy otsenki professional'nogo riska na rabochikh mestakh [Current state and improvement of the methodology of expert assessment of occupational risk in the workplace]. *Vestnik Polotsogo gosudarstvennogo universitetata. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnyye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Sciences], (3), 156–163. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Bulavka, Yu.A. & Smilovenko, O.O. (2013). Kontseptual'nyy podkhod k otsenke professional'nogo riska na opasnykh proizvodstvennykh ob'yektakh [Conceptual approach to occupational risk assessment at hazardous production facilities]. *Chrezvychaynyye situatsii: obrazovaniye i nauka* [Emergencies: education and science], 1 (T. 2), 125–131. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Bulavka, Yu.A. (2013). Sovershenstvovaniye tekhnologii ekspertnoy otsenki professional'nogo riska na rabochikh mestakh [Improving the technology of expert assessment of occupational risk in the workplace]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life safety], (7), 9–15. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Bulavka, Yu.A. (2013). Razvitiye kompleksnoy otsenki professional'nogo riska putem ucheta summarnoy vrednosti usloviy truda [Development of a comprehensive assessment of occupational risk by taking into account the total harmfulness of working conditions]. [Gigiyena i sanitariya], (4), 47–54. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Bulavka, Yu.A. (2013). Nechetko-mnozhestvennyy podkhod k ekspertnoy otsenke professional'nykh riskov na primere usloviy truda rabotnikov neftepererabatyvayushchego zavoda [Fuzzy-multiple approach to expert assessment of professional risks on the example of working conditions of oil refinery workers]. *Vestnik Polotsogo gosudarstvennogo universitetata. Seriya S, Fundamental'nyye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series S, Fundamental sciences], (12), 59–66. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Bulavka, Yu.A. (2014). Analiz vliyaniya ekologicheskoi neblagopriyatnykh usloviy truda na sostoyaniye zdorov'ya rabotnikov proizvodstva smazochnykh masel i bitumov [Analysis of the influence of environmentally unfavorable working conditions on the health status of workers in the production of lubricating oils and bitumens]. *Aktual'nyye voprosy antropologii*. [Topical issues of anthropology], (9). Minsk: Belaruskaya navuka. (In Russ.).
8. Bulavka, Yu.A. (2016). Analiz posledstviy vozdeystviya proizvodstvennykh faktorov na sostoyaniye zdorov'ya rabotayushchikh na neftepererabatyvayushchem predpriyatii [Analysis of the consequences of the impact of production factors on the health status of workers at an oil refinery]. *Vestnik Polotsogo gosudarstvennogo universitetata. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnyye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Sciences], (11), 144–149. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Kozhemyatov, K.Y. & Bulauka, Y.A. (2019). The improving of the safety level of the equipment working under excessive pressure. *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources*, (2), 822–831. DOI: 10.1201/9781003014638
10. Serdtsov, I.S. (2020). Upravleniye riskami v oblasti promyshlennoy bezopasnosti, okhrany truda i okruzhayushchey sredy [Risk management in the field of industrial safety, labor protection and the environment]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 7(297), 54–56. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Bulavka, Yu.A. (2011). Analiz proizvodstvennogo travmatizma na neftepererabatyvayushchem predpriyatii [Analysis of occupational injuries at an oil refinery]. *Vestnik Polotsogo gosudarstvennogo universitetata. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnyye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Sciences], (3), 130–137. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Samusevich, V.N. & Bulauka, Y.A. (2021). Vybor ekspertnoy gruppy dlya otsenki professional'nogo riska [Selection of an expert group for occupational risk assessment]. *Vestnik Polotsogo gosudarstvennogo universitetata. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnyye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Sciences], (3), 61–66. (In Russ., abstr. in Engl.).
13. Gorzhanov, V.V. & Volobuyev, V.S. (2017). Raschet riskov pri razrabotke meropriyatiy po okhrane truda v protsesse diplomnogo proyekt-tirovaniya [Calculation of risks in the development of labor protection measures in the process of diploma design]. *Vysshye tekhnicheskoye obrazovaniye* [Higher technical education], T. 1 (№ 1), 46–51. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Dubrovin, V.I. & Subbotin, S.A. (2002). Otsenka znachimosti priznakov na osnove mnogosloynnykh neyronnykh setey v zadachakh dia-gnostiki i raspoznavaniya [Estimation of the significance of features based on multilayer neural networks in the problems of diagnostics and recognition]. *Informatika i sistemy upravleniya* [Informatics and control systems], 1(3), 66–76. (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Bulauka, Y.A. & Samusevich, V.N. (2019). Ispol'zovaniye tsifrovyykh instrumentov integrirovannykh resheniy v oblasti okhrany truda [The use of digital tools for integrated solutions in the field of labor protection]. *Vestnik Polotsogo gosudarstvennogo universitetata. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnyye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Sciences], (11), 72–81. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 28.11.2021

## ALGORITHM OF OCCUPATIONAL RISK MANAGEMENT IN ORGANIZATIONS OF THE FUEL AND CHEMICAL INDUSTRY

V. SAMUSEVICH, Yu. BULAUKA

*This article proposes an algorithm for managing occupational risks in fuel and chemical organizations. The proposed algorithm includes the analysis of stochastic and non-stochastic hazards, assessment of their significance and selection of the highest priority hazards using a neural network method of analysis. Digitalization of the proposed methodology allows to carry out the hazard identification procedure quickly and efficiently, to identify and ensure operational management of priority hazards, as well as to reduce the risk of emergency situations and accidents at hazardous production facilities.*

**Keywords:** occupational health and safety, hazard identification, fuel industry, chemical industry occupational risk.

УДК 620.172: 620.178

## РЕМОНТ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

*д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ*

*(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

*Обоснована техническая и экономическая целесообразность ремонта металлических конструкции предприятий нефтехимического комплекса. Раскрыто содержание ремонта, с помощью которого устраняют эксплуатационные повреждения и полностью восстанавливают ресурс конструкций. Подробно описаны технологические операции ремонта: приемка в ремонт, очистка и определение технического состояния частей конструкций, вырезание поврежденных частей, заготовительные работы по изготовлению заменяющих частей, замена поврежденных частей новыми, окрашивание и контроль. Предложенный технологический процесс обеспечивает нормативное качество объекта.*

**Ключевые слова:** *металлическая конструкция, ремонт, ресурс, нефтехимический комплекс.*

**Введение.** Необходимость содержания в исправном состоянии металлических конструкции предприятий нефтехимического комплекса при использовании их по назначению в течение установленного срока службы предполагает проведение ремонтных работ, которые необходимы для экономически обоснованного устранения образовавшихся повреждений и восстановления ресурса. Целесообразность ремонта заключается в том, что в конструкциях заложен большой эксплуатационный ресурс, который, по мере его расходования, может быть восстановлен с затратами труда и материалов существенно меньшими, чем требуется при изготовлении этих конструкций. Ремонту подлежат технологическое оборудование [1], суда [2], автомобили и многие другие ремонтпригодные объекты [3].

**Основная часть.** При изготовлении трубопроводов и технологических установок предприятий нефтехимического комплекса преимущественно используют четыре группы сталей: конструкционные углеродистые (Ст3, сталь 20 и др.); низколегированные кремнемарганцевые (16ГС, 09Г2С, 10Г2С1 и др.); теплоустойчивые (12ХМ, 15ХМ, 15Х5М, 13Х9М и др.); коррозионностойкие (08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т и др.).

Ремонт, в зависимости от объема выполняемых работ и степени восстановления ресурса, может быть: малым, средним, капитальным. Малый ремонт – наименьший по трудоемкости, при нем заменяют неосновные части без восстановления ресурса. Средний ремонт производится с заменой ограниченной номенклатуры частей и частичным восстановлением ресурса. Капитальный ремонт наиболее трудоемкий, при нем полностью восстанавливают ресурс объекта. Малый ремонт выполняют по потребности, а средний и капитальный – спустя установленную наработку изделия.

Технологический процесс наиболее сложного капитального ремонта металлических конструкций состоит из следующих основных операций: приемки в ремонт, очистки и определения технического состояния частей объекта, вырезания поврежденных частей, заготовительных работ по изготовлению заменяющих частей, замену поврежденных частей новыми, окрашивание и контроль изделия.

При направлении металлической конструкции предприятия в ремонт разрабатывают ремонтный чертеж, в котором приводят: изображение изделия, технические требования к нему, спецификацию сборочного чертежа, таблицу повреждений с указанием способов их устранения. Чертежи утверждают на предприятии в установленном порядке. При разработке рабочих чертежей не допускается в результате ремонта уменьшать площадь поперечных сечений элементов и длину сварных швов конструкций.

Большие размеры металлических конструкций исключают использование традиционных способов очистки в жидких растворах технических моющих средств, а также дробе- и пескоструйную очистку. Применяют очистку щетками или скребками до металлического блеска поверхностей.

При длительной эксплуатации металлических конструкций в них возникают следующие повреждения:

- остаточные деформации изгиба пространственных элементов;
- ослабление заклепок и разрушение сварных швов;
- трещины в отдельных элементах.

Деформации элементов конструкций определяют с помощью линейек. Ослабленные заклепки находят наощупь или по звуку, излучаемому при ударе по заклепке специальным молотком. Разрушенные сварные швы и трещины от ударов конструкции определяют визуально.

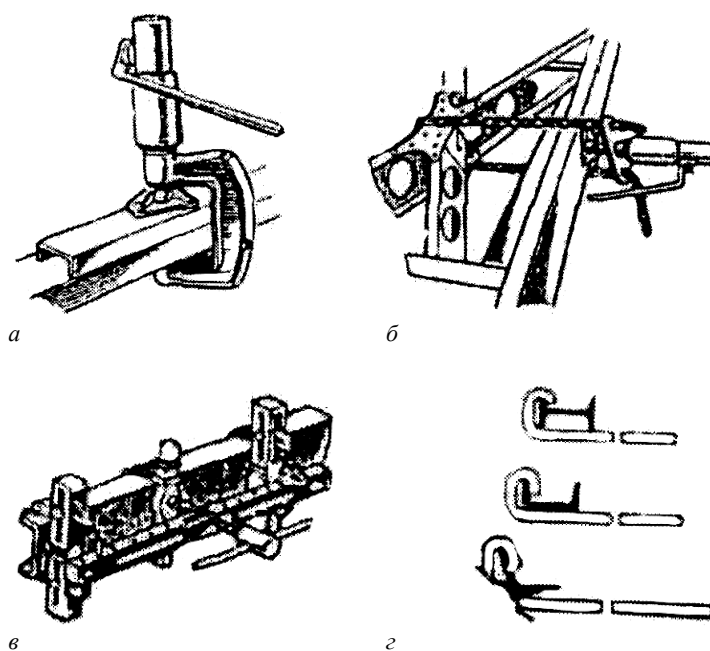
Для выявления зрительно неразличимых усталостных трещин применяют люминесцентный и ультразвуковой способы. Люминесцентный способ состоит в следующем. На поверхность детали наносят флуоресциру-

ющую жидкость (25% трансформаторного масла, 50% керосина, 25% бензина и 0,25 г дефектоля на 1 л). Через 10–15 мин поверхность детали сушат и посыпают тонким слоем порошка, способного адсорбировать впитавшуюся жидкость. Чаще для этого используют силикагель ( $\text{SiO}_2$ ). Жидкость, оставшаяся в трещинах, перемещается в порошок. Деталь облучают кварцевой лампой, под действием лучей которой на поверхности образуются светящиеся линии. По ширине светящейся полоски судят о глубине трещины. Для ультразвуковой дефектоскопии используют приборы ДУК-66ПМ, УД-10П, УД-13П, УД15П. Они рекомендуются также для выявления трещин в сварочных швах металлических конструкций.

Поврежденные части металлических конструкций вырезают шлифмашинами. Листовые ремонтные заготовки вырезают на параллельных ножницах, а заготовки из уголков и швеллеров – на пресс-ножницах.

Металл для ремонта металлических конструкций должен соответствовать металлу, используемому при их изготовлении. При отсутствии необходимых данных о материалах следует, для определения марки стали, произвести химический анализ. Рекомендуется для ремонта металлоконструкций, работающих на открытом воздухе при температуре до  $-40$  °С, применять мартеновскую сталь спокойной плавки. На все используемые для ремонта материалы должны быть сертификаты соответствия и происхождения завода-изготовителя.

Если в металлической конструкции имеются элементы с прогибами (изгибы стоек и раскосов ферм, полки уголков нижних или верхних поясов ферм), то допускается их правка в холодном состоянии при условии, что прогиб не превышает 3% свободной длины элементов. Холодную правку осуществляют с приложением статической нагрузки и только при положительной температуре воздуха. Правку можно выполнять посредством струбцин, домкратов, скоб и рычагов (рисунок 1).



а – струбцина; б – домкрат; в – скобы; г – рычаги

Рисунок 1. – Приспособления для правки металлических конструкций

Вмятины, которые не поддаются правке, устраняют приваркой ребер жесткости (рисунок 2). При значительном изгибе элементов допускается их правка с нагревом до  $900$ – $1150$  °С (от вишневого до оранжевого цвета каления). Правку с нагревом до  $700$ – $1100$  °С применяют для элементов из углеродистых сталей, до  $900$ – $1150$  °С – для элементов из низколегированных сталей. Деформированные элементы металлоконструкций нагревают горелкой с выпуклой стороны в месте наибольшей деформации.

Правка деформированных элементов с валиковыми швами ударами не допускается. Правку нужно прекращать при температуре ниже  $700$  °С (красный цвет каления).

Стержневые деформированные элементы с незначительным прогибом исправляют на месте без подогрева с помощью винтового или гидравлического домкрата, установленного на деревянные брусья (рисунок 3). Деревянная прокладка 3 придает устойчивость домкрату за счет большого коэффициента трения дерева по стали в сравнении с коэффициентом трения стали по стали (позиция I). Дефектный элемент на ребре, имеющий большой изгиб и трещину, заменяют новым (позиция II).

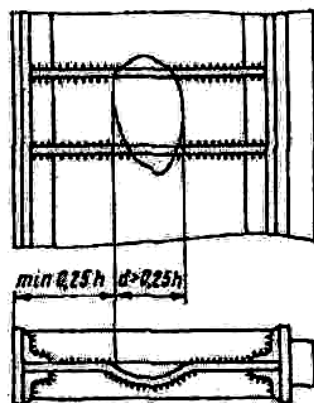


Рисунок 2. – Схема приварки ребер жесткости

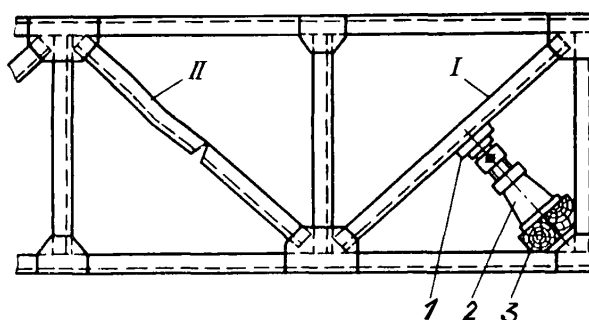
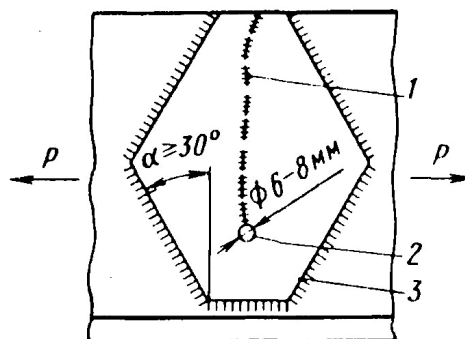
I – правкой домкратом; II – заменой новым стержнем;  
1 – подкладка; 2 – домкрат; 3 – брус

Рисунок 3. – Схема ремонта стержневых элементов металлоконструкции

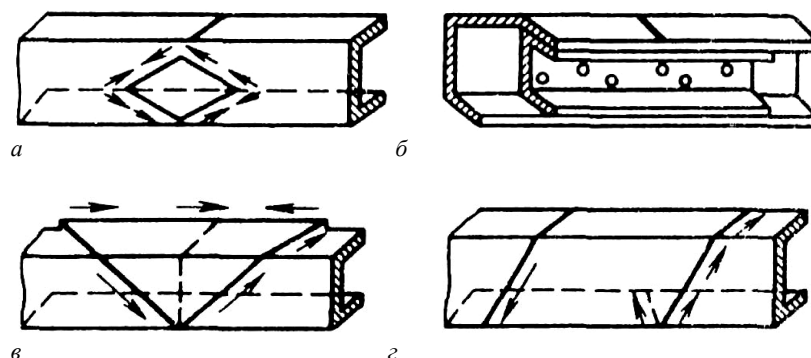
Трещины в листовых элементах металлоконструкций устраняют заваркой. Кромки трещины *I* (рисунок 4) в направлении возможного ее развития разделяют, в конце разделки сверлят отверстие 2, место вокруг трещины зачищают до металлического блеска. Отверстие в конце трещины снижает концентрацию напряжений и предупреждает ее дальнейшее развитие. Глубина, вид разделки и диаметр отверстия зависят от толщины свариваемого металла. Трещину заваривают электродом Э42А-Ф (если конструкция выполнена из углеродистых сталей) и Э50А-Ф (конструкция из низколегированных сталей), оставляя отверстие незаваренным. Ответственные элементы при этом усиливают установкой накладки 3 (толщиной 0,6–0,7 от толщины завариваемого элемента). Приварку накладки следует выполнять фланговыми швами, избегая наложения усиленных и поперечных швов.



1 – трещина; 2 – отверстие; 3 – накладка

Рисунок 4. – Схема заделки трещины установкой усиливающей накладки

При реконструкции металлических конструкций возникает необходимость их усиления. Схемы усиления конструкции приваркой накладок показаны на рисунке 5.



*a, в, г* – наложение усилительных накладок;  
*б* – усиление вставкой на заклепках в лонжеронах

Рисунок 5. – Схемы ремонта установкой накладок и заменой дефектного участка

Элементы конструкции, которые потеряли в результате коррозии более 5% первоначальной толщины с двумя и более усталостными трещинами, значительными по длине и опасными по расположению; с повторными усталостными трещинами в том месте, в котором они уже были однажды заварены, или рядом; а также с резкими изгибами в месте деформации необходимо удалить и заменить новыми. Заменяются элементы конструкции с трещинами в полках или надрывах, а также элементы, которые не обеспечивают после ремонта требуемой несущей способности. Если узел имеет значительное количество дефектов, то его также следует заменить новым.

Перед сваркой узлов следует обязательно проверить:

- соответствие размеров деталей-накладок их чертежам, наличие сертификатов на металл; на деталях должна быть маркировка, перенесенная с основного металла контролером ОТК;
- правильность разделки металла под сварочные швы и соответствующие зазоры в сборке между деталями, подлежащими сварке. Размеры сварочных швов необходимо устанавливать в соответствии с толщиной металла свариваемых деталей или определять расчетом.

При выполнении сварочных работ под открытым небом при температуре ниже 0 °С рабочее место сварщика должно быть защищено от ветра и попадания осадков. Наименьшая отрицательная температура, при которой разрешается производить сварочные работы на металлических конструкциях (таблица 1), должна быть согласована с местным органом Госгортехнадзора.

Таблица 1. – Минимально допустимая начальная температура (°С) стали при ручной и полуавтоматической дуговой сварке без предварительного подогрева

Толщина стали, мм	Наименьшая температура стали до сварки, °С	
	Углеродистая сталь, $T_1/T_2$	Низколегированная сталь, $T_1/T_2$
До 16 (включительно)	-30/-30	-20/-20
Свыше 16 до 30	-30/-20	-10/0
Свыше 30 до 40	-10/-10	0/+5
Свыше 40	0/0	+5/+10

Примечание.  $T_1$  – температура для решетчатых конструкций,  $T_2$  – температура для листовых конструкций

Сварные швы не должны иметь неровности, пористость, непровары, раковины, незаплавленные кратеры, трещины в основном или наплавленном металле, а также не допускаются подрезы основного металла и неправильная высота швов. Сварщик, выполнивший шов, должен поставить личное клеймо в начале и в конце сварочного шва. На сварочных швах, которые сосредоточены в одном месте, разрешено ставить одно клеймо сварщика.

Качество сварных соединений контролируют просвечиванием не менее 25% длины стыковых сварных швов рентгеновскими или гамма-лучами.

Проверку механических свойств сварного соединения на контрольных образцах следует выполнять независимо от вида сварного соединения, испытывая на растяжение и изгиб образцы, которые сварены встык. В образцах, предназначенных для испытаний на изгиб, сварной шов нужно располагать поперек образца. Результаты испытаний можно считать удовлетворительными, если временное сопротивление материала сварного шва не менее нижнего значения предела прочности основного металла, установленного для данной марки стали по ГОСТ; угол загиба образца должен быть не менее 90 °С. Для некоторых образцов допускается снижение прочностных показателей не более 10%. Число образцов, свариваемых сварщиком на неспециализирован-

ном для ремонта заводе, должно быть не менее двух для каждого вида испытаний (изгиб, растяжение). Дефектные участки сварных швов, которые были выявлены при контроле, должны быть вырублены и переварены.

В клепаных элементах металлических конструкций все расшатавшиеся заклепки заменяют новыми увеличенного размера. Отверстия под заклепку рассверливают. Заклепки диаметром до 12 мм разрешается клепать в холодном состоянии, свыше 12 мм – с нагревом до 1100–1200 °С. В один прием может быть удалена только одна заклепка, заменять последующую заклепку можно только после установки предыдущей.

Резьбовые отверстия под болты и шпильки восстанавливают путем нарезания резьбы увеличенного размера. Если необходимо сохранить номинальный размер резьбового соединения, то изношенное отверстие рассверливают, нарезают новую резьбу увеличенного размера, в которую ввертывают и плотно стопорят пробку, а затем в ней нарезают резьбу номинального размера.

Узлы металлических конструкций следует собирать на плитах или стендах, которые гарантируют правильное расположение деталей. Сборочное усилие не должно создавать в деталях прогибы или упругие деформации.

После ремонта проверяется качество его выполнения. Цель проверки – обеспечить последующую надежную работу конструкции. Контролер ОТК проверяет соответствие материала, геометрических параметров деталей и твердости поверхностей после термической обработки требованиям ремонтных чертежей.

После выполнения ремонта металлическую конструкцию окрашивают. Технологический процесс окрашивания включает операции подготовки поверхности, нанесения грунта и эмали с последующей сушкой лакокрасочного покрытия. Для облегчения нанесения краски рекомендуется ее предварительно разбавить и подогреть, что снижает ее вязкость, улучшает растекаемость и прочность соединения с поверхностью.

Перед окрашиванием металлические конструкции нужно очистить от старой краски металлическими щетками. Места, на которых она отслоилась, необходимо зачистить до металлического блеска и загрунтовать. Старую краску можно удалить 5%-ным раствором каустической соды, нагретым до температуры 75–80 °С, с последующей очисткой металлическими проволочными щетками или абразивными кругами. Применение термических способов снятия краски путем ее выжигания в пламени газовой горелки или паяльной лампы не рекомендуется, т.к. можно повредить наружный слой металла.

Конструкцию окрашивают масляными красками при ее эксплуатации в закрытом помещении. При работе крана на открытом воздухе или в цехах с большим содержанием в воздухе различных газов необходимо применять атмосферостойкие краски. Для окрашивания чаще всего используют краску желтого цвета, алюминиевую пудру с применением лака.

Лакокрасочные материалы (ЛКМ) наносят на подготовленные поверхности кистью или при помощи краскораспылителей. Лучшее качество окрашивания обеспечивает безвоздушное распыление ЛКМ, которое состоит в том, что ЛКМ нагревают до температуры 40–100 °С и под давлением 4–10 МПа подают к распылительному устройству. Факел распыления формируется за счет перепада давления при выходе ЛКМ из сопла распылителя и последующего быстрого испарения части нагретого растворителя, которое сопровождается значительным его расширением. Потери материала при этом составляют только 5–12%. Производительность безвоздушного распыления почти в два раза больше, чем воздушного.

Для ремонтного окрашивания поверхностей применяют грунтовки с инертными пигментами (ГФ-21, ФЛ-03К, ФЛ-03КК, НЦ-081); пассивирующие (ГФ-017, ФЛ-03Ж, КФ-030); содержащие цинковый крон, хроматы и др., протекторные ПС-1, ЭП-057); содержащие металлический порошок с более отрицательным потенциалом, чем железо, фосфатирующие (ВЛ-02, ВЛ-023) и преобразователи ржавчины (Э-ВА-01ГИСИ, Э-ВА-0112, Э-ВА-013ЖТ). Наиболее применяемые эмали для ремонтного окрашивания, растворители и режимы сушки приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Эмали, применяемые для ремонтного окрашивания

Эмали	Режим сушки		Растворитель	Вязкость по ВЗ-4, с
	Температура, °С	Время, мин		
МЛ-197 разных цветов	100–110	30	Р-197 или 647	20–24
МЛ-1198 с металлическим эффектом	130	30	Смесь ксилола с бутилацетатом 1:1	14–16
МЛ-12 разных цветов	130	35	Р-198 или 646	23–24
МЛ-152 разных цветов	85–90	60	Сольвент	23–24
	100–105	35		
МЛ-1195 однопигментная	80	30	Ксилол	20–24
МЛ-1196 черная	100	30	Сольвент	18–22
МЧ-124 черная	110–120	30	Ксилол или сольвент	20–30
НЦ-273	18–22	20	646	22–25
МС-17	18–22	30	Сольвент или ксилол	20–25



Естественный процесс сушки конструкций занимает 1–2 дня. Трудоемкий и длительный процесс естественной сушки на воздухе заменяется терморadiационной сушкой. Определенные трудности вызывает окрашивание нижних плоскостей балочной конструкции. Для этой цели можно использовать автомобильную вышку. Если исключена возможность ее заезда в цех и проезда по нему, то рекомендуется выполнять окрашивание с подвесных лесов.

**Заключение.** Предложен процесс ремонта металлических конструкции предприятий нефтехимического комплекса, включающий приемку в ремонт, очистку и определение технического состояния частей, вырезания поврежденных частей, заготовительные работы по изготовлению заменяющих частей, замену поврежденных частей новыми, окрашивание, контроль и сдачу, обеспечивающий их нормативное качество с восстановлением ресурса, близкого к ресурсу нового объекта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пекелис, Г.Д. Технология ремонта металлорежущих станков – 3-е изд. перераб. и доп. / Г.Д. Пекелис, Б.Т. Гельберг. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. – 240 с.
2. Балякин, О.К. Технология судоремонта / О.К. Балякин. – М.: Транспорт, 1983. – 264 с.
3. Иванов, В.П. Обеспечение безопасной работы оборудования нефтехимического комплекса / В.П. Иванов, А.В. Крыленко. – Новополюцк: ПГУ, 2015. –180 с.

## REFERENCES

1. Pekelis, G.D. & Gel'berg, B.T. (1984). *Tekhnologiya remonta metallovezhushchikh stankov* [Technology of repair of machine tools]. Leningrad: Mashinostroyeniye, Leningradskoye otdeleniye. (In Russ.).
2. Balyakin, O.K. (1983). *Tekhnologiya sudoremonta* [Ship repair technology]. Moscow: Transport. (In Russ.).
3. Ivanov, V.P. & Krylenko, A.V. (2015). *Obespecheniye bezopasnoy raboty oborudovaniya neftekhimicheskogo kompleksa* [Ensuring the safe operation of equipment for the petrochemical complex]. Novopolotsk: PGU. (In Russ.).

Поступила 26.04.2022

**REPAIR OF METAL STRUCTURES  
OF ENTERPRISES PETROCHEMICAL COMPLEX**

V. IVANOV

*The technical and economic feasibility of repairing metal structures of petrochemical complex enterprises is substantiated. The content of the repair is disclosed, with the help of which operational damage is eliminated and the resource of structures is fully restored. The technological operations of repair are described in detail: acceptance for repair, cleaning and determination of the technical condition of parts of structures, cutting out damaged parts, procurement work for the manufacture of replacement parts, replacing damaged parts with new ones, painting and control. The proposed technological process ensures the normative quality of the object.*

**Keywords:** metal construction, repair, resource, petrochemical complex.

УДК 665.777.4

**ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПРОКАЛЕННОГО НЕФТЯНОГО КОКСА,  
ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ДИСТИЛЛЯТНОГО И ОСТАТОЧНОГО СЫРЬЯ****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>,**Е.В. СЮБАРЕВА**ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0137-9492>*(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

*Исследованы свойства прокаленного нефтяного кокса, полученного из дистиллятного и остаточного сырья. Установлено, что благодаря особенностям химического состава сырья процесса коксования наблюдается существенное отличие свойств и структуры полученного кокса. Проанализированы характеристики образцов кокса при адсорбции ими азота и паров воды. Найдены закономерности изменения потенциальной энергии адсорбции паров воды к адсорбции азота. Показано, что с увеличением содержания водорода в структуре прокаленного кокса или уменьшением отношения углерода к водороду энергия адсорбции паров воды к поверхности кокса увеличивается. Рассмотрено распределение микро- и мезопор в образцах прокаленного кокса. Выявлено, что использование в качестве адсорбтива паров воды позволяет изучить распределение микропор в нефтяном коксе в диапазоне от 0,24 до 0,8 нм. Определено наличие взаимосвязи сырья процесса коксования и микроструктуры получаемого кокса с распределением в его объеме микро- и мезопор.*

**Ключевые слова:** *прокаленный нефтяной кокс, удельная поверхность, пористость, адсорбция азота и паров воды*

**Введение.** Одним из основных направлений применения нефтяного кокса является металлургическая промышленность, где специально подготовленный прокаленный нефтяной кокс используется для изготовления анодной массы, графитированных электродов, в качестве сульфидирующего агента при производстве некоторых цветных металлов, в качестве абразивного материала и пр. [1].

Показатели качества и химический состав нефтяного кокса определяются свойством и происхождением сырья, а также технологическим режимом проведения процесса коксования. В качестве сырья процесса коксования могут использоваться тяжелые остаточные продукты переработки нефти и дистиллятные фракции, в т.ч. крекинг-остатки термического и каталитического крекинга [2].

Известно, что компоненты дистиллятного и остаточного происхождения, входящие в состав сырья процесса коксования, в частности, содержащиеся в них смолы и асфальтены, различаются как по элементному составу, так и по структуре. В остаточном и дистиллятном сырье, полученном из одной и той же нефти, содержится разное количество гетероатомных соединений и металлов, а входящие в состав остаточного сырья асфальтены более склонны к образованию трехмерных структур. В то же время в дистиллятном сырье содержатся молекулы, конденсированные преимущественно в двумерной плоскости. Это позволяет им иметь повышенную подвижность и, как следствие, иметь более плотную упаковку слоев [3].

В процессе прокаливания сырого, или так называемого «зеленого» кокса, из него вначале удаляется влага, летучие вещества и частично гетероатомные соединения. Кроме того, в процессе термообработки изменяется структура кокса, а также его пористость. Пористость нефтяного кокса оказывает существенное влияние на его удельную поверхность и сорбционные свойства. В связи с этим выявление закономерностей изменения структуры пор и адсорбционных характеристик прокаленного нефтяного кокса в зависимости от вида сырья процесса коксования и свойств получаемого прокаленного кокса в контексте изучения возможности использования его в качестве сорбционного материала является актуальной задачей.

**Основная часть.** В качестве объекта исследований были выбраны архивные образцы нефтяного кокса, прокаленного в промышленных барабанных печах, полученные в 1989 г. на нефтеперерабатывающем заводе в г. Красноводске (сейчас Туркменбашинский комплекс нефтеперерабатывающих заводов, Туркмения) из дистиллятных и остаточных компонентов малосернистых туркменских нефтей<sup>1,2</sup>. Свойства образцов и методы их испытаний представлены в таблице.

<sup>1</sup> Обзор рынка нефтяного кокса (сырого и прокаленного) в СНГ. – 23-е изд. – М.: Инфолайн, 2021. – 173 с.

<sup>2</sup> Нефти СССР: справ. / под ред. З.В. Дриацкая [и др.]. – М.: Химия, 1974. – Т. 4: Нефти Средней Азии, Казахстана, Сибири и о. Сахалин. – 792 с.

Таблица 1. – Свойства образцов нефтяного кокса, прокаленного в промышленных барабанных печах

Показатель	Значение для кокса		Метод испытания	
	из дистиллятного сырья	из остаточного сырья		
Зольность, % масс.	0	0,25	ГОСТ 22692	
Микроструктура, баллы	5	4	ГОСТ 26132	
Элементный состав, % масс.			Элементный анализатор UNICUBE в режиме CHNS	
– углерод (С)	98,25	98,01		
– водород (Н)	0,049	0,037		
– азот (N)	1,13	1,27		
– сера (S)	0,571	0,683		
Отношение углерод/водород С/Н	2005,1	2648,9	–	
Действительная плотность, г/см <sup>3</sup>	2,12	2,10	ГОСТ 22898, п. 4.4	
Удельная площадь поверхности по методу ВЕТ (Brunauer–Emmett–Teller), м <sup>2</sup> /г	0,41105	0,57496	Прибор для измерения адсорбции газа или пара BELSORP-max. Адсорбция азота при температуре 77 К	
Общий объем пор по методу ВЕТ, мм <sup>3</sup> /г	0,511	0,612		
Средний диаметр пор по методу ВЕТ, нм	4,9720	4,2594		
Средний диаметр мезопор по методу ВЖН, нм	3,4861	5,4405		
Средний диаметр микропор по методу НК, нм	1,1507	1,1215		
Суммарный объем микропор по методу НК, мм <sup>3</sup> /г	0,10566	0,16019		
Потенциальная энергия адсорбции по методу DA, Дж/моль	93,755	96,275		
Удельная площадь поверхности по методу ВЕТ, м <sup>2</sup> /г	0,13435	0,16621		Адсорбция паров воды при температуре 293 К и давлении 2,317 кПа
Общий объем пор по методу ВЕТ, мм <sup>3</sup> /г	0,216	0,168		
Средний диаметр пор по методу ВЕТ, нм	6,4298	4,044		
Средний диаметр микропор по методу НК, нм	1,018	1,1562		
Суммарный объем микропор по методу НК, мм <sup>3</sup> /г	0,09943	0,10193		
Потенциальная энергия адсорбции по методу DA, Дж/моль	3109,5	2231,1		
Отношение потенциальной энергии адсорбции паров воды к адсорбции азота по методу DA (метод Дубинина–Астахова) [4]	33,17	23,17	–	

Особенностью кокса, полученного из остаточного сырья, по сравнению с коксом из дистиллятного сырья, является повышенное содержание золы. Это объясняется тем, что именно в нефтяных остатках при переработке нефти накапливаются механические примеси и тяжелые металлы.

Имеются отличия и в микроструктуре кокса. Так, согласно ГОСТ 26132, структура прокаленного кокса из дистиллятного сырья соответствует 5 баллам, т.е. имеет крупноволокнистую структуру без какой-либо ориентации структурных элементов с размером волокон от 35 до 70 мкм. Структура кокса, полученного из остаточного сырья, средневолокнистая с размером волокон от 15 до 35 мкм, что соответствует 4 баллам по ГОСТ 26132. Вероятно, это связано с тем, что первичная структура нефтяного кокса формируется в процессе коксования сырья на стадии образования, роста и коалесценции мезофазы. Структура образующегося кокса также зависит от сырья, поступающего на коксование. Смолы и асфальтены дистиллятного и остаточного происхождения имеют различное пространственное расположение конденсированных циклов. В частности, молекулярная структура остаточного сырья менее подвижна и более склонна к образованию трехмерных структур. В дистиллятном сырье содержатся молекулы, конденсированные преимущественно в двумерной плоскости. Это позволяет им иметь повышенную подвижность и, как следствие, иметь более плотную упаковку слоев, т.е. более анизотропную структуру.

Сравнительный анализ элементного состава показал, что в коксе, полученном из дистиллятного сырья, содержание углерода и водорода выше, чем в коксе, полученном из остаточного сырья. При этом отношение углерод/водород в коксе из дистиллятного сырья ниже, что свидетельствует о более высоком относительном содержании углеводов в составе данного кокса. Содержание серы и азота выше в коксе, полученном из остаточного сырья.

Более высокая степень анизотропии и плотная упаковка слоев у кокса, полученного из дистиллятного сырья, по сравнению с коксом из остаточного сырья, придает ему более высокую плотность и меньшую удельную поверхность. При этом общий объем пор при адсорбции азота по методу ВЕТ уменьшается. Для изучения поверхностных характеристик образцов прокаленных коксов была взята фракция с размером частиц от 1 мм до 50 мкм. С целью дегазации и удаления адсорбированной воды предварительная подготовка образцов

проводилась методом вакуумирования при давлении 1 кПа и температуре 180 °С в течение 2 ч с последующим получением и анализом изотерм адсорбции/десорбции азота при температуре 77 К и паров воды при температуре 293 К.

При адсорбции паров воды удельная площадь поверхности у кокса из дистиллятного сырья также ниже, чем из остаточного сырья. Однако при этом общий объем пор при адсорбции паров воды у кокса из дистиллятного сырья существенно выше. Очевидно, это связано с особенностью свойств молекул адсорбтива. Так, молекулы паров воды меньше молекул азота; при этом молекулы азота неполярные, а молекулы воды полярные. Также они склонны к индукционному, ориентационному взаимодействию и образованию более сильных водородных связей. Об этом свидетельствует величина потенциальной энергии адсорбции паров воды по сравнению с азотом. Отношение потенциальной энергии адсорбции паров воды к адсорбции азота значительно выше у кокса, полученного из дистиллятного сырья, по сравнению с коксом, полученным из остаточного сырья.

Общей характеристикой исследуемых коксов является их крайне низкая удельная площадь поверхности, что указывает на их низкую пористость. Вероятно, это связано с температурой прокалики кокса. По данным [5] в процессе прокалики кокса его пористость вначале увеличивается, а затем уменьшается до минимума примерно при 1300 К, после чего происходит дальнейшее увеличение площади поверхности кокса.

Средний диаметр пор по методу ВЕТ у кокса, полученного из дистиллятного сырья, несколько выше, чем у кокса из остаточного сырья. Средний диаметр микропор с размером до 2 нм, определенный по методу НК (Horvath – Kawazoe) [6], при адсорбции азота выше у кокса, полученного из дистиллятного сырья. При этом суммарный объем микропор у данного образца ниже, чем у кокса, полученного из остаточного сырья. В коксе из остаточного сырья суммарный объем микропор выше как при использовании в качестве адсорбтива азота, так и паров воды. Однако распределение пор в исследуемых образцах по размерам различно (рисунок 1).

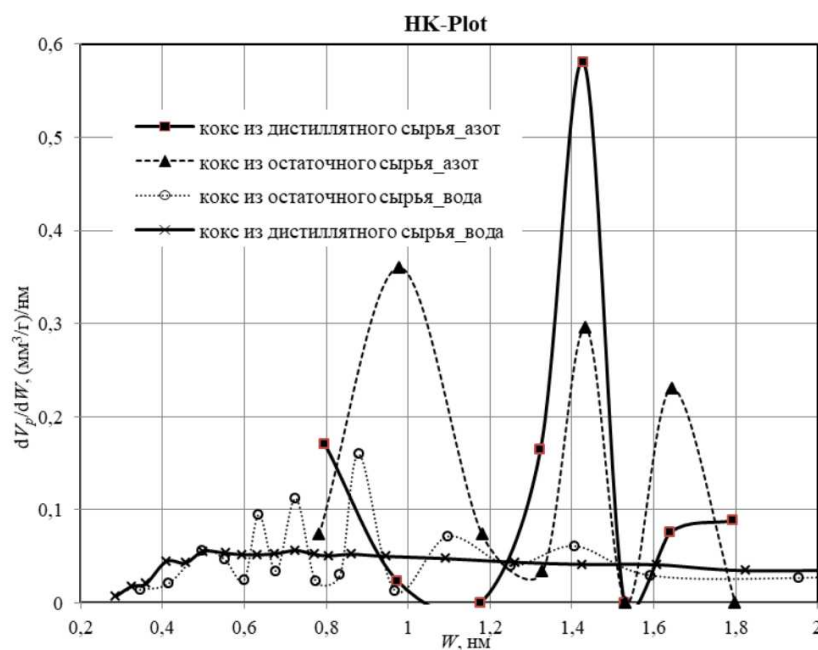


Рисунок 1. – Распределение микропор в образцах прокаленного кокса по методу НК

Следует обратить внимание на чувствительность метода НК при определении распределения пор по объему в диапазоне от 0,2 до 2 нм. Очевидно, она связана с размером молекул используемого адсорбтива. Известно, что диаметр молекулы воды равен 0,240 нм, а молекулы азота – 0,354 нм. Следовательно, использование паров воды в качестве адсорбтива позволяет изучать распределение пор в диапазоне (0,24–0,8) нм, в котором использование в качестве адсорбтива азота не эффективно. При этом с увеличением размеров пор более 0,8 нм наибольшая чувствительность метода НК отмечена при адсорбции азота. Вероятно, это связано с особенностью метода НК (Horvath – Kawazoe), разработанного в 1983 г., который позволяет рассчитать распределение микропор по размерам в области низких давлений на изотерме адсорбции. В методе НК сначала оценивается размер пор, а затем рассчитывается соответствующее относительное давление. Затем величина адсорбции при относительном давлении определяется с применением линейной интерполяции данных адсорбции. Интегральная кривая создается путем построения графика зависимости величины адсорбции от размера пор. Кривая распределения пор по размерам создается путем дифференцирования интегральной кривой. Метод НК не подходит для анализа пор, которые могут вызвать капиллярную конденсацию [7], что и имеет место при использовании в качестве адсорбтива паров воды в более крупных порах.

Сравнительный анализ кривых распределения микропор в образцах исследуемого кокса показал, что в коксе из остаточного сырья при прокалке формируются поры различного размера и объема. В то же время в коксе, полученном из дистиллятного сырья, формируется значительно меньше пор.

Изучение распределения мезопор в исследуемых образцах кокса проводилось по методу ВЖН (Barrett-Joyner-Halenda), разработанном в 1951 г. В основу модели положено допущение о цилиндрической форме пор и то, что радиус поры равен сумме радиуса Кельвина и толщины адсорбированной на стенке поры пленки [8]. Капиллярная конденсация в мезопорах описывается уравнением Кельвина, в которое входит радиус кривизны мениска, и это позволяет применять его для расчета функции распределения пор по размерам [9]. В качестве исходных данных для расчетов по методу ВЖН используют, как правило, десорбционную ветвь изотермы. Данным методом можно пользоваться при измерении адсорбции жидкого азота с температурой 77 К для размеров пор от 2 до 50 нм. Средний диаметр мезопор по методу ВЖН, у кокса, полученного из остаточного сырья, в 1,56 раза больше, чем у кокса из дистиллятного сырья. Распределение мезопор по методу ВЖН в образцах прокаленного кокса, полученного из дистиллятного и остаточного сырья, представлено на рисунке 2.

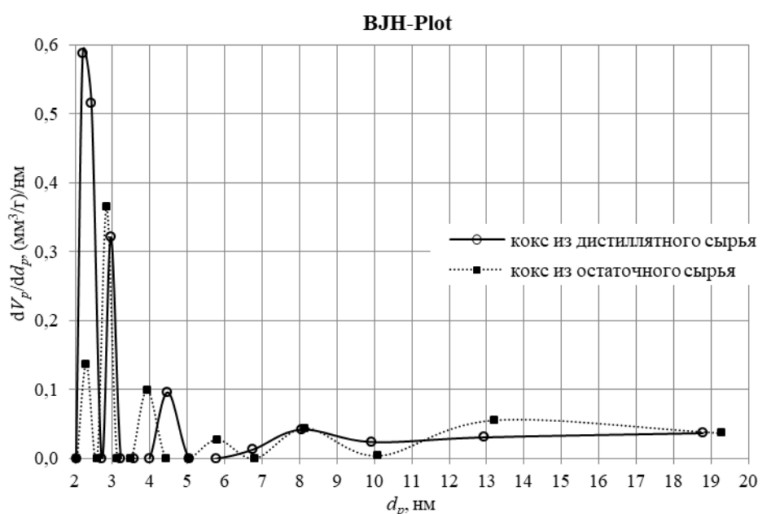


Рисунок 2. – Распределение мезопор в образцах прокаленного кокса по методу ВЖН

Основное количество мезопор в исследуемых образцах кокса имеют размер от 2 до 5 нм. При этом основной объем мезопор в коксе из дистиллятного сырья сосредоточен в диапазоне пор с размером 2,2–2,4 нм.

**Заключение.** В ходе проведенных исследований были изучены свойства прокаленного нефтяного кокса, полученного из дистиллятного и остаточного сырья. Установлено, что благодаря особенностям химического состава сырья процесса коксования наблюдается существенное отличие свойств и структуры полученного кокса. Нефтяной прокаленный кокс из дистиллятного сырья имеет более плотную и упорядоченную структуру с большей степенью анизотропии, чем кокс, полученный из остаточного сырья.

Общей особенностью исследуемых образцов прокаленного нефтяного кокса является низкая пористость и, как следствие, низкая удельная поверхность. Проанализированы характеристики образцов кокса при адсорбции ими азота и паров воды. Найдены закономерности изменения потенциальной энергии адсорбции паров воды к адсорбции азота. Показано, что с увеличением содержания водорода в структуре прокаленного кокса или уменьшения отношения углерода к водороду энергия адсорбции паров воды к поверхности кокса увеличивается.

Исследовано распределение микро- и мезопор в образцах прокаленного кокса. Выявлено, что использование в качестве адсорбтива паров воды позволяет изучить распределение микропор в нефтяном коксе в диапазоне от 0,24 до 0,8 нм. Определено наличие взаимосвязи сырья процесса коксования и микроструктуры получаемого кокса с распределением в его объеме микро- и мезопор.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гимаев, Р.Н. Нефтяной кокс / Р.Н. Гимаев, И.Р. Кузеев, Ю.М. Абыгильдин. – М. : Химия, 1992. – 80 с.
2. Варфоломеев, Д.Ф. Сырье коксования и эффективность его использования / Д.Ф. Варфоломеев, А.И. Стехун. – М. : ЦНИИТЭНЕФТЕХИМ, 1987. – 55 с.
3. Биктимирова, Т.Г. Тонкая структура нефтяных коксов / Т.Г. Биктимирова, М.М. Ахметов. – Уфа : Изд-во ГУП ИНХП РБ, 2010. – 112 с.
4. Дубинин, М.М. Адсорбция и пористость / М.М. Дубинин. – М. : Изд-во ВАХЗ, 1972. – 128 с.
5. Barrillon, E. Evolution thermique de la texture poreuse des cokes de petrole / E. Barrillon // Carbon. – 1967. – Vol. 5, Iss. 2. – P. 167–171. DOI: 10.1016/0008-6223(67)90070-x

6. Horvath, G. Method for the Calculation of Effective Pore Size Distribution in Molecular Sieve Carbon / G. Horvath, K. Kawazoe // *J. Chem. Eng. Japan*. – 1983. – Vol. 16, Iss. 6. – P. 470–475. DOI: 10.1252/jcej.16.470
7. Dombrowski, J.R. The Horvath–Kawazoe method revisited / R.J. Dombrowski, Ch.M. Lastoskie, D.R. Hyduke // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2001. – Vol. 187–188. – P. 23–39. DOI: 10.1016/S0927-7757(01)00618-5
8. Barrett, E.P. The Determination of Pore Volume and Area Distributions in Porous Substances. I. Computations from Nitrogen Isotherms / E.P. Barrett, L.G. Joyner, P.P. Halenda // *Journal of the American Chemical Society*. – 1951. – Vol. 73, Iss. 1. – P. 373–380. DOI: 10.1021/ja01145a126
9. Фролов, Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы / Ю.Г. Фролов. – М. : Химия, 1982. – 400 с.

## REFERENCES

1. Gimaev, R.N., Kuzeev, I.R. & Abygil'din, Yu.M. (1992). *Neftyanoi koks [Petroleum coke]*. Moscow : Khimiya. (In Russ.)
2. Varfolomeev, D.F. & Stekhun, A.I. (1987). *Syr'e koksovaniya i effektivnost' ego ispol'zovaniya [Coking feed and its use efficiency]*. Moscow: TSNIITENEFTEKHIM. (In Russ.)
3. Biktimirova, T.G. & Akhmetov, M.M. (2010). *Tonkaya struktura neftyanykh koksov [Fine structure of petroleum cokes]*. Ufa: Publishing house GUP INHP RB. (In Russ.)
4. Dubinin, M.M. (1972). *Adsorbtsiya i poristost' [Adsorption and porosity]*. Moscow: Publishing house VAKHZ. (In Russ.)
5. Barrillon, E. (1967). Evolution thermique de la texture poreuse des cokes de petrole. *Carbon*, 5(2), 167–171. DOI: 10.1016/0008-6223(67)90070-x
6. Horvath, G. & Kawazoe, K. (1983). Method for the Calculation of Effective Pore Size Distribution in Molecular Sieve Carbon. *J. Chem. Eng. Japan*, 16(6), 470–475. DOI: 10.1252/jcej.16.470
7. Dombrowski, R.J., Lastoskie, Ch.M. & Hyduke, D. R. (2001). The Horvath–Kawazoe method revisited. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 187–188, 23–39. DOI: 10.1016/S0927-7757(01)00618-5
8. Barrett, E.P., Joyner, L.G. & Halenda, P.P. (1951). The Determination of Pore Volume and Area Distributions in Porous Substances. I. Computations from Nitrogen Isotherms. *Journal of the American Chemical Society*, 73(1), 373–380. DOI: 10.1021/ja01145a126
9. Frolov, Yu.G. (1982). *Kurs kolloidnoi khimii. Poverkhnostnye yavleniya i dispersnye sistemy [Course of colloid chemistry. Surface phenomena and disperse systems]*. Moscow: Khimiya. (In Russ.)

Поступила 17.02.2022

## STUDY OF PROPERTIES OF CALCINED PETROLEUM COKE OBTAINED FROM DISTILLATE AND RESIDUAL RAW MATERIALS

D.YUKHNO, A. YERMAK, E. SYUBAREVA

*The properties of calcined petroleum coke obtained from distillate and residual raw materials have been studied. It has been established that due to the peculiarities of the chemical composition of the raw materials of the coking process, there is a significant difference in the properties and structure of the obtained coke. The characteristics of coke samples during the adsorption of nitrogen and water vapor are studied. Regularities have been established for the change in the potential energy of water vapor adsorption to nitrogen adsorption. It is shown that with an increase in the hydrogen content in the structure of the calcined coke or a decrease in the ratio of carbon to hydrogen, the energy of water vapor adsorption to the coke surface increases. The distribution of micro and mesopores in samples of calcined coke has been studied. It has been established that the use of water vapor as an adsorbent makes it possible to study the distribution of micropores in petroleum coke in the range from 0.24 to 0.8 nm. The presence of the relationship between the raw materials of the coking process and the microstructure of the resulting coke with the distribution of micro and mesopores in its volume was revealed.*

**Keywords:** calcined petroleum coke, specific surface area, porosity, adsorption of nitrogen and water vapor.

УДК 502.37:676.034.81

### АНАЛИЗ СОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ПО ОТНОШЕНИЮ К НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТАМ ПРИРОДНЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

канд. хим. наук, доц. С.Ф. ЯКУБОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Проанализированы возможности использования более двадцати образцов природных сорбционных материалов для ликвидации нефтяных загрязнений путем утилизации отходов деревообработки и сельского хозяйства. Рассмотрены основные физико-химические и эксплуатационные свойства растительных материалов: влажность, насыпная плотность, адсорбционная емкость по йоду и метиленовому синему, суммарный объем пор методом «молекулярных щупов» по воде, ацетону и толуолу. изучена адсорбция нефти и нефтепродуктов по ускоренному методу, водопоглощение, плавучесть и степень отжима. Рассмотренные сорбционные материалы сопоставимы с широко применяемыми в промышленности нефтяными сорбентами по эксплуатационным характеристикам и при этом в разы дешевле по стоимости.

**Ключевые слова:** нефтяное загрязнение, сорбент, сорбция, отходы лесного и сельского хозяйства.

**Введение.** Ежегодно в мире в окружающую среду от добывающих, транспортирующих и перерабатывающих предприятий поступает от 5 до 10 млн т нефти и нефтепродуктов (что составляет 5–7% от всего добытого и переработанного сырья) [1; 2]. Ликвидация нефтяных загрязнений не обходится без применения различного рода сорбционных материалов [2–11]. Особый интерес представляет поиск и исследование материалов, обладающих высокими сорбционными характеристиками и имеющих природное происхождение [2; 3], что и определило цель настоящего исследования.

**Методы исследований.** Предварительная подготовка растительных материалов к исследованию заключалась в высушивании, измельчении и сухом фракционировании на лабораторных ситах с отбором фракции гранулометрического состава 0,25–1 мм по ГОСТ 12536. Для образцов определена влажность по ГОСТ 12597, насыпная плотность по ГОСТ 16190, адсорбционная емкость по йоду и метиленовому синему по ГОСТ 6217 и ГОСТ 4453 соответственно. Методом «молекулярных щупов» по ГОСТ 17219 определен суммарный объем пор по воде, ацетону и толуолу. Испытание на адсорбцию нефти и нефтепродуктов выполняли по ускоренному методу по ГОСТ 33627 для адсорбента II типа. Водопоглощение образцов определяли по ГОСТ 24160, плавучесть и степень отжима – по методикам, приведенным в [4].

**Результаты и их обсуждение.** Выполнен анализ возможности использования природных сорбционных материалов для ликвидации нефтяных загрязнений путем утилизации отходов сельского и лесного хозяйств. Результаты анализа физико-химических свойств отобранных образцов природных растительных материалов приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Характеристика отобранных образцов фракции 0,25-1 мм

Образец	Влажность, % масс., по ГОСТ 12597	Насыпная плотность, г/дм <sup>3</sup> , по ГОСТ 16190	pH водной вытяжки по ГОСТ 32327
Шелуха ячменная	3,51	266	7,46
Шелуха гречихи	2,90	567	5,85
Шелуха арахиса	4,50	329	5,92
Шелуха подсолнечника	3,50	209	5,01
Околоплодник редьки	3,53	351	6,20
Околоплодник фасоли	5,48	475	5,10
Околоплодник боба	6,08	460	5,95
Околоплодник рапса	5,01	424	5,81
Солома злаковых культур	5,03	650	6,81
Смесь шелухи злаковых культур	4,45	564	5,88
Коробочки хлопчатника	6,50	204	4,35
Хвощ полевой	3,44	284	5,79
Опилки сосны	3,60	198	5,40
Кора сосны	4,90	241	4,68
Кора ольхи серой	4,04	497	5,34
Кора ели	4,93	355	4,49
Кора бука	3,93	519	6,93
Кора каштана	4,01	306	6,40
Кора березы	3,05	599	4,66
Кора акации	3,75	256	6,05

Содержание влаги в отходах сельского и лесного хозяйств не превышает 6,5% масс., что говорит о высокой способности к высушиванию образцов; потенциометрическим титрованием установлено, что водная вытяжка имеет слабокислую среду, кроме шелухи ячменной, для которой характерна нейтральная среда, а насыпная плотность образцов в среднем составляет 20–65 г/100 см<sup>3</sup>, что сопоставимо с промышленными сорбционными материалами. Статический угол смачивания изучаемых образцов водой больше 90°, что позволяет прогнозировать их хорошую плавучесть и водоотталкивающие свойства.

Результаты анализа адсорбционной активности по йоду и метиленовому синему, выполненные для исходных образцов фракции 0,25–1 мм в нативном виде, а также для высушенного остатка после обработки холодной и горячей водой и 1,5% мас. раствором гидроксида натрия приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Адсорбционная активность образцов по йоду и метиленовому синему

Образец	Активность по йоду, в %, по ГОСТ 6217				Активность по метиленовому синему, в мг/г, по ГОСТ 4453			
	Исходный	Обработан способом			Исходный	Обработан способом		
		1*	2*	3*		1*	2*	3*
Шелуха ячменя	23,37	23,47	23,52	28,56	95	143	180	210
Шелуха гречки	15,33	17,64	21,84	24,36	15	35	60	78
Шелуха арахиса	17,15	19,47	21,00	24,56	62	71	159	174
Шелуха подсолнечника	21,10	21,52	24,53	31,01	128	135	155	153
Околоплодник редьки	24,36	24,78	26,88	28,98	146	195	198	225
Околоплодник фасоли	11,12	14,43	13,82	17,82	70	115	116	171
Околоплодник боба	16,85	14,78	17,11	12,83	98	138	177	192
Околоплодник гороха	16,11	16,22	22,41	14,81	70	85	110	147
Околоплодник рапса	20,07	19,18	18,92	21,12	67	73	95	121
Коробочки хлопчатника	20,24	21,83	22,34	25,50	88	102	104	110
Хвощ полевой	19,36	22,27	24,57	28,14	105	132	276	302
Опилки сосны	17,60	16,12	16,92	15,61	47	60	126	88
Кора сосны	17,27	18,74	19,33	28,16	35	85	86	210
Кора ольхи серой	14,64	20,11	18,75	21,25	105	115	123	145
Кора бука	11,43	12,30	12,01	15,24	54	75	76	132
Кора каштана	15,25	17,08	15,86	18,30	93	97	103	118
Кора ели	11,59	13,42	12,81	15,30	102	128	130	145
Кора березы	10,98	13,34	11,43	13,34	25	70	71	92
Кора акации	22,86	25,40	24,77	26,70	85	120	124	127

Примечание: 1\* экстракция холодной водой; 2\* экстракция горячей водой; 3\* экстракция 1,5 % мас. раствором гидроксида натрия.

Адсорбционная активность по йоду изучается для анализа микропористости растительных материалов с эффективными диаметрами пор до 1 нм и способности поглощать низкомолекулярные углеводороды. Адсорбционная активность по метиленовому синему характеризует содержание в сорбенте микропор с размерами эффективных диаметров до 1,7 нм.

Необработанные отходы деревообработки и сельского хозяйства имеют схожие показатели адсорбционной активности по йоду в пределах 10–25%, что в разы ниже значения (более 60%), характерного для промышленного активного угля БАУ-А (на основе березового угля-сырца), однако приближаются к 180...210 мг/г (для БАУ-А) значению адсорбционной активности по метиленовому синему. В целом обработка водой и гидроксидом натрия способствует раскрытию дополнительных пор в твердых остатках за счет перехода в раствор смол, полифенольных кислот, лигногуминовых веществ, низкомолекулярного лигнина и полисахаридов. Отходы растениеводства в большинстве случаев обладают большей адсорбционной активностью по йоду и метиленовому синему по сравнению с отходами деревообрабатывающей промышленности, что позволяет прогнозировать высокую нефтеемкость этих образцов.

Методом «молекулярных щупов» определен суммарный объем пор по воде, ацетону и толуолу. Результаты анализа приведены в таблице 3.

Определено, что отходы растениеводства, как и отходы деревообрабатывающей промышленности, характеризуются сильно развитой общей пористостью. Суммарный объем пор по воде достигает 0,6–5,5 см<sup>3</sup>/г, что сопоставимо со значением для активированных углей (до 1,6 см<sup>3</sup>/г). Высокие значения суммарного объема пор по воде для околоплодников редьки, шелухи ячменной и арахиса будут снижать эффективность сбора с их помощью нефтяных загрязнений с водной поверхности из-за высокой избирательности к воде растительных материалов.



Таблица 3. – Объем пор методом «молекулярных щупов» по ГОСТ 17219

Образец	Суммарный объем пор, см <sup>3</sup> /г		
	по воде ( $d = 0,24$ нм)	по толуолу ( $d = 0,63$ нм)	по ацетону ( $d = 0,56$ нм)
Шелуха ячменная	5,325	5,046	1,227
Шелуха гречихи	2,650	2,566	0,810
Шелуха арахиса	4,735	4,239	0,664
Шелуха подсолнечника	1,020	0,401	0,270
Околоплодник редьки	5,480	3,489	0,848
Околоплодник рапса	1,799	1,270	0,300
Коробочки хлопчатника	1,500	1,160	0,580
Хвощ полевой	3,190	1,932	0,873
Солома злаковых культур	2,952	1,510	0,215
Опилки сосны	1,383	1,143	2,405
Кора сосны	1,337	1,138	1,522
Кора ольхи серой	2,192	1,705	0,255
Кора бука	0,923	0,073	0,057
Кора каштана	1,445	1,155	0,370
Кора ели	1,308	0,239	1,348
Кора березы	0,580	0,409	0,315
Кора акации	2,710	2,017	0,867

В качестве сорбтивов выбраны западно-сибирская нефть (плотностью при 20 °С 860 г/см<sup>3</sup>) и нефтепродукты: керосин (КО-20) (плотностью при 20 °С 790 г/см<sup>3</sup>), дизельное топливо (ДТ) (плотностью при 20 °С 825 г/см<sup>3</sup>) и вакуумный дистиллят первого погона (ВД-1) (плотностью при 20 °С 906 г/см<sup>3</sup>). Результаты анализа адсорбции нефти и нефтепродуктов, выполненной по ускоренному методу по ГОСТ 33627-2015 для адсорбента II типа приведены в таблице 4.

Таблица 4. – Адсорбционная способность образцов по отношению нефти и нефтепродуктам

Образец	Сорбтив	Исходный образец, г/г	Твердый остаток после обработки, г/г, способом		
			1*	2*	3*
1	2	3	4	5	6
Шелуха ячменя	нефть	3,1	9,3	9,9	12,8
	КО-20	3,0	7,1	7,6	10,4
	ДТ	3,0	8,6	7,9	9,7
	ВД-1	3,2	7,4	7,7	15,3
Шелуха гречки	нефть	1,1	1,3	1,5	2,7
	КО-20	0,8	1,4	1,7	2,4
	ДТ	0,9	1,0	2,1	2,1
	ВД-1	1,1	1,6	1,6	1,9
Шелуха арахиса	нефть	2,3	4,6	5,3	5,7
	КО-20	2,3	3,1	3,7	2,8
	ДТ	2,3	4,8	4,9	4,9
	ВД-1	2,8	3,5	3,9	4,7
Шелуха подсолнечника	нефть	3,3	3,8	3,9	5,5
	КО-20	2,1	2,5	2,6	2,8
	ДТ	2,2	3,1	2,9	3,0
	ВД-1	3,9	3,8	4,6	4,2
Околоплодник редьки	нефть	2,9	9,0	9,8	13,3
	КО-20	2,4	7,0	7,5	11,9
	ДТ	2,4	7,1	7,7	13,2
	ВД-1	2,7	7,9	7,9	15,5
Околоплодник фасоли	нефть	3,6	3,6	7,0	6,0
	КО-20	1,9	2,5	2,4	3,0
	ДТ	2,8	3,5	3,7	4,2
	ВД-1	4,5	5,3	6,5	6,4
Околоплодник боба	нефть	4,2	4,6	5,4	5,5
	КО-20	1,8	2,2	3,1	3,0
	ДТ	2,5	3,5	3,4	3,4
	ВД-1	5,2	4,9	4,7	5,4

Окончание таблицы 4

1	2	3	4	5	6
Коробочки хлопчатника	Нефть	3,5	5,7	5,0	5,8
	КО-20	2,7	3,1	3,2	2,8
	ДТ	2,9	3,9	3,5	3,7
	ВД-1	5,1	5,6	8,7	7,6
Смесь шелухи сельскохозяйственных культур	нефть	10,8	9,6	8,6	6,7
	КО-20	5,2	4,7	4,3	2,3
	ДТ	7,2	4,9	5,6	3,0
	ВД-1	8,2	8,4	9,1	8,0
Хвощ полевой	нефть	3,3	4,7	6,1	13,4
	КО-20	2,4	3,9	4,4	8,9
	ДТ	2,7	4,5	5,8	11,5
	ВД-1	3,1	4,3	6,1	14,5
Солома злаковых культур	нефть	3,9	4,2	4,9	6,1
	ДТ	2,5	3,7	3,7	5,9
Опилки сосны	нефть	5,3	5,2	5,4	6,8
	ДТ	4,8	4,7	4,7	6,1
Кора сосны	нефть	3,9	3,8	3,9	4,8
	ДТ	3,9	3,7	3,8	4,6
Кора ольхи серой	нефть	1,1	1,3	1,7	2,7
	КО-20	0,7	1,6	1,6	2,6
	ДТ	1,1	1,5	1,9	2,1
	ВД-1	2,7	2,9	3,3	3,9
Кора ели	нефть	2,8	3,4	3,6	3,9
	КО-20	1,6	2,2	2,4	3,1
	ДТ	2,3	2,5	2,6	2,7
	ВД-1	3,6	4,5	4,6	4,8

Примечание: 1\* экстракция холодной водой; 2\* экстракция горячей водой; 3\* экстракция 1,5 % мас. раствором гидроксида натрия.

Экономически эффективная нефтеемкость (нефтепоглощение) в 3,0 г/г определена для шелухи ячменя и подсолнечника, околоплодников фасоли и боба, коробочек хлопчатника, соломы и смеси шелухи сельскохозяйственных культур, а также опилок и коры сосны. Нефтеемкость отходов растениеводства и деревообработки коррелирует с содержанием целлюлозы в образце. Чем выше содержание целлюлозы, тем больше степень поглощения нефти и нефтепродукта. Например, шелуха ячменная – содержание целлюлозы 55–60%, опилки сосны – 53–55%, солома пшеницы – 35–49%, шелуха арахиса – 38–41%, шелуха гречихи – 19–29%. Реагентная обработка водой и щелочью растительных материалов позволяет увеличить долю аморфных зон целлюлозы, что положительно сказывается на повышении удельной поверхности и адсорбционной способности материала по отношению к нефти и нефтепродуктам. Тяжелые нефтепродукты поглощаются всеми образцами значительно эффективнее, чем легкие. Происходит линейное возрастание сорбционной способности образцов с увеличением плотности нефтепродукта, что свидетельствует о процессах физической сорбции и увеличении энергии адгезионной связи сорбируемого вещества с поверхностью сорбции. В целом контакт твердых олеофильных частиц растительных материалов с большим количеством нефти вокруг них способствует образованию мицелл, взаимодействующих между собой с формированием своеобразной сетчатой структуры, что значительно увеличивает вязкость суспензии, приводя к образованию плотных конгломератов.

В таблице 5 приведены результаты анализа плавучести, водопоглощения и степени отжима образцов фракции 0,25–1 мм. Данные показатели имеют особое значение при ликвидации нефтяных загрязнений с водных поверхностей.

Для шелухи гречки и подсолнечника, коробочек хлопчатника и древесной коры характерны низкие значения водопоглощения, что обусловлено повышенным содержанием гидрофобных компонентов. Это определяет их хорошую плавучесть и водоотталкивающие свойства. Однако для остальных отходов растениеводства характерны высокие показатели по водопоглощению, что обусловлено наличием большого количества сильнополярных групп, таких как -ОН, -СООН.

Для устранения этого недостатка необходимо осуществлять гидрофобизацию поверхности. Высокой плавучестью обладает древесная кора, ограниченной – отходы сельскохозяйственных культур. Однако шелуха подсолнечника и опилки сосны быстро тонут даже в конгломерате с нефтью, вероятно, из-за низкого поверхностного натяжения, что может затруднить их извлечение из водных объектов. Остальные образцы в конгломерате с нефтью обладают высокой плавучестью – более 72 ч. Повысить плавучесть материалов можно путем использования изделий с армирующей оболочкой – боннов, матов и др. Высокая степень отжима нефти после адсорбции установлена для шелухи ячменной и арахиса, хвоща полевого и коробочек хлопчатника. Менее половины сорбтива извлекается отжимом насыщенной нефтью древесной коры.

Таблица 5. – Характеристика плавучести, водопоглощения и степени отжима образцов

Образец	Плавучесть (за 24 ч), % масс.	Плавучесть, ч	Водопоглощение, г/г	Плавучесть в конгломерате с нефтью, ч	Степень отжима, % масс.
Шелуха ячменная	30,0	3–72	5,4	более 72	79,34
Шелуха гречихи	34,0	3–72	2,4	более 72	69,06
Шелуха арахиса	36,5	3–72	3,9	более 72	72,32
Шелуха подсолнечника	около 1	до 3	2,9	менее 72 ч	63,12
Околоплодник редьки	23,5	3–72	7,1	более 72	64,77
Солома злаковых культур	2,0	3–72	5,1	более 72	19,10
Хвощ полевой	22,5	3–72	4,8	более 72	76,65
Коробочки хлопчатника	21,5	3–72 ч	2,4	более 72	68,32
Опилки сосны	около 1	до 3	6,9	менее 72 ч	22,40
Кора сосны	75,0	более 72	3,3	более 72	25,10
Кора ольхи	98,0	3–72	3,5	более 72	49,95
Кора ели	97,0	3–72	3,8	более 72	39,75

**Заключение.** Значение нефтеемкости отходов растениеводства после обработки водой и щелочью приближаются к показателю до 9 г/г наиболее широко применяемого сорбента в технологиях ликвидации нефтяных загрязнений марки Spill-Sorb на основе канадского сфагнового мха стоимостью около 6900 \$ за 1 т. При этом себестоимость сорбционных материалов из отходов сельскохозяйственных культур не превышает 100 \$ за 1 т. Рассматриваемые образцы в четыре раза дешевле широко применяемого в Беларуси промышленного нефтяного сорбента марки «Белнефтесорб-экстра», изготавливаемого на основе фрезерного торфа с нефтеемкостью около 3 г/г. Таким образом, рассмотренные сорбционные материалы сопоставимы с широко применяемыми в промышленности нефтяными сорбентами как по эксплуатационным, так и по экономическим характеристикам. Вместе с тем рациональная утилизация отходов с получением на их основе нефтяных сорбентов не только позволит расширить их ассортимент, но и снизить нагрузку на окружающую среду.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Якубовский, С.Ф. Получение сорбента для сбора нефти и нефтепродуктов при их разливах путем утилизации отходов агропромышленного комплекса / С.Ф. Якубовский, Ю.А. Булавка, Е.И. Майорова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2017. – № 11. – С. 84–89.
2. Bulauka, Y.A. Emergency sorbents for oil and petroleum product spills based on vegetable raw materials / Y.A. Bulauka, K.I. Mayorava, Z. Ayoub // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 451(1). 10.1088/1757-899X/451/1/012218
3. Булавка, Ю.А. Использование отходов агропромышленного комплекса для получения нефтяных сорбентов / Ю.А. Булавка, С.Ф. Якубовский, Е.И. Майорова // XXI век. Техносферная безопасность. – 2017. – Т. 2, № 4(8). – С. 38–47.
4. Каменщиков, Ф.А. Нефтяные сорбенты / Ф.А. Каменщиков, Е.И. Богомольный. – М.: Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2005. – 268 с.
5. Tripathi, J. Switchgrass as oil and water-spill sorbent: Effect of particle size, torrefaction, and regeneration methods / J. Tripathi, A. Arya, D. Ciolkosz // Journal of Environmental Management. – 2021. – Vol. 281. 10.1016/j.jenvman.2020.111908
6. Theoretical and experimental investigation on the removal of oil spill by selective sorbents / P. Narayanan [et al.] // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2018. – Vol. 63. – P. 1–11. 10.1016/j.jiec.2018.01.031
7. Neha, Bhardwaj. A review on sorbent devices for oil-spill control / Neha, Bhardwaj, Ashok N. Bhaskarwar // Environmental Pollution. – 2018. – Vol. 243, Part B. – P. 1758–1771. 10.1016/j.envpol.2018.09.141
8. Rebecca, Pagnucco. Comparative effectiveness of natural by-products and synthetic sorbents in oil spill booms / Rebecca Pagnucco, Megan L. Phillips // Journal of Environmental Management. – 2018. – Vol. 225. – PP. 10–16. 10.1016/j.jenvman.2018.07.094
9. Shima, Panahi. Assessment of milkweed floss as a natural hollow oleophilic fibrous sorbent for oil spill cleanup / Shima Panahi, Meghdad Kamali Moghaddam, Meysam Moezzi // Journal of Environmental Management. 2020. – Vol. 268. 10.1016/j.jenvman.2020.110688
10. Cojocar, C. Peat-based sorbents for the removal of oil spills from water surface: Application of artificial neural network modeling / C. Cojocar, M. Macoveanu, I. Cretescu // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2011. – Vol. 384, Iss. 1–3. – P. 675–684. 10.1016/j.colsurfa.2011.05.036
11. Recent advances in developing cellulosic sorbent materials for oil spill cleanup: A state-of-the-art review / Samia ben Hamouda [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 311. 10.1016/j.jclepro.2021.127630

## REFERENCES

1. Yakubovskiy, S.F., Bulavka, Yu.A. & Mayorova, Ye.I. (2017). Polucheniye sorbenta dlya sbora nefi i nefteproduktov pri ikh razli-vakh putem utilizatsii otkhodov agropromyshlennogo kompleksa [Obtaining a sorbent for collecting oil and oil products during their spills by recycling waste from the agro-industrial complex]. *Vestnik Polotsogo gosudarstvennogo universitetata. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnyye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Sciences], (11), 84–89. (In Russ., abstr. in Engl.).

2. Bulavka, Yu.A., Mayorava, K.I. & Ayoub, Z. (2018). Emergency sorbents for oil and petroleum product spills based on vegetable raw materials. *IOP Conference Series*, 451(1). 10.1088/1757-899X/451/1/012218
3. Bulavka, Yu.A., Yakubovskiy, S.F. & Mayorava, K.I. (2017). Ispol'zovaniye otkhodov agropromyshlennogo kompleksa dlya polucheniya neftnyanikh sorbentov [The use of agricultural waste to obtain oil sorbents]. *XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost' [XXI century. Technospheric safety]*, T. 2, 4(8), 38–47. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Kamenshchikov, F.A. & Bogomol'nyy, Ye.I. (2005). *Neftnyanye sorbenty [Oil sorbents]*. Moscow: Izhevsk: Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika. (In Russ.).
5. Tripathi, J., Arya, A. & Ciolkosz, D. (2021). Switchgrass as oil and water-spill sorbent: Effect of particle size, torrefaction, and regeneration methods. *Journal of Environmental Management*, 281, 111908. 10.1016/j.jenvman.2020.111908
6. Narayanan, P., Ravirajan, A., Umasankaran, A., Gnana Prakash, D. & Senthil Kumar, P. (2018). Theoretical and experimental investigation on the removal of oil spill by selective sorbents. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 63, 1–11. 10.1016/j.jiec.2018.01.031
7. Neha, Bhardwaj & Ashok, N. Bhaskarwar. (2018). A review on sorbent devices for oil-spill control. *Environmental Pollution*, Vol. 243, Part B, 1758–1771. 10.1016/j.envpol.2018.09.141
8. Pagnucco, R. & Phillips, Megan L. (2018). Comparative effectiveness of natural by-products and synthetic sorbents in oil spill booms. *Journal of Environmental Management*, 225, 10–16. 10.1016/j.jenvman.2018.07.094
9. Shima, Panahi, Meghdad Kamali, Moghaddam, & Meysam, Moezzi. (2020). Assessment of milkweed floss as a natural hollow oleophilic fibrous sorbent for oil spill cleanup. *Journal of Environmental Management*, 268. 10.1016/j.jenvman.2020.110688
10. Cojocaru, C., Macoveanu, M. & Cretescu, I. (2011). Peat-based sorbents for the removal of oil spills from water surface: Application of artificial neural network modeling. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 384, Iss. 1–3, 675–684. 10.1016/j.colsurfa.2011.05.036
11. Samia ben Hammouda, Zhi Chen, Chunjiang An & Kenneth Lee. (2021). Recent advances in developing cellulosic sorbent materials for oil spill cleanup: A state-of-the-art review. *Journal of Cleaner Production*, 311. 10.1016/j.jclepro.2021.127630

Поступила 26.04.2022

#### ANALYSIS OF THE SORPTION CAPACITY IN RELATION TO OIL AND PETROLEUM PRODUCTS OF NATURAL PLANT MATERIALS

S. YAKUBOUSKI, Y. BULAUKA

*An analysis of the possibility of using more than twenty samples of natural sorption materials for the elimination of oil pollution by recycling waste from woodworking and agriculture was carried out. Physicochemical and operational properties of plant materials such as moisture content, bulk density, adsorption capacity for iodine and methylene blue, total pore volume by the method of "molecular probes" for water, acetone and toluene, adsorption of oil and oil products by the accelerated method, water absorption, buoyancy and degree pressing was studied. The considered sorption materials are comparable to oil sorbents widely used in industry in terms of performance, but are several times cheaper in cost was established.*

**Keywords:** Oil pollution, sorbent, sorption, forestry and agricultural waste.

УДК 665.777.4

## СПОСОБЫ ОБЕССЕРИВАНИЯ НЕФТЯНОГО КОКСА (ОБЗОР)

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)

Представлено обобщение данных научной литературы о способах удаления серы из высокосернистого нефтяного кокса. Рассмотрены следующие направления десульфуризации нефтяного кокса: сольвентная экстракция, термическое обессеривание, окислительная десульфуризация, десульфуризация в атмосфере серосодержащего газа, десульфуризация в атмосфере углеводородных газов, гидрообессеривание, обессеривание путем введения различных добавок, микробиологическое обессеривание. Проанализированы особенности и указана эффективность вышеперечисленных методов обессеривания нефтяного кокса. Показано, что удаление серы из нефтяного высокосернистого кокса является сложной задачей. При этом процессы обессеривания нефтяного кокса, несмотря на их разнообразие, являются многостадийными, а на эффективность проведения каждой стадии и процесса десульфуризации в целом влияет множество различных технологических факторов. Рассмотренные и систематизированные в настоящей работе способы обессеривания нефтяного кокса могут быть использованы как для выбора стратегического направления переработки высокосернистого кокса с целью снижения содержания в нём серы, так и получения на его основе новых видов продукции, обладающей уникальными потребительскими свойствами.

**Ключевые слова:** нефтяной кокс, сера, способы обессеривания кокса, сольвентная экстракция, термическое обессеривание, окислительная десульфуризация, десульфуризация газами, гидрообессеривание, обессеривание добавками, микробиологическое обессеривание.

**Введение.** В настоящее время мировая экономика ориентирована на развитие процессов, углубляющих переработку нефти [1; 2]. Одним из таких процессов является процесс замедленного коксования тяжелых нефтяных остатков, позволяющий получать дополнительное количество моторных топлив и обладающий высокой конкурентоспособностью [3; 4]. Однако при переработке нефтяных остатков с большим содержанием серы образуется низкосортный высокосернистый кокс, и в связи с этим предприятия сталкиваются с трудностями при его реализации. С увеличением содержания серы снижается теплота сгорания кокса, увеличивается количество выбрасываемых в атмосферу оксидов серы, которые вызывают кислотные дожди, оказывающие негативное влияние на здоровье людей и животных, приводят к снижению урожайности сельскохозяйственных культур и пр. [5–7].

В связи с вышесказанным поиск путей уменьшения содержания серы в нефтяном коксе является актуальной задачей. В настоящем обзоре представлен анализ и систематизация существующих на настоящее время технологий, направленных на снижение содержания соединений серы в высокосернистом нефтяном коксе.

**Основная часть.** Содержание серы в нефтяном коксе варьируется в широких пределах – от менее 0,5% масс. до более 10% масс., и зависит, главным образом, от содержания серы в сырье процесса коксования, а также технологических параметров ведения процесса.

Более чем на 98% сера в нефтяных коксах сосредоточена в органических соединениях тиофенового ряда. Некоторое количество серы также может существовать в виде сульфатов и сульфидов металлов (например, пиритной серы), которые входят в состав неорганической массы кокса. Но в целом содержание пиритной серы обычно не превышает 0,02% масс. от общего её содержания в нефтяном коксе. В редких случаях содержание пиритной серы в коксе может достигать 0,4% масс. В высокосернистых нефтяных коксах сера также может присутствовать в элементной форме. Неорганические соединения серы чаще всего располагаются на поверхности или в порах кокса. Структура органических соединений серы в нефтяном коксе на сегодняшний день остается в значительной степени неизвестной. На основании анализа научных источников [5; 8–10] выявлено, что органическая сера в нефтяном коксе может входить в состав следующих соединений:

- тиофенов и их гомологов, присоединенных к ароматическому углеродному скелету;
- в виде цепочечных структур между полимеризованными сетками ароматических колец;
- органических сульфидов. Однако их содержание, как правило, составляет не более 0,003% масс. от общей серы в сыром коксе.

На текущий момент можно выделить следующие направления десульфуризации или обессеривания нефтяного кокса:

- сольвентная экстракция;
- термическое обессеривание;
- окислительная десульфуризация;
- десульфуризация в атмосфере серосодержащего газа;
- десульфуризация в атмосфере углеводородных газов;
- гидрообессеривание;
- обессеривание путем введения различных добавок;
- микробиологическое обессеривание.

*Сольвентная экстракция.* Поскольку вещества схожей химической структуры с большей вероятностью будут взаимно растворимы друг в друге, наиболее подходящими в качестве растворителей для соединений серы тиофенового ряда являются ароматические и гетероциклические соединения. Как показали исследования, петролейный эфир и алканы не способны путем экстракции удалять серу из нефтяного кокса. При использовании бензола в качестве растворителя из нефтяного кокса удаляется не более 7% серы от общего его содержания в коксе. Эффективность фенола и фурфуrolа не превышает 14%. Наибольшая степень десульфуризации кокса методом экстракции не превышает 20% и наблюдается при использовании в качестве экстрагентов орто-хлорфенола и пиридина. При этом глубина удаления серы зависит от температуры и размеров частиц кокса. Сероуглерод растворяет преимущественно элементарную серу [11].

Таким образом, экстракция не является эффективным методом десульфуризации нефтяного кокса. Неэффективность экстракции как метода десульфуризации напрямую связана с природой соединений серы в коксе. Хотя свободная или элементарная сера, которую все же можно удалить экстракцией, иногда может присутствовать в нефтяном коксе, большая часть серы в коксе существует в виде органической серы, связанной с углеродной матрицей кокса. Эффективная десульфуризация нефтяного кокса включает разрыв тиофенов, которые составляют большую часть серы, присутствующей в коксе. Соответственно, селективность экстракции может быть увеличена только в том случае, если макромолекула кокса может быть отщеплена. Деполимеризация кокса может осуществляться различными методами, включая повышение температуры экстракции, мягкое гидрирование, микроволновый нагрев, окисление, предпиролиз и использование катализаторов [11].

Предварительное окисление нефтяного кокса при умеренной температуре (около 330 °С) делает кокс более поддающимся обработке экстракцией растворителями. Благоприятный эффект предварительного окисления, вероятно, связан с окислением серы, связанной с матрицей кокса, которая, как ожидается, позволяет ослабить связи C-S без одновременного разрушения углеводородной матрицы. При этом увеличивается полярность серосодержащих соединений. При окислении тиофены образуют более полярные моно- и диоксиды, арил-тиофенсульфоксиды и сульфоны. Это облегчает разделение и делает возможным извлечение серы после предварительной стадии окисления.

При использовании в качестве экстрагентов орто-хлорфенола и пиридина при обработке предварительно окисленных образцов кокса максимальная степень десульфуризации достигает 76% в обоих случаях, т.е. повышается более чем в 3,5 раза.

*Термическое обессеривание.* Под термическим обессериванием подразумевается процесс, при котором нефтяной кокс нагревают при атмосферном давлении в инертной атмосфере до определенной температуры, а затем выдерживают при этой температуре в течение определенного периода времени. Эффективность десульфуризации зависит не только от максимальной температуры, которой подвергается кокс, но и других факторов, которые также влияют на нее, включая скорость нагрева, газовую атмосферу и, в частности, время пребывания при максимальной температуре. Процесс термической десульфуризации сырого нефтяного кокса можно разделить на четыре стадии.

Первая стадия – начальная фаза десульфуризации, сопровождающаяся десорбцией серы, связанной на поверхности или в порах, и одновременным отщеплением боковых цепей ароматических молекул. Процесс термической десульфуризации кокса начинается при температуре (500–550) °С. Интенсивность данного процесса носит экстремальный характер. Вначале десульфуризация увеличивается до максимума примерно при температуре 730 °С, а затем снижается и практически прекращается при температуре около 1000 °С. Максимальное количество серы, удаляемой на этой стадии, составляет около 25% масс. от общего количества серы, содержащейся в коксе.

Вторая стадия – стадия, на которой происходит незначительная десульфуризация. Она наблюдается в диапазоне температур от 830 до 1330 °С. Данная стадия наиболее характерна для кокса, полученного из сырья с высоким содержанием ароматических соединений. Большая часть удаляемой серы на данной стадии образуется в результате разложения термостойких соединений серы, находящихся в боковых цепях. Зола и металлические примеси не влияют на десульфуризацию до температуры 1230 °С. При температурах, превышающих или равных 1230 °С, десульфуризация значительно подавляется металлсодержащими соединениями, которые реагируют с диссоциированной серой с образованием тугоплавких, термически устойчивых соединений серы и сульфидов металлов.

Третья стадия – при нагревании кокса до температуры выше 1330 °С интенсивность десульфуризации кокса резко возрастает. При этом начинают разлагаться тиофенсодержащие соединения. Однако полное удаление серы при дальнейшем повышении температуры невозможно. Вероятно, это связано с перестройкой углеродной матрицы кокса и формированием структур, препятствующих выделению продуктов термолитического разложения сернистых соединений.

Высокая температура, необходимая для термического обессеривания кокса, также оказывает влияние на его поверхностные свойства. Так, площадь поверхности нефтяного кокса увеличивается до максимума при нагревании до температуры около 730 °С, а затем уменьшается до минимума при температуре около 1000 °С, после чего происходит дальнейшее увеличение площади поверхности.

Кажущаяся плотность кокса увеличивается при нагревании до 1330 °С. При температуре выше 1330 °С изменения плотности зависят от исходного содержания серы, уменьшаясь для коксов с высоким содержанием серы и увеличиваясь для коксов с низким содержанием серы. Реальная плотность увеличивается при повышении температуры до 1430 °С, а затем уменьшается. Уменьшение реальной плотности при температуре выше 1430 °С, называемое вспучиванием, является следствием пористости, возникающей, когда сера выходит из коксовой матрицы. Поэтому использование такого кокса в промышленности, где достигаются такие температуры, например, в дуговых электрических печах, невозможно, т.к. это приводит к растрескиванию и разрушению электродов.

Кинетика термообессеривания кокса изучена в работе [12]. С повышением температуры и продолжительности обработки кокса остаточное количество серы в коксе снижается. Так, при термообработке в течение 300 мин при температурах 1400 °С, 1500 °С и 1600 °С глубина удаления серы составила 78,1; 90,2 и 92,6% соответственно.

Основной составляющей серосодержащих компонентов выделяющихся при температурах (1400–1550) °С является элементарная сера. Значительно меньше серы выделяется в виде сероводорода, незначительно – в виде суммы сероуглерода и серооксида углерода, в виде двуокиси серы – следовые количества. С увеличением глубины обессеривания увеличивается доля элементарной серы. Количество серы, входящей в состав сероводорода, суммы сероуглерода и серооксида углерода, снижается [13].

На глубину термического обессеривания кокса оказывает влияние и скорость нагрева [14]. При высоких скоростях нагрева при высоких температурах вследствие интенсивной кристаллизации углеродной матрицы на стадии трехмерного упорядочения происходит более быстрое упрочнение структуры кокса, что препятствует выделению продуктов термолитического разложения сернистых соединений. Это приводит к тому, что при высоких скоростях нагрева при высоких температурах остаточное содержание серы в коксе выше, чем при меньшей скорости подъема температуры и более низких температурах.

Таким образом, термическое обессеривание является сложным многофакторным процессом, позволяющим существенно снизить содержание серы в высокосернистом нефтяном коксе. Однако в настоящее время нет единого мнения о механизме термического обессеривания кокса. Не решен вопрос: какой стадией лимитируется процесс обессеривания – скоростью разложения сероорганических соединений или диффузией продуктов разложения за пределы углеродной матрицы [5].

*Окислительная десульфуризация.* Использование окисляющего газа во время термической обработки нефтяного кокса способствует удалению серы, потере массы и увеличению его пористости. В качестве окисляющего газа можно использовать воздух. Нефтяной кокс также можно обессеривать путем нагревания паром, а использование смеси воздуха и пара препятствует десульфуризации. Нагревание в среде углекислого газа также препятствует десульфуризации.

При нагревании нефтяного кокса в кислороде ниже 650 °С удаление сернистых соединений не наблюдается. В интервале температур (650–1000) °С максимальная степень десульфуризации составляет около 30%. Больше серы можно удалить, подняв температуру до (1300–1500) °С.

Также могут использоваться другие окислители для окисления тиолов, сульфидов и дисульфидов до сульфоновых кислот, которые затем можно гидролизовать в кипящей воде. Например, при использовании азотной кислоты в качестве окислителя была достигнута максимальная десульфуризация 31%. Это сопровождалось увеличением содержания кислорода и азота и уменьшением содержания углерода в углеродсодержащем материале [8; 15–17].

*Десульфуризация в атмосфере серосодержащего газа.* Воздействие сероводорода на кокс в диапазоне температур (1000–1200) К увеличивает содержание серы в коксе, в связи с тем, что сероводород реагирует с углеродом. Однако при повышенных температурах серосодержащие газы разлагаются с образованием свободной серы или реагируют с образованием свободной серы и, таким образом, вызывают десульфуризацию с сохранением основных свойств кокса. При температуре 1600 К содержание серы в коксе в среде сероводорода снижается на 84% [8; 18].

*Десульфуризация в атмосфере углеводородных газов.* Лабораторные исследования показывают, что достаточно эффективным способом удаления серы из раскаленного кокса является его продувка в кипящем слое низкомолекулярными углеводородными газами, которые разлагаются с выделением водорода, вступающего в реак-

цию с серой. При этом образующийся углерод осаждается в порах кокса, увеличивая тем самым плотность кокса. При этом наибольшая глубина обессеривания 93–94% при температуре процесса (1370–1470) К достигается при использовании этилена и пропилена. При использовании циркулирующего олефинсодержащего газа при температуре 1770 К степень обессеривания составляет 90%. Эффективность метана, как десульфуризирующего агента сильно зависит от температуры процесса. Так, при температуре 1140 К глубина обессеривания составляет всего 30%, а при температуре 1200 К увеличивается до 90% [19].

*Гидрообессеривание (Hydrodesulphurization – процесс HDS).* Несмотря на то, что гидроочистка является довольно распространенным процессом десульфуризации в нефтяной промышленности, он не нашел применения при переработке нефтяного кокса. В типичной схеме гидродесульфуризации нефтяной кокс нагревается в неподвижном слое в атмосфере водорода. Экспериментальные работы показывают, что скорость удаления серы максимальна примерно при 1000 К, когда удаляется около 50% серы. Для более глубокого удаления серы необходимо повышать температуру до 1600 К. При температурах (1300–1500) К десульфуризация кокса практически не идет. Максимальное обессеривание при оптимальной температуре можно объяснить тем фактом, что скорость обессеривания является результатом двух конкурирующих процессов, а именно удаления лабильной серы водородом и термической фиксации серы с помощью обратной реакции, которая дает более устойчивые формы серы. Обратная реакция ускоряется при температурах в диапазоне (1000–1200) К. При повышенных температурах (1500–1800) К в присутствии сероводорода глубина обессеривания нефтяного кокса достигает 92% [8].

Эффективность гидродесульфуризации можно повысить, увеличив расход водорода до оптимального значения или увеличив давление, а также проводя процесс в псевдооживленном слое и подвергая кокс предварительной активации, например, предварительным окислением кокса при температуре до 400 °С с целью увеличения его удельной поверхности.

*Обессеривание путем введения различных добавок.* Удалить серу из кокса можно путем его обработки гидроксидами щелочных металлов. Так, при использовании гидроксида натрия степень десульфуризации может достигать 98%. Для повышения эффективности десульфуризации возможна предварительная активация кокса псевдооживлением воздухом или паром или воздействием на образец кокса микроволновым излучением. Основным недостатком этого процесса является потребление большого количества щелочных соединений и присутствие соединений щелочных металлов в обработанном коксе [8].

В качестве добавок могут быть использованы карбонаты щелочных и щелочно-земельных металлов [5]. Однако применение добавок для обессеривания кокса имеет серьезные недостатки: сложная многостадийная технология, необходимость измельчения кокса для обеспечения эффективного контакта с реагентами, большой расход реагентов и энергоресурсов и пр. Например, технология обессеривания кокса добавкой карбоната кальция включает в себя следующие стадии: добавление карбоната кальция к нефтяному коксу, нагревание его при 600 °С в течение 3 ч в атмосфере водорода и водяного пара, промывку водой, сушку, прокаливание при температуре (1200–1400) °С, обработку прокаленного кокса водяным паром. В результате содержание серы в коксе удается снизить с 4,6 до 0,7% масс.

*Микробиологическое обессеривание.* Одним из перспективных направлений обессеривания нефтяного кокса является использование микроорганизмов. Преимущество данного метода заключается в том, что процесс удаления серы из нефтяного кокса протекает при мягких условиях – умеренных температурах, с применением минимального набора химических реагентов, а для его проведения необходимо относительно недорогое оборудование [20].

В зависимости от условий проведения процесса и вида используемых микроорганизмов, сера, содержащаяся в коксе, может превращаться в анаэробных условиях в сероводород или, в присутствии кислорода воздуха окисляться до сульфатов. В зависимости от способности удалять неорганическую и органическую серу можно выделить следующие классы микроорганизмов<sup>1</sup> [20]:

- облигатные автотрофы, способные окислять только пиритную серу;
- факультативные автотрофы, способные удалять пиритную серу и некоторые органические соединения серы;
- гетеротрофы, способные к расщеплению только некоторых органических соединений серы.

В связи с тем, что в нефтяных коксах сера более чем на 98% сосредоточена в органических соединениях тиофенового ряда, для её удаления необходимо использовать микроорганизмы, способные разрывать С-S связи. Разрыв С-S связи может происходить как в аэробных, так и в анаэробных условиях. Аэробные микроорганизмы разлагают сернистые соединения через присоединение атома кислорода к атому серы, чтобы облегчить после-

---

<sup>1</sup> Sattar Jatoi, A. Biological Removal of Sulfur from Coal through Use of Microorganism. A Review / A. Sattar Jatoi, S. Aziz, S. Ahmed Soomro // 4th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development (EESD). – 2016.  
URL: [https://www.researchgate.net/publication/317090379\\_320\\_Biological\\_Removal\\_of\\_Sulfur\\_from\\_Coal\\_through\\_Use\\_of\\_Microorganism\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/317090379_320_Biological_Removal_of_Sulfur_from_Coal_through_Use_of_Microorganism_A_Review)



дующий разрыв C-S связи, поскольку в таком случае снижается ее прочность. В процессе селективного окисления атома серы на примере молекулы дибензотиофена при разрыве связи C-S образуются сульфит/сульфат и, в основном, органическое соединение 2-гидроксибифенил, а при использовании определенных штаммов микроорганизмов 2-гидроксибифенил метилируется по гидроксильной группе с образованием 2-метоксибифенила, который менее токсичен для микроорганизмов.

В отличие от аэробных процессов десульфуризации анаэробные процессы сопровождаются выделением сероводорода и протекают в присутствии доноров водорода. В процессе анаэробного обессеривания дибензотиофена основным органическим продуктом является бифенил. Метод анаэробного обессеривания технологически перспективен. Однако лишь немногие сульфатовосстанавливающие бактерии могут включать в свой метаболизм дибензотиофен и его производные [21].

Анализ литературных данных показал возможность использования микроорганизмов для обессеривания кокса. В работе [22] сообщается, что после обработки нефтяного кокса, содержащего 6,32% масс. серы, культурой *Thiobacillus Thiooxidans* степень десульфуризации составила 13,5%, а остаточное содержание серы снизилось до 5,46% масс. После повторной обработки образца кокса *Thiobacillus Thiooxidans* содержание серы удалось снизить на 93%. Применение смешанной культуры *Thiobacillus Ferrooxidans* и *Thiobacillus Thiooxidans* при десульфуризации нефтяного кокса позволило удалить из него до 92% серы за 28 дней [23]. При этом проблемами микробиологической десульфуризации кокса являются относительно длительное время проведения процесса, образование стоков выщелачивания, необходимость сушки и термической обработки полученного кокса.

**Заключение.** Удаление серы из нефтяного высокосернистого кокса является сложной задачей, требующей использования специального технологического оборудования, реагентов и материалов. Процессы обессеривания нефтяного кокса, несмотря на их разнообразие, являются многостадийными, а на эффективность проведения каждой стадии и процесса десульфуризации в целом влияет множество различных технологических факторов.

Рассмотренные и систематизированные в настоящей работе способы обессеривания нефтяного кокса могут быть использованы как для выбора стратегического направления переработки высокосернистого кокса с целью снижения содержания в нём серы, так и получения на его основе новых видов продукции, обладающей уникальными потребительскими свойствами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Капустин, В.М. Технология переработки нефти. В 4 ч. / В.М. Капустин, А.А. Гуреев. – М. : Химия, 2015. – Ч. 2 : Физико-химические процессы. – 400 с.
2. Ахметов, С.А. Технология глубокой переработки нефти и газа / С.А. Ахметов – Уфа : Гилем, 2002. – 672 с.
3. Современные и перспективные термолитические процессы глубокой переработки нефтяного сырья [Текст] : научное издание / Г.Г. Валявин [и др.] ; под ред. С.А. Ахметова. – СПб. : Недра, 2010. – 224 с.
4. Замедленное коксование как эффективная технология углубления переработки нефти / Г.И. Шакирзянова [и др.] // Вестн. технол. ун-та. – 2017. – Т. 20, № 14. – С. 75–78. <https://cyberleninka.ru/article/n/zamedlennoe-koksovanie-kak-effektivnaya-tehnologiya-uglubleniya-pererabotki-nefti/viewer>
5. Ахметов, М.М. Получение малосернистых коксов из сернистых нефтей / М.М. Ахметов. – Уфа : Изд-во ГУП ИНХП РБ, 2010. – 180 с.
6. Хайрутдинов, И.Р. Аспекты применения сернистого нефтяного кокса в производстве цемента / И.Р. Хайрутдинов, Б.С. Жирнов, И.М. Арпишкин // Башк. хим. журн. – 2012. – Т. 19, № 4. – С. 215–219. <https://cyberleninka.ru/article/n/aspekty-primeneniya-sernistogo-nefyanogo-koksa-v-proizvodstve-tsementa/viewer>
7. Заиков, Г.Е. Кислотные дожди и окружающая среда / Г.Е. Заиков, С.А. Маслов, В.Л. Рубайло. – М. : Химия, 1991. – 144 с.
8. Al-Haj Ibrahim, H. Desulfurization of Petroleum Coke: A Review / H. Al-Haj Ibrahim, B. Morsi // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 1992. – Vol. 31, Iss. 8. – P. 1835–1840. DOI:10.1021/ie00008a001
9. Сюняев, З.И. Производство, облагораживание и применение нефтяного кокса / З.И. Сюняев. – М. : Химия, 1973. – 296 с.
10. Meyers, R.A. Coal Desulfurization / R.A. Meyers. – New York, NY : Marcel Dekker, 1977. – 254 p.
11. Al-Haj Ibrahim, H. Desulphurisation of Petroleum Coke by Solvent Extraction / H. Al-Haj Ibrahim // Recent Advances in Petrochemical Science. – 2019. – Vol. 1, Iss. 3. – P. 44–49. <https://juniperpublishers.com/rapsci/pdf/RAPSCI.MS.ID.555686.pdf>
12. Кинетика термообессеривания коксов / М.М. Ахметов [и др.] // Химия твердого топлива. – 1989. – № 5. – С. 89–91. <https://elibrary.ru/item.asp?id=28230816>
13. Ахметов, М.М. Летучие продукты термолиза сернистых коксов / М.М. Ахметов, Н.Н. Карпинская // Исследования в области производства нефтяного кокса : сб. научн. тр. БашНИИ НП. – М. : ЦНИИТЭнефтехим, 1984. – Вып. 23. – С. 171–178.
14. Зайцева, С.А. Влияние микроструктуры, содержания серы и скорости нагрева на термические превращения нефтяных коксов / С.А. Зайцева, М.М. Ахметов, Р.Н. Гимаев // Изв. ВУЗов. Сер. Нефть и газ. – 1979. – № 11. – С. 39–42.
15. Phillips, C.R. Desulphurization of Athabasca petroleum coke by (a) chemical oxidation and (b) solvent extraction / C.R. Phillips, K.S. Chao // Fuel. – 1977. – Vol. 56, Iss. 1. – P. 70–72. DOI:10.1016/0016-2361(77)90045-X
16. Исследование процесса обессеривания нефтяного кокса при помощи перегретого водяного пара и получение водяного газа / Н.Я. Медовикова [и др.] // Тр. МХТИ им. Д.И. Менделеева. – 1970. – Вып. 66. – С. 7–10.

17. Реакции сераорганических соединений в нефтяном коксе / З.И. Сюняев [и др.] // Химия сераорганических соединений, содержащихся в нефтях и нефтепродуктах. – 1968. – Вып. 8. – С. 381–386.
18. Brandt, H.H. Desulphurization of petroleum coke / H.H. Brandt, R. S. Kapner // *Light Metals*. – 1984. – P. 883–887.
19. Al-ansary, A.F. Desulphurization of petroleum coke by butagas / A.F. Al-ansary, S.Y. Ezz // *Fuel*. – 1973. – Vol. 52, Iss.1. – P. 66–70. DOI: 10.1016/0016-2361(73)90015-X
20. Сарыглар, Ч.А. Биотехнологический метод переработки углей: направления и перспективы / Ч.А. Сарыглар, Р.Б. Чысыма // *Успехи соврем. естествознания*. – 2019. – № 12. – С. 186–191. DOI: 10.17513/use.37288
21. Захарянц, А.А. Биодесульфуризация дибензотиофена и его производных / А.А. Захарянц, В.П. Мурыгина, С.В. Калюжный // *Успехи соврем. биологии*. – 2005. – Т. 125, № 1. – С. 104–114.  
<http://www.enzyme.chem.msu.ru/ekbio/article/Arpenic2.pdf>
22. Tripathi, N. Desulphurization of petroleum coke / N. Tripathi, R. S. Singh, A. Gupta // *Journal of Scientific and Industrial Research*. – 2010. – Vol. 18, Iss. 1. – P. 81–85.  
<http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/10142>
23. Tripathi, N. Microbial removal of sulphur from petroleum coke (petcoke) / N. Tripathi, R.S. Singh, C.D. Hills // *Fuel*. – 2019. – Vol. 235. – P. 1501–1505. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.08.072

## REFERENCES

1. Kapustin, V.M. & Gureev, A.A. (2015). *Tekhnologiya pererabotki nefii. V 4 chastyakh. Chast' vtoraya. Fiziko-khimicheskie protsessy* [Oil refining technology. In 4 parts. Part two. Physical and chemical processes]. Moscow: Khimiya. (In Russ.).
2. Akhmetov, S.A. (2002). *Tekhnologiya glubokoi pererabotki nefii i gaza* [Technology of deep oil and gas processing]. Ufa: Gilem. (In Russ.).
3. Valyavin, G.G., Suyunov, R.R., Akhmetov, S.A. & Valyavin, K.G. (2010). In S.A. Akhmetov (Ed.). *Sovremennye i perspektivnye termoliticheskie protsessy glubokoi pererabotki neftyanogo syr'ya* [Modern and promising thermolytic processes of deep processing of petroleum raw materials]. Saint Petersburg: Nedra. (In Russ.).
4. Shakirzyanova, G.I., Sladovskaya, O.Yu., Sladovskii, A.G., Zimnyakova, A.C. & Nigmatzyanov, N.S. (2017). Zamedlennoe koksovanie kak effektivnaya tekhnologiya uglublenniya pererabotki nefii [Delayed coking as an effective technology for deepening oil refining]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 20(14), 75–78. (In Russ., abstr. in Engl.).  
<https://cyberleninka.ru/article/n/zamedlennoe-koksovanie-kak-effektivnaya-tehnologiya-uglublenniya-pererabotki-nefti/viewer>
5. Akhmetov, M.M. (2010). *Poluchenie malosernistykh koksov iz sernistykh neftei* [Obtaining low-sulfur cokes from sour oils]. Ufa: Publishing house GUP INHP RB. (In Russ.).
6. Khairutdinov, I.R., Zhirnov, B.S. & Arpishkin, I.M. (2012). Aspekty primeneniya sernistogo neftyanogo koksa v proizvodstve tsementa [Aspects of the use of sour petroleum coke in the production of cement]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 19(4), 215–219. (In Russ., abstr. in Engl.).  
<https://cyberleninka.ru/article/n/aspekty-primeneniya-fernistogo-neftyanogo-koksa-v-proizvodstve-tsementa/viewer>
7. Zaikov, G.E., Maslov, S.A. & Rubailo, V.L. (1991). *Kislotnye dozhd i okruzhayushchaya sreda* [Acid rain and the environment]. Moscow: Khimiya. (In Russ.).
8. Al-Haj Ibrahim, H. & Morsi, B. (1992). Desulfurization of Petroleum Coke: A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 31(8), 1835–1840. DOI: 10.1021/ie00008a001
9. Syunyaev, Z.I. (1973). *Proizvodstvo, oblagorazhivanie i primeneniye neftyanogo koksa* [Production, refining and use of petroleum coke]. Moscow: Khimiya. (In Russ.).
10. Meyers, R.A. (1977). *Coal Desulfurization*. New York: Marcel Dekker.
11. Al-Haj Ibrahim, H. (2019). Desulphurisation of Petroleum Coke by Solvent Extraction. *Recent Advances in Petrochemical Science*, 1(3), 44–49.  
<https://juniperpublishers.com/rapsci/pdf/RAPSCI.MS.ID.555686.pdf>
12. Akhmetov, M.M., Dolomatov, M.Yu., Amirova, S.I. & Dorokhov, I.N. (1989). Kinetika termoobesserivaniya koksov [Kinetics of thermal desulfurization of cokes]. *Khimiya tverdogo topliva* [Solid Fuel Chemistry], (5), 89–91. (In Russ.).  
<https://elibrary.ru/item.asp?id=28230816>
13. Akhmetov, M.M. & Karpinskaya, N.N. (1984). Letuchie produkty termoliza sernistykh koksov [Volatile products of sulfur coke thermolysis]. *Issledovaniya v oblasti proizvodstva neftyanogo koksa. Vyp. 23* [Research in the field of petroleum coke production, Iss. 23] (171-178). Moscow: TSNIITeneftkhim. (In Russ.).
14. Zaitseva, S.A., Akhmetov, M.M. & Gimaev, R.N. (1979). Vliyanie mikrostruktury, sodержaniya sery i skorosti nagreva na termicheskie prevrashcheniya neftyanykh koksov [Influence of Microstructure, Sulfur Content and Heating Rate on Thermal Transformations of Petroleum Cokes]. *Izvestiya VUZov. Seriya Nef' i gaz* [Proceedings of Universities. Oil and Gas Series], (11), 39–42. (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Phillips, C.R. & Chao, K.S. (1977). Desulphurization of Athabasca petroleum coke by (a) chemical oxidation and (b) solvent extraction. *Fuel*, 56(1), 70–72. DOI: 10.1016/0016-2361(77)90045-X
16. Medovikova, N.Ya., Kaftanov, S.V., Fedoseev, S.D., Rusinovskaya, N.N. & Razina, G.N. (1970). Issledovanie protsessa obesserivaniya neftyanogo koksa pri pomoshchi peregretoego vodyanogo para i poluchenie vodyanogo gaza [Investigation of the process of desulfurization of petroleum coke using superheated water vapor and the production of water gas] / *Trudy MKhTI im. D.I. Mendeleeva*. [Proceedings of the Moscow Chemical Technology Institute named after D.I. Mendeleev], (66), 7–10. (In Russ.).
17. Syunyaev, Z.I., Gimaev, R.N., Abyzgil'din, Yu.M., Malyatova, G.P. & Zaitseva, S.G. (1968). Reaktsii seraorganicheskikh soedinenii v neftyanom kokse [Reactions of organosulfur compounds in petroleum coke]. *Khimiya seraorganicheskikh soedinenii, sodержashchikhsya v neftyakh i nefteproduktakh* [Chemistry of Organosulfur Compounds Containing in Petroleum and Petrochemicals], (8), 381–386. (In Russ.).

18. Brandt, H.H. & Kapner, R.S. (1984). Desulphurization of petroleum coke. *Light Metals*, (883–887). Warrendale, Pa: Metallurgical Society of AIME.
19. Al-ansary, A.F. & Ezz, S.Y. (1973). Desulphurization of petroleum coke by butagas. *Fuel*, 52(1), 66–70.  
DOI: 10.1016/0016-2361(73)90015-X
20. Saryglar, Ch.A. & Chysyma, R.B. (2019). Biotekhnologicheskii metod pererabotki uglei: napravleniya i perspektivy [Biotechnological Method of Coal Processing: Directions and Prospects]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya [Successes of modern natural science]*, (12), 186–191. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.17513/use.37288
21. Zakharyants, A.A., Murygina, V.P. & Kalyuzhnyi, S.V. (2005). Biodesul'furizatsiya dibenzotiofena i ego proizvodnykh [Biodesulfurization of dibenzothiophene and its derivatives]. *Uspekhi sovremennoi biologii [Advances in modern biology]*, 125(1), 104–114. (In Russ., abstr. in Engl.).  
<http://www.enzyme.chem.msu.ru/ekbio/article/Arpenic2.pdf>
22. Tripathi, N., Singh, R.S. & Gupta, A. (2010). Desulphurization of petroleum coke. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 18(1), 81–85.  
<http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/10142>
23. Tripathi, N., Singh, R.S. & Hills, C. D. (2019). Microbial removal of sulphur from petroleum coke (petcoke). *Fuel*, 235, 1501–1505. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.08.072

Поступила 17.02.2022

## METHODS OF DESULFURIZATION OF PETROLEUM COKE (OVERVIEW)

D. YUKHNO, A. YERMAK

*A summary of literature data on methods for removing sulfur from high-sulfur petroleum coke is presented. The following directions of petroleum coke desulfurization are considered: solvent extraction, thermal desulfurization, oxidative desulfurization, desulfurization in an atmosphere of sulfur-containing gas, desulfurization in an atmosphere of hydrocarbon gases, hydrodesulphurization, desulfurization by introducing various additives, microbiological desulfurization. The features are considered and the effectiveness of the above methods of desulfurization of petroleum coke is indicated. It is shown that the removal of sulfur from petroleum high-sulfur coke is a complex problem. At the same time, the processes of desulfurization of petroleum coke, despite their diversity, are multi-stage, and the efficiency of each stage and the desulfurization process as a whole is affected by many different technological factors. The methods of desulfurization of petroleum coke considered and systematized in this work can be used both to select a strategic direction for the processing of high-sulfur coke in order to reduce its sulfur content, and to obtain new types of products based on it with unique consumer properties.*

**Keywords:** petroleum coke, sulfur, coke desulfurization methods, solvent extraction, thermal desulfurization, oxidative desulfurization, desulfurization by gases, hydrodesulphurization, desulfurization by additives, microbiological desulfurization.

УДК 665.766.5

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КАРБОНАТАЦИИ НА КАЧЕСТВО ВЫСОКОЩЕЛОЧНЫХ СУЛЬФОНАТОВ

*А.В. МЕЛЕШКО, П.Ф. ГРИШИН, Д.А. ДОБРОВОЛЬСКИЙ,  
канд. техн. наук, доц. А.В. СПИРИДОНОВ*

*(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

*Исследованы особенности влияния температуры на стадии карбонатации на структуру, качество и выход высокощелочной сульфонатной присадки. Рассмотрены стадии получения данной присадки. Представлен обзор научной литературы по теме. Приведены результаты исследований, полученные в ходе лабораторных синтезов высокощелочной сульфонатной присадки, оказавших положительное влияние на качество получаемой присадки для ее применения в структуре масла, используемого в различных условиях.*

**Ключевые слова:** *высокощелочные сульфонатные присадки, карбонатация, перекарбонатация дисперсные системы, агрегативная устойчивость, химическая конденсация, мицеллы, синтез, факторы процесса карбонатирования, нейтрализация, интермедиат, фильтруемость.*

**Введение.** Присадки – синтетические химические вещества, используемые для изменения различных свойств смазочных масел: они улучшают существующие свойства базового масла, устраняют неблагоприятные характеристики или придают новые свойства базовому маслу<sup>1</sup> [1]. Основными функциональными видами присадок являются: антиоксиданты, модификаторы вязкости, понижающие температуру застывания (депрессоры), детергенты, диспергаторы, пеногасители, противоизносные присадки, модификаторы трения и антикоррозионные присадки [2; 4]. Особый класс присадок к смазочным маслам представлен щелочными (карбонатированными) присадками, которые были разработаны для нейтрализации кислых соединений, образующихся в результате сгорания топлива и окисления масла, а также для предотвращения агломерации сажи благодаря наличию в присадке поверхностно-активного маслорастворимого вещества. Скопление нерастворимых в масле частиц может быть очень разрушительным для двигателя, поскольку недостаток подвижности поршневых колец и их закоксовывание приводят к прорыву газов в картер, перегреву и задиру поршня в результате образования нагара на днище поршня, ухудшающего теплоперенос из-за создаваемого нагаром (лаком) термического сопротивления [3]. Присадки, предотвращающие развитие всех этих пагубных эффектов, известны в литературе как детергенты, или дисперсанты. Последний термин более точен. Основные функции этих присадок:

- нейтрализация кислых соединений, образующихся при сгорании топлива и окислении масла;
- предотвращение образования лака и нагара на рабочих частях двигателя;
- предотвращение агломерации нерастворимых в масле частиц.

Существует два типа моющих/диспергирующих присадок: нейтральные и щелочные. Нейтральные моющие/диспергирующие присадки, как правило, состоят только из поверхностно-активного маслорастворимого соединения и разбавителя, роль которого играет минеральное дистиллятное масло. Эти присадки предназначены для диспергирования сажи и частиц износа. К сверхосновным, или щелочным, моющим/диспергирующим присадкам относят дисперсные системы, представляющие собой золь нерастворимого в масле соединения (обычно  $\text{CaCO}_3$ ), стабилизированного маслорастворимым поверхностно-активным веществом, растворителем выступают те же минеральные дистиллятные масла [5]. В качестве стабилизаторов могут применяться соли алкилароматических сульфокислот, алкилфеноляты и алкилсалицилаты щелочноземельных металлов.

Поверхностно-активные вещества действуют как диспергирующий агент, в то время как карбонат металла – как нейтрализующий агент, а масло-разбавитель – как совместимый агент. Термин<sup>2,3</sup> [7] «сверхосновный» (щелочной) показывает, что количество коллоидного карбоната металла в ядрах частиц больше, чем количество, необходимое для нейтрализации поверхностно-активной кислоты. В противном случае он описывается как «нейтральный» или «с низкой основностью» (низкой щелочностью), что указывает на то, что сверхосновные (высокощелочные) моющие присадки обладают большей кислотонейтрализующей способностью, чем их нейтральные соли.

<sup>1</sup> Simon, A.G. Watson. Lubricant-Derived Ash: In-Engine Sources and Opportunities for Reduction / A.G. Simon // Massachusetts Institute of Technology Libraries. – 2010. – P. 35–36.

<sup>2</sup> Improvements in or relating to the preparation of basic oil-soluble polyvalent metal salts of organic acids and solutions of said basic salts in oils, and the resulting salts : Pat. 786 167 G B, IC C10 m. / G. Ellis, J. Hartley, J.C. Moseley (GB); Shell Research Limited (GB). – No. 27853/54. – Publ. 13.11.57.

<sup>3</sup> Фиалковский, Р.В. Исследование процесса карбонатации в производстве высокощелочных детергентно-диспергирующих присадок к моторным маслам : дис. ... канд. техн. наук / Р.В. Фиалковский. – Киев, 1978. – 237 л.

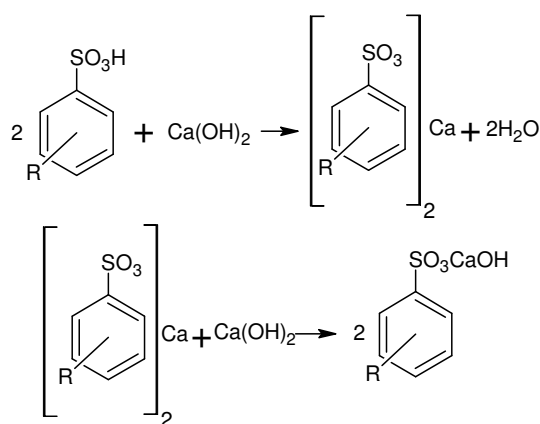
В настоящей работе металлосодержащие моющие/диспергирующие присадки будут приготовлены в два этапа:

- нейтрализация синтетических линейных сульфокислот со средней молекулярной массой 480 г/моль гидроксидом кальция;
- карбонатация полученного продукта в среде смеси неполярного органического растворителя и метанола.

Для идентификации некоторых соединений был использован метод инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR). Параметры распределения частиц по размерам в готовых продуктах были проанализированы методом динамического рассеяния света (DLS). Измерены выходы целевого продукта, коллоидная стабильность, объемная доля осадка, фильтруемость.

**Теоретическая часть.** Наиболее часто используемые моющие средства получают из сульфокислот. Сульфонаты имеют общую формулу  $(\text{RSO}_3)_x\text{Me}$  и выпускаются на основе нефтяного и синтетического сырья. Далее рассмотрим стадии получения синтетических сульфонатных присадок, на основе которых будет проводиться исследование.

*Первая стадия. Нейтрализация (ди)алкилбензолсульфоновых кислот.* Первая стадия представляет собой нейтрализацию (ди)алкилбензолсульфоновых кислот гидроксидом кальция с получением нейтральных и основных (в избытке гидроксида кальция) алкилбензолсульфонатов кальция:



Далее алкилбензолсульфонаты будем обозначать как  $(\text{RPhSO}_3)_2\text{Ca}$ .

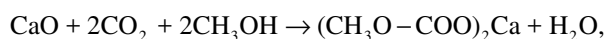
Нейтральный сульфонат кальция получают в реакторах смешения. Затем реакционную смесь подвергают термической обработке, в результате которой происходит осушка от реакционной воды и растворителя, а также, согласно имеющимся литературным данным [6],  $(\text{RPhSO}_3)_2\text{Ca}$  в результате «термической стабилизации» частично переходит в  $\text{RPhSO}_3\text{CaOH}$ , который обладает большей активностью при стабилизации золя карбоната кальция в сравнении с  $(\text{RPhSO}_3)_2\text{Ca}$  (сульфонаты типа  $\text{RPhSO}_3\text{CaOH}$  лучше адсорбируются на частицах  $\text{CaCO}_3$ , и (ввиду более высокой растворимости в воде) могут служить зародышами кристаллизации).

*Вторая стадия. Карбонатация реакционной смеси.* Вторая стадия представляет собой нейтрализацию гидроксида кальция углекислым газом с образованием золя карбоната кальция и последующую стабилизацию золя присутствующим поверхностно-активным компонентом – (ди)алкилбензолсульфонатом (нейтральным и/или основным) кальция.

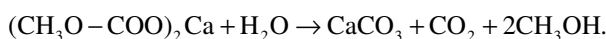
Традиционно процесс карбонатации проводят в диапазоне температур от ~5 до 80 °С. Процесс карбонатации не имеет нижней границы температуры, при которой проводится процесс. В основном ограничения в ныне используемых технологиях производства высокощелочных сульфонатных присадок являются следствием невозможности поддержания более низких температур в условиях производства на данный момент. Изученная литература свидетельствуют о возможности повышения фильтруемости и выходов продукта при снижении температур при проведении процесса карбонатации.

Природа процессов, протекающих в ходе карбонатации, на данный момент выяснена не окончательно, но имеющиеся литературные данные и собранная в лаборатории информация (ИК-спектры карбонатации при разных температурах) указывают на образование некоего интермедиата в присутствии метанола.

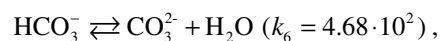
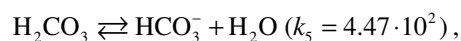
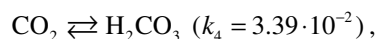
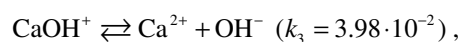
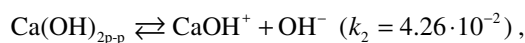
Авторами [7] была предложена теория, что в присутствии избытка гидроксида кальция возможно протекание процесса



далее

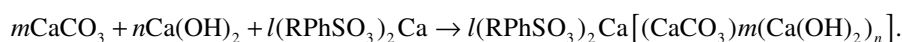


В присутствии достаточного количества воды возможны также следующие процессы:



Таким образом, при низких pH вероятно побочное образование растворимого в воде гидрокарбоната кальция (или же образование за счет растворения золя), что обуславливает необходимость поддержания низких в сравнении с концентрацией гидроксида кальция концентраций  $\text{CO}_2$  в реакционной смеси в ходе карбонатации.

Выделяющийся карбонат кальция образует золь, полидисперсность и средний размер частиц которого определяются скоростью гидролиза диметилкарбоната кальция, а также концентрацией ПАВ (сульфоната кальция), стабилизирующего данный золь. Схема стабилизации в присутствии избытка гидроксида кальция может быть представлена следующим образом:



Карбонат кальция, находящийся в ядрах образующихся мицелл, является аморфным, однако подвержен переходу в кристаллическое состояние (кальцит) и дальнейшим полиморфным переходам между кристаллическими формами. Данные переходы способствуют дестабилизации золя с агрегацией частиц и их последующим осаждением (явление перекарбонатации). Присутствие примеси гидроксида кальция в ядрах предотвращает данный процесс (вероятно, ингибируя переход из аморфного состояния в кристаллическое, будучи дефектом структуры)<sup>4</sup> [7].

*Третья стадия. Удаление метанола, воды и растворителя.* После стадии карбонатации в реакторе создают разряжение и начинают отгонку метанола, воды и растворителя, избегая перегрева неочищенного продукта ввиду снижения коллоидной устойчивости, увеличения вязкости и падения щелочного числа в результате перегрева

Затем присадку разбавляют растворителем, охлаждают и подвергают очистке.

**Ход работ.** Для выяснения влияния температуры карбонатации на процесс производства данной присадки были проведены лабораторные исследования, ход которых описан ниже.

Было проведено 5 синтезов, на основании результатов которых получена зависимость дисперсности золя карбоната кальция от температуры карбонатации, а также сделаны выводы о влиянии изменения температуры карбонатации на качество и выход целевого продукта. Все синтезы проводились в равных условиях в соответствии с описанными в теоретической части стадиями, единственным изменяемым параметром являлась температура карбонатации.

**Методика проведения синтезов.** Сульфокислоту, растворитель, масло-разбавитель, воду и гидроксид кальция смешивали в лабораторном реакторе, снабженном механическим перемешивающим устройством, распределительным устройством для подачи газа, обратным холодильником и термостатом. На стадии получения нейтрального синтетического сульфоната кальция (далее НССК) реакционную смесь выдерживали в течение 1 ч при температуре 45 °С.

Далее к реакционной смеси, содержащей НССК, добавляли растворитель, метанол и избыток гидроксида кальция. После чего охлаждали реакционную смесь до 20 °С. Во время стадии карбонатации реакционную смесь перемешивали в лабораторном реакторе с возможностью поддержания температуры и подавали  $\text{CO}_2$  в течение 3 ч. После карбонатации добавляли балансовое количество масло-разбавителя. Растворитель удаляли с помощью роторного испарителя при температуре 180 °С. Полученные продукты очищали методом фильтрования.

<sup>4</sup> Фиалковский, Р.В. Исследование процесса карбонатации в производстве высокощелочных детергентно-диспергирующих присадок к моторным маслам : дис. ... канд. техн. наук / Р.В. Фиалковский. – Киев, 1978. – 237 л.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Высокощелочные сульфонатные присадки в углеводородной среде представляют в виде дисперсных систем, состоящих из мицеллярных маслорастворимых поверхностно-активных веществ, адсорбированных на поверхности золя карбоната щелочноземельного металла. Таким образом, молекулы стабилизатора ориентированы гидрофильной частью к нерастворимой частице, а лиофильной, т.е. углеводородным хвостом, к дисперсионной среде – углеводородному растворителю. Это обосновано тем, что молекула поверхностно-активного вещества имеет дифильное (амфифильное) строение и может адсорбироваться своей полярной частью на полярном адсорбенте ( $\text{CaCO}_3$ ), при этом обращаясь своей неполярной частью в сторону неполярного (углеводородного) растворителя.

Данная теория подтверждается также правилом Ребиндера (правилом уравнивания полярностей): согласно справочным данным, диэлектрическая проницаемость растворителя (минерального масла) примерно равна 2, при этом диэлектрическая проницаемость карбоната кальция колеблется в пределах от 6 до 9 в зависимости от полиморфной модификации, а диэлектрическая проницаемость алкилбензолсульфоната кальция 5-6. Таким образом, правило Ребиндера соблюдается:  $\epsilon(\text{CaCO}_3) > \epsilon(\text{ПАВ}) > \epsilon(\text{растворитель})$ , что свидетельствует в пользу предпочтительной адсорбции алкилбензолсульфонатов кальция на границе раздела карбонат кальция – растворитель [8].

На рисунке 1 представлен схематический вид частицы  $\text{CaCO}_3$ , стабилизированной алкилбензолсульфонатом кальция.

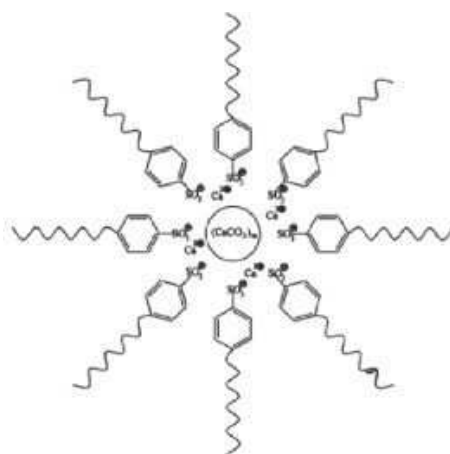


Рисунок 1. – Структура мицеллы

Рассмотрим, как изменение параметров процесса может влиять на процесс образования и рост частиц золя.

Способ получения дисперсных систем путем объединения (конденсации) молекул и ионов в агрегаты с размерами  $10^{-7}$ – $10^{-9}$  м называется конденсационным методом. Система из гомогенной переходит в гетерогенную, т.к. возникает новая фаза [12; 13].

В любом конденсационном методе процесс образования новой фазы состоит из двух последовательных стадий: образования центров конденсации и роста этих центров. При этом важно обеспечить высокую скорость образования зародышей новой фазы и малую скорость их роста для получения высокодисперсных систем, золь, размер частиц дисперсной фазы которых составляет  $10^{-7}$ – $10^{-9}$  м.

В случае химической конденсации это условие выполняется при сливании очень разбавленных растворов или при добавлении, малыми долями, высококонцентрированного раствора к очень разбавленному. В последнем случае высокая концентрация первого раствора обеспечивает высокую скорость образования большого количества центров конденсации, а малая концентрация второго – ограничивает вследствие замедленной диффузии скорость их роста.

На основании этого было выдвинуто предположение, что для образования большого количества центров конденсации и далее их роста до частиц требуемого размера необходимо проводить процесс следующим образом.

В предположении, что образование карбоната кальция можно представить в виде двух последовательных реакций, описанных выше, была выдвинута следующая гипотеза: необходимо создать такие условия, чтобы до образования зародышей промежуточное соединение имело максимально возможную концентрацию. Далее необходимо инициировать протекание второй реакции, что в свою очередь обеспечит сначала насыщение, а после и пресыщение раствора реакционной смеси с образованием центров конденсации. Таким образом, скорость образования зародышей будет максимальной<sup>5</sup>. Следующая стадия – рост частиц, должна проводиться со скоростью, значительно меньшей скорости образования зародышей.

<sup>5</sup> Booth, J. Surface engineering and tribology for future engines and drive lines : Advances in Electrostatic Health Monitoring of Ttribocontacts conference proceedings of 50th IMechE tribology group anniversary conference / J. Booth. – 2006.

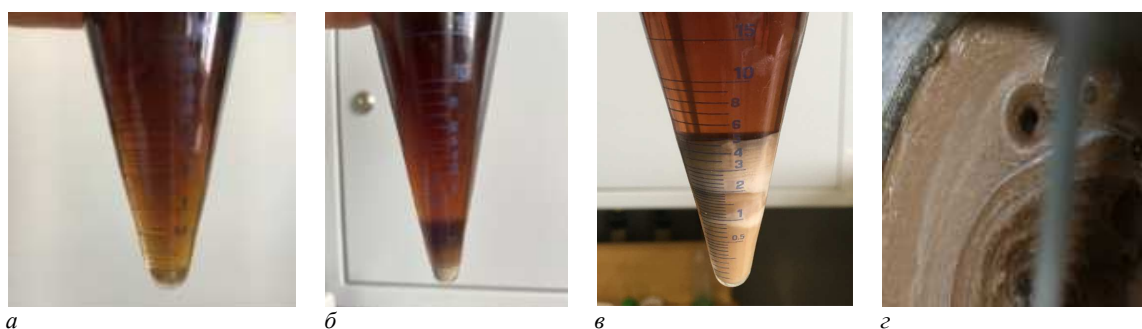
Судя по ИК-спектрометрии реакционной смеси ранее проведенных синтезов, было замечено, что накопление промежуточного соединения происходит при низких температурах, как правило, ниже 28 °С. При повышенных температурах, предположительно, преобладает вторая реакция – образование непосредственно карбоната кальция. Значит, с целью увеличения концентрации промежуточного соединения и дальнейшего образования центров конденсации необходимо проводить часть синтеза при пониженных температурах и повышенном расходе углекислого газа с дальнейшим резким подъемом температуры, инициирующим протекание второй реакции. Затем для роста частиц газ подается при высокой температуре с пониженным расходом. Таким путем обеспечивается резкое образование центров конденсации с медленным ростом образовавшихся частиц [11; 12].

В таблице представлены полученные данные: изменяемые параметры процесса и основные характеристики продукта. Синтез № 4 является типовым процессом, синтез № 5 – процесс, в котором на стадии выдержки произошло гелеобразование.

Таблица. – Изменяемые параметры процессов и основные характеристики продуктов

№	Избыток ГОК на карбонатацию, %	Температура карбонатации, °С	Объемная доля осадка, % об.	Щелочное число, мг КОН/г	КУ, %	Размер мицелл, нм
1	30	18–30	0,5	335,12	98,2	≈12,46
2	30	18–30	1,0	324,49	97,6	≈15,31
3	30	18–35	1,3	328,47	97,6	≈16,36
4	30	18–40	5,5	336,61	93,5	≈750
5	30	15–25	–	–	–	–

На рисунке 2 отражены результаты проведенных синтезов.



*a* – синтез № 1; *b* – синтез № 3; *v* – синтез № 4; *z* – синтез № 5

Рисунок 2. – Образцы присадки, полученные в ходе синтезов

На основании полученных данных синтезов № 1–3 построим зависимость изменения размера мицелл от изменяемого параметра – температура карбонатации. Зависимость представлена на рисунке 4.

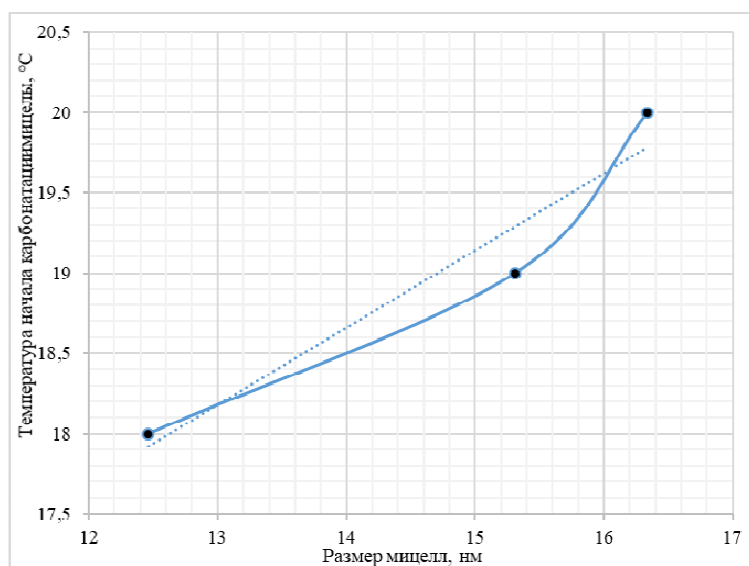


Рисунок 4. – Изменение размера мицелл за счет снижения температуры карбонатации



Из графика видно, что при уменьшении температуры карбонатации размер мицелл уменьшается, то есть поставленная цель достигается. При уменьшении размера мицелл снижается скорость фильтрования, а также увеличивается коллоидная устойчивость. Снижение скорости фильтрования, по-видимому, связано с изменением физических, а в частности реологических, свойств жидкости. Предположительно, жидкость принадлежит классу неньютоновских жидкостей, у которых вязкость при данной температуре и давлении не остается постоянной, а изменяется в зависимости от скорости сдвига или его продолжительности. К какому разряду неньютоновских жидкостей принадлежит реакционная смесь после карбонатации, еще предстоит выяснить.

Также проводился анализ реакционной смеси в ходе синтеза образцов № 2 и № 4 с помощью ИК-спектрометрии для определения изменения состава получаемой реакционной смеси (рисунки 5, 6).

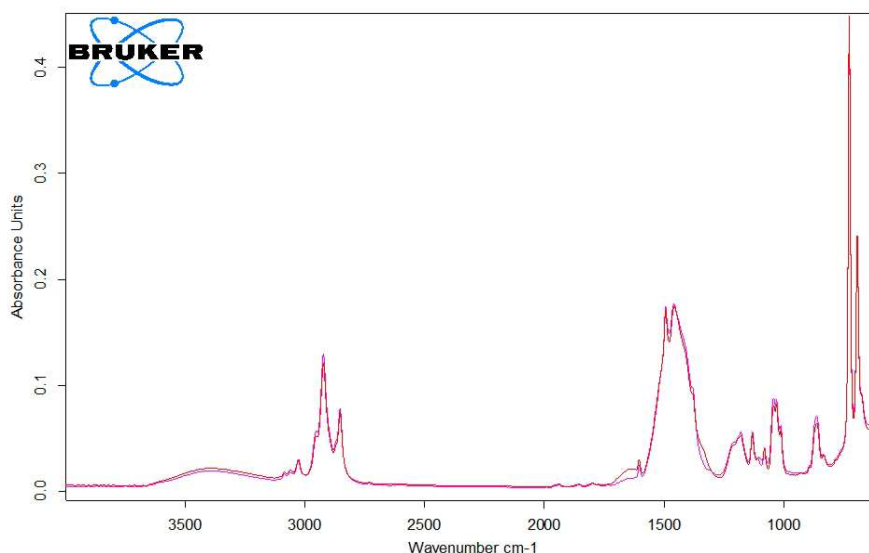


Рисунок 5. – ИК-спектры реакционной смеси № 4 сразу после подачи  $\text{CO}_2$  и после 1 ч выдержки при  $40^\circ\text{C}$

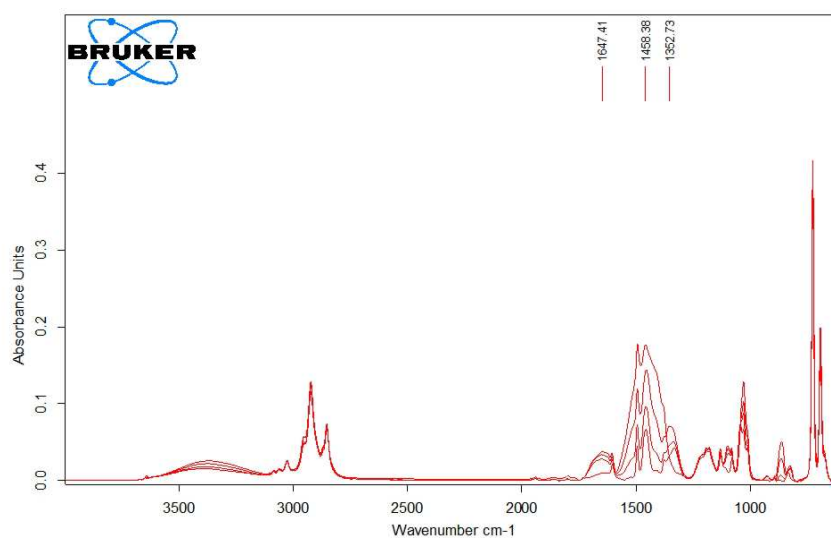


Рисунок 6. – ИК-спектры реакционной смеси № 2: 1 ч, 2 ч, 3 ч подачи  $\text{CO}_2$  и 1 ч выдержки при  $40^\circ\text{C}$

Как видно, в ходе карбонатации при низкой температуре, наряду с увеличением интенсивности поглощения в диапазоне  $1350\text{--}1550\text{ см}^{-1}$ , наблюдаемой также и при проведении карбонатации при более высоких температурах, происходит увеличение интенсивности поглощения при  $1300\text{--}1350\text{ см}^{-1}$  и при  $1600\text{--}1700\text{ см}^{-1}$ . В ходе подъема температуры интенсивность данных полос поглощения падает, в то время как интенсивность поглощения в диапазоне  $1350\text{--}1550\text{ см}^{-1}$  продолжает расти. Подобное поведение реакционной смеси согласуется с двухстадийным механизмом карбонатации, где на первой стадии при участии метанола образуется интермедиат, в дальнейшем подвергающийся гидролизу с образованием карбоната кальция, а также метанола и углекислого газа.

При низкой температуре вторая стадия – процесс гидролиза – является лимитирующей, в результате чего подача углекислого газа приводит к накоплению интермедиата. Последующий подъем температуры приводит к ускорению гидролиза интермедиата с образованием карбоната кальция, чем объясняется рост целевой полосы поглощения.

Также была оценена возможность фильтрации полученных продуктов синтезов № 2 и № 4. Для этого растворы, полученные после удаления растворителя и разбавления толуолом, были подвергнуты фильтрованию при давлении 0,3 МПа через фильтр с размером пор 0,8 мкм, в качестве вспомогательного фильтрующего агента к растворам была добавлена диатомовая земля IFUB-30 (1 % масс.). В случае с синтезом № 2 до полной остановки фильтрации удалось отфильтровать ~100 мл раствора, однако в случае синтеза 4 реакционная смесь, получаемая в соответствии с текущей технологией (28–40), является нефильтруемой (получили 5 мл реакционной смеси за более долгое время). Полученные после фильтрации растворы были исследованы методом DLS, результаты исследования представлены на рисунке 7. Образцы после фильтрования, дополнительно разбавлены до соотношения ССК-300: толуол = 1:10.

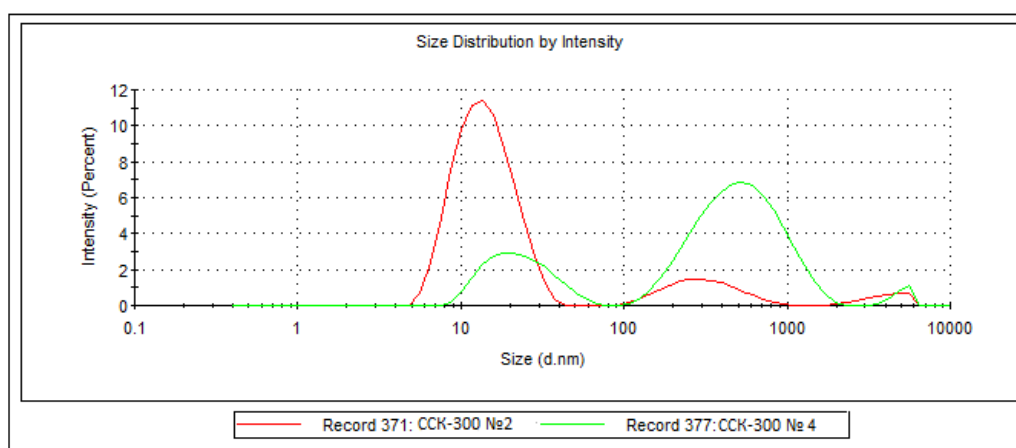


Рисунок 7. – Распределения частиц по размерам для образцов, полученных в синтезах № 4 (зеленый) и № 2 (красный)

Согласно полученным результатам распределение частиц по размерам для образца в синтезе № 2 является практически мономодальным с преобладающей фракцией частиц со средним размером 15 нм, в то время как в случае синтеза № 4 распределение широкое бимодальное, средний размер частиц целевой фракции составляет порядка 20 нм. Такие формы распределений свидетельствуют об отсутствии или же наличии агрегации частиц в случае синтезов № 2 и № 4 соответственно.

**Закключение.** Изменение температуры карбонатации в ходе получения лабораторных образцов сульфонатных присадок привели к положительному результату: уменьшению размера мицелл, увеличению коллоидной устойчивости, уменьшению количества шлама (твердого осадка) в целом. Так, на основании полученных результатов синтезов на данном этапе можно сделать следующие выводы. Снижение температуры до 20–30 °С приводит к заметному снижению количества осадка до очистки, а значит, к увеличению выхода продукта. Также уменьшается размер мицелл, что увеличивает коллоидную устойчивость присадки. Образцы, полученные по отработанным технологиям, с щелочным числом до 300 мг КОН/г являются фильтруемыми. Для более детального изучения влияния температуры карбонатации на качество получаемых высокощелочных сульфонатных присадок необходимо проводить дальнейшие исследования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Dimitrov, Al. Obtained and investigation of the ecological film-forming anticorrosion oil compositions (FAOC), reducing oil consumption during exploitation / Al. Dimitrov, D. Yordanov, P. Petkov // *Petroleum and coal*. – 2012. – 54(2). – P. 114–119.
2. Preparation, characterization and evaluation of some metallic lube oil additives / Nehal S. Ahmed [et al.] // *IOSR Journal of Applied Chemistry*. – 2014. – Vol. 7, Iss. 7, Ver. 1. – P. 56–67.
3. Synthesis and evaluation of ashless detergent/dispersant additives for lubricating engine oil / Nehal S. Ahmed [et al.] // *Tribology International*. – 2015. – № 67. – P. 622–629.
4. Morizur, M.F. Antiwear actions of additives in solid dispersion / M.F. Morizur, O. Teyssset // *Lubrication Science*. – 1992. – № 4. – P. 277–299.
5. Combination of ashless antiwear additives with metallic detergents: interactions with neutral and overbased calcium sulfonates / M. Najman [et al.] // *Tribology International*. – 2006. – № 39. – P. 342–355.

6. Главати, О.Л. Состояние и тенденции развития разработок в области присадок к маслам / О.Л. Главати, Г.И. Чередниченко, Ю.Т. Гордаш. – М. : ЦНИИТЭнефтехим, 1978. – 58 с.
7. Ghost, P. Study of the influence of some polymeric additives as viscosity index improvers and pour point depressants / P. Ghost, M. Das // *Journal of Petroleum Science and Technology*. – 2014. – № 119(9). – P. 79–84.
8. Никольский, Б.П. Справочник химика. Т. 1. Общие сведения. Строения веществ. Свойства важнейших веществ / Б.П. Никольский. – М. : Химия, 1966. – 1070 с.
9. Tribology – Fundamentals and Advancements: “Innovative “Green” Tribological Solutions for Clean Small Engines” / X. Fernández-Pérez [et al.] // *Tribology International*. – 2011. – P. 727–736.
10. George, S. Effect of diesel soot contaminated oil on engine Wear / S. George., S. Balla, M. Gautam // *Wear*. – 2007. – № 262(9). – P. 1113–1122.
11. Mang, T. Lubricants and lubrication Additives / T. Mang, W. Dresel. – 2nd Ed. – Weinheim, Germany : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2007. – P. 88–100.
12. V. Duhalt, R. Environmental impact of used motor oil / R. V. Duhalt // *Science of The Total Environment*. – 1989. – № 79(1). – P. 1–23.

## REFERENCES

1. Dimitrov, Al., Yordanov, D. & Petkov, P. (2012). Obtained and investigation of the ecological film-forming anticorrosion oil compositions (FAOC), reducing oil consumption during exploitation. *Petroleum and coal*, 54(2), 114–119.
2. Nehal S. Ahmed, Amal M. Nassar, Yasser K. Abd el menem & Reham I. El-shazly. (2014). Preparation, characterization and evaluation of some metallic lube oil additives. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 7 (Iss. 7, Ver. 1), 56–67.
3. Nehal, S.A., Hamdy, S.A., Ahmed, F.E. & Amal, M.N. (2015). Synthesis and evaluation of ashless detergent/dispersant additives for lubricating engine oil. *Tribology International*, (67), 622–629.
4. Morizur, M.F. & Teyssset, O. (1992). Antiwear actions of additives in solid dispersion. *Lubrication Science*, (4), 277–299.
5. Najman, M., Kasrai, M., Bancroft, G.M., & Davidson, R. (2006). Combination of ashless antiwear additives with metallic detergents: interactions with neutral and overbased calcium sulfonates. *Tribology International*, (39), 342–355.
6. Glavati, O.L., Cherednichenko, G.I. & Gordash, Yu.T. (1978). *Sostoyaniye i tendentsii razvitiya razrabotok v oblasti prisadok k mas-lam* [Status and development trends in the field of oil additives]. Moscow: TSNITЭнефтехим. (In Russ.).
7. Ghost, P. & Das, M. (2014). Study of the influence of some polymeric additives as viscosity index improvers and pour point depressants. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 119(9), 79–84.
8. Nikol'skiy, B.P. (ed.). (1966). *Spravochnik khimika. T. 1. Obshchiye svedeniya. Stroyeniya veshchestv. Svoystva vazhneyshikh veshchestv* [Handbook of a chemist. Vol. 1. General information. Structures of substances. Properties of the most important substances]. Moscow: Khimiya. (In Russ.).
9. Fernández-Pérez, X., Igartua, A., Nevshupa, R., Zabala, P., Zabala, B., Luther, R. ... Genovesio, C. (2011). Tribology – Fundamentals and Advancements: Innovative “Green” Tribological Solutions for Clean Small Engines. *Tribology International*, 727–736.
10. George, S., Balla, S. & Gautam, M. (2007). Effect of diesel soot contaminated oil on engine Wear. *Wear*, 262(9), 1113–1122.
11. Mang, T. & Dresel, W. (2007). *Lubricants and lubrication Additives*, (88–100). Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA.
12. V. Duhalt, R. (1989). Environmental impact of used motor oil. *Science of The Total Environment*, 79(1), 1–23.

Поступила 28.11.2021

## INFLUENCE OF CARBONATION TEMPERATURE ON THE QUALITY OF HIGHLY ALKALINE SULFONATES

A. MELESHKO, P. HRYSHYN, D. DOBROVOLSKY, A. SPIRIDONOV

*The features of the effect of temperature at the stage of carbonation, which affect the structure, quality and yield of a highly alkaline sulfonate additive, have been investigated. The stages of obtaining this additive are considered, and a literature review is presented of how a change in temperature can affect the quality of the product. The results of the study of highly alkaline sulfonate additives obtained in the course of laboratory syntheses are reflected. The studies carried out had a positive effect on the quality of the resulting additive, as well as its further use in the structure of the oil used in various conditions.*

**Keywords:** highly alkaline sulfonate additives, carbonation, overcarbonation of dispersed systems, aggregate stability, chemical condensation, micelles, synthesis, factors of the carbonation process, neutralization, intermediate, filterability

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Голембиевский А.И.</i> Станок с гибридными формообразующими группами для зубофрезерования цилиндрических колес с наклонными зубьями.....	2
<i>Пилипенко С.В.</i> Оптимизация параметров калибровки станков ХПТ с целью получения рационального распределения обжатия по диаметру трубы вдоль конуса деформации.....	10
<i>Дьяконов В.А., Пилипенко С.В., Штемпель О.П.</i> Влияние деформации на механические свойства луженой жести.....	18
<i>Дудан А.В., Вигерина Т.В., Кравчук В.И., Пилипенко И.И.</i> Повышение износостойкости деталей тяжело нагруженных узлов трения автомобилей.....	25
<i>Емельянов В.В., Бордусов С.В.</i> Формирование рисунка в пленке нитрида кремния.....	31
<i>Матяс А.Н.</i> Исследование влияния режимов магнитно-импульсной обработки на поверхностные характеристики и электрофизические свойства коррозионно-стойкой стали.....	38
<i>Костин П.А., Замостоцкий Е.Г., Рассохина И.М.</i> Анализ экранирующих и антистатических свойств трикотажных полотен специального назначения.....	46

### ТРАНСПОРТ

<i>Аземша С.А., Шуст О.Н.</i> Разработка мероприятий по снижению количества и тяжести дорожно-транспортных происшествий с участием пешеходов в г. Гомеле.....	51
<i>Семченков С.С., Капский Д.В.</i> Управление режимом работы маршрутного пассажирского транспорта секторальным методом.....	59
<i>Семченков С.С., Капский Д.В.</i> Разработка рациональных графиков работ водителей маршрутного пассажирского транспорта при использовании секторального метода.....	64
<i>Лю Юйвэй, Капский Д.В., Скирковский С.В.</i> Влияние условий организации движения на работу остановочных пунктов на магистральной сети крупнейших симбиотических городов.....	73
<i>Серебряков И.А.</i> Анализ эффективности алгоритмов диагностирования двигателей внутреннего сгорания автомобилей.....	80
<i>Капский Д.В., Ходоскин Д.П.</i> Разработка мероприятий по снижению аварийности в попутном транспортном потоке.....	86

### ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

<i>Иванов В.П., Кульбей А.Г., Бондарев А.С.</i> Оценка и использование остаточного ресурса оборудования нефтехимического комплекса.....	92
<i>Самусевич В.Н., Булавка Ю.А.</i> Алгоритм управления профессиональными рисками в организациях топливной и химической промышленности.....	98
<i>Иванов В.П.</i> Ремонт металлических конструкций предприятий нефтехимического комплекса.....	104
<i>Юхно Д.С., Ермак А.А., Сябарева Е.В.</i> Изучение свойств прокаленного нефтяного кокса, полученного из дистиллятного и остаточного сырья.....	110
<i>Якубовский С.Ф., Булавка Ю.А.</i> Анализ сорбционной способности по отношению к нефти и нефтепродуктам природных растительных материалов.....	115
<i>Юхно Д.С., Ермак А.А.</i> Способы обессеривания нефтяного кокса (обзор).....	121
<i>Мелешко А.В., Гришин П.Ф., Добровольский Д.А., Спиридонов А.В.</i> Влияние температуры карбонатации на качество высокощелочных сульфонатов.....	128