

MIESIĘCZNIK  
POŁOCKI.

Т о м I.  
Р о к 1818.

*«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 ДЗЯРЖАЎНАГА ЎНІВЕРСІТЭТА  
Серыя В. Прамысловасць. Прыкладныя навукі

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

---

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

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

---

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

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

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

Подписано к печати 27.08.2024. Бумага офсетная 80 г/м<sup>2</sup>. Формат 60×84<sup>1/8</sup>. Цифровая печать.  
Усл. печ. л. 16,74. Уч.-изд. л. 20,17. Тираж 50 экз. Заказ 286.

**МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ**

УДК 681.586.67+678.065

DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-2-7

**АНАЛИЗ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В РЕЗИНОСМЕСИТЕЛЯХ***д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК**(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)**А.С. ФРИК**(ООО «Поинт», Полоцк)*

*Приведен анализ отечественных и зарубежных преобразователей термоэлектрических (термопар) для измерения температуры резиновой смеси в резиносмесителях. Рассмотрены преимущества и недостатки существующих конструкций термопар. Представлена конструкция термопары, разработанная компанией ООО «Поинт». Дан сравнительный анализ влияния материала наконечников термопар, материала покрытия наконечников и диаметра электродов термопар на прочностные характеристики готового изделия, а также на показатели температурной инерции. Показаны результаты испытаний на температурную инерцию разработанной термопары и ее аналога. Даны рекомендации по проведению опытно-промышленной эксплуатации при разработке и исследовании новых конструкций термопар для резиносмесителей. Отображены результаты совместного испытания термопары компании ООО «Поинт» и зарубежного аналога в виде температурного тренда.*

***Ключевые слова:** преобразователь термоэлектрический (термопара), резиносмеситель, измерение температуры, показатель тепловой инерции.*

**Введение.** Измерение температуры резиновой смеси в резиносмесителях является важным фактором, влияющим на качество готовых изделий. При коротком цикле смешения (160–180 с) и большой потребляемой мощности (700 кВт и более) в резиносмесителе выделяется значительное количество теплоты, которое должно быть отведено с охлаждающей водой для поддержания температуры смеси в определенных пределах. Для контроля температуры используют различные датчики температур, такие как термопары, инфракрасные датчики, биметаллические термометры. Сложность разработки данных датчиков температуры заключается в одновременном обеспечении наименьших показателей температурной инерции и повышенной прочности наконечников монтажной части, т.к. наконечник датчика температуры работает в абразивной среде с циклически изменяющимися нагрузками, в т.ч. ударными. Для решения данной задачи наилучшим образом подходят термопары, поскольку они напрямую взаимодействуют со средой. В современных отечественных и зарубежных резиносмесителях используются от двух до четырех термопар. Из-за постоянного истирания наконечников термопар и их выхода из строя во время работы необходимо иметь резервные термопары, которые будут продолжать измерять температуру резиновой смеси и посылать сигналы в систему управления. В качестве вторичных приборов используются интеллектуальные преобразователи тока в унифицированный токовый сигнал 4–20 мА<sup>1</sup> с поддержкой протокола HART.

Целью анализа конструкций термопар для резиносмесителей является разработка термопары, которая не уступает иностранным аналогам по показателям прочности, износостойкости и температурной инерции. Для достижения данной цели необходимо комплексное обеспечение сразу трех показателей: тепловой инерционности, механической прочности и износостойкости материала термопар.

**Основная часть.** На рисунке 1 показана схема расположения термопар в резиносмесителе. Одна из термопар находится в загрузочном устройстве, другая – в разгрузочном. В качестве первичного преобразователя используются преобразователи термоэлектрические типа ТХК(L), ТХА(K) и ТЖК(J) по ГОСТ 6616-94<sup>2</sup>. Исполнение рабочего спая в большинстве случаев – неизолированный от оболочки, т.е. спай двух электродов имеет общий контакт с защитной арматурой. Данный вид спая позволяет добиться наименьших показателей температурной инерции.

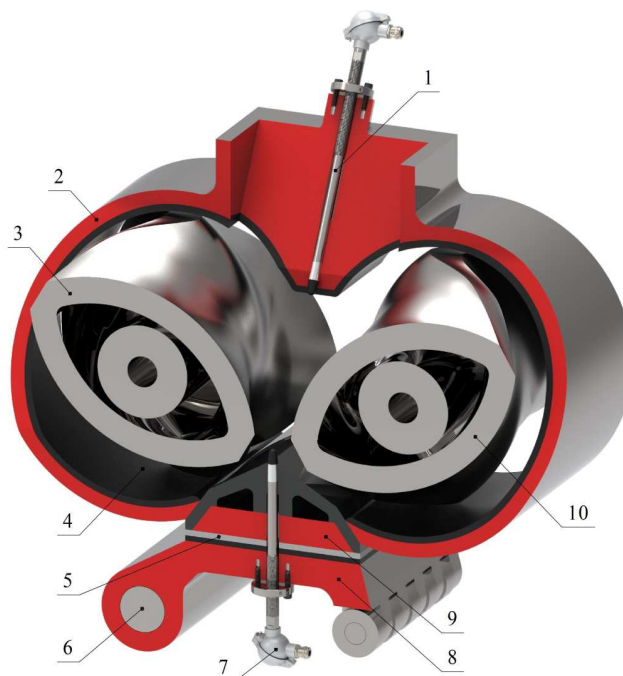
Известны аналоги термопар модификации 01.17<sup>3</sup> российской компании ООО «ПК «ТЕСЕЙ»», предназначенные для измерения температуры в камере смешения резиносмесителя. В качестве материала монтажной

<sup>1</sup> ГОСТ 26.011-80 Средства измерений и автоматизации. Сигналы тока и напряжения электрические непрерывные входные и выходные. – М: Изд-во стандартов, 1988. – 7 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 6616-94 Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия. – Минск: Межгосударств. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1994. – 15 с.

<sup>3</sup> Термопара 01.17 [Электронный ресурс]. – URL: [https://tesey.com/katalog/datchik-temp/datchik-temp\\_23.html?product=1](https://tesey.com/katalog/datchik-temp/datchik-temp_23.html?product=1) (дата обращения: 29.01.2024).

части используется нержавеющая сталь 12Х18Н10Т. В результате опытно-промышленной эксплуатации на резиносмесителях компании ОАО «Белшина» выяснилось, что данный материал без специального покрытия имеет высокий показатель температурной инерции, недостаточные прочностные характеристики и низкую износостойкость. Применяя поковки из данной нержавеющей стали, можно поднять прочностные характеристики на 30–50%, но показатели по температурной инерции при этом остаются неудовлетворительными.



1 – термопара верхняя (на загрузочном устройстве); 2 – корпус резиносмесителя; 3 – ротор левый; 4 – защитный слой из твердого металла; 5 – резиновые прокладки; 6 – вал разгрузочного устройства; 7 – термопара нижняя (на разгрузочном устройстве); 8 – поворотный рычаг; 9 – откидная дверца; 10 – ротор правый

Рисунок 1. – Схема расположения термопар в резиносмесителе

Известны преобразователи термоэлектрические ТХК 9421<sup>4</sup> компании АО «НПП «ЭТАЛОН»». Для изготовления защитной арматуры в них используется сталь 40Х. ООО «Поинт» также проводил испытания данного материала: основным его недостатком является хрупкость. Наконечники, изготовленные из данного материала, не выдерживают циклические нагрузки в резиносмесителях и в течение недели выходят из строя.

Были изучены термопары для резиносмесителей китайской компании AnHui TianKang (Group)Shares Co.,Ltd<sup>5</sup>. Их особенностью являются сменные наконечники монтажной части. Применение сменных наконечников позволяет удешевить замену вышедшей из строя термопары, т.к. при этом заменяется только сам наконечник, но данная технология приводит к увеличению показателей температурной инерции и, как следствие, к низкому качеству измерения температуры резиновой смеси.

В качестве чувствительного элемента термопары индийской компании ATLAS TRANSTAB PVT.LTD<sup>6</sup> используется термопарный кабель с заваренной оболочкой. Данный вид термопар имеет высокие прочностные характеристики, поскольку в качестве защитной арматуры можно применять любой высокопрочный материал. Спай в термопарном кабеле контактирует с измеряемой средой только через оболочку, а не через наконечник, поэтому показатели температурной инерции невысокие. Но показатели износостойкости крайне низкие, т.к. толщина оболочки применяемого термопарного кабеля от 0,5 до 0,7 мм.

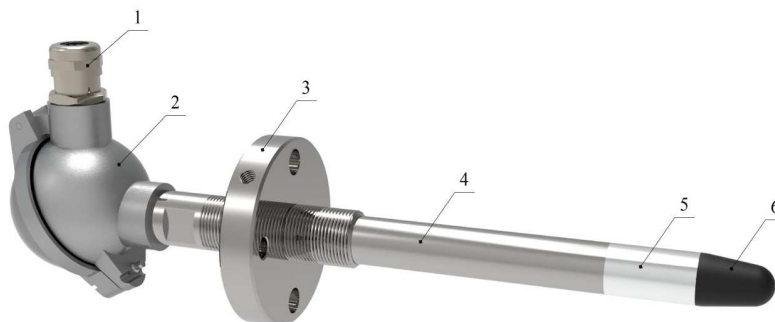
Многолетний опыт производства преобразователей термоэлектрических компанией ООО «Поинт» и разработки в области сверхвысокого давления и применения кованных материалов помогли разработать надежную

<sup>4</sup> Преобразователи термоэлектрические ТХК 9421 [Электронный ресурс]. – URL: [https://omsketalon.ru/sites/default/files/thk\\_9421\\_0.pdf](https://omsketalon.ru/sites/default/files/thk_9421_0.pdf) (дата обращения: 29.01.2024).

<sup>5</sup> Wear-resistant thermocouple for internal mixer [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.chinathermocouple.com/product/Wear-resistant-thermocouple-for-internal-mixer.html> (дата обращения: 29.01.2024).

<sup>6</sup> Banburry Thermocouple [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.tradeindia.com/products/banburry-thermocouple-2844209.html> (дата обращения: 29.01.2024).

термопару для резиносмесителей. За аналог для разработки термопары была взята термопара типа ТЖК(Ж) немецкой компании HF Mixing Group. Разработка данной термопары заняла свыше двух лет. Было проведено более 100 испытаний для исследования инерционных показателей наконечника термопары, а также прочностных характеристик. На рисунке 2 показана термопара ТП-Б-ТЖК(Ж) компании ООО «Поинт» с наконечником из хромоникелевого сплава, покрытым керамическим напылением. Марка керамического напыления подбиралась с условием обеспечения максимального антифрикционного свойства и абразивной износостойкости наконечника, поскольку при производстве шин используются сажа и оксиды кремния.



1 – латунный кабельный ввод; 2 – алюминиевая клеммная голова; 3 – регулировочный фланец (12X18N10T); 4 – цельноточенный стержень (12X18N10T); 5 – измерительный наконечник из специального хромоникелевого сплава; 6 – покрытие керамическим порошком

Рисунок 2. – Преобразователь термоэлектрический ТП-Б-ТЖК(Ж) для резиносмесителей

Испытания заключались в поэтапном исследовании влияния различных материалов наконечника на инерционные показатели измерения температуры, а также на предел прочности и износостойкость. Сравнительные показатели приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Сравнительные показатели температурной инерции, прочности и износостойкости материалов наконечника

Марка стали	Показатель температурной инерции, с	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа (при 20 °С)	Износостойкость
20	87,6	405	низкая
40Х	101,4	530	низкая
12X18N10T	124,8	450	низкая
12X18N10T поковка	530 МПа	низкая	низкая
Alloy C276	758 МПа	высокая	высокая
Чугун СЧ20	97,8	200	средняя
20Х3МВФ поковка	109,2	785	высокая
Специальный хромоникелевый сплав	48,9	760	высокая

*Примечание.* Показатели температурной инерции – время, за которое термопара нагрелась с 20 °С до 135 °С в масляном термостате, нагретом до 150 °С.

Также проводились исследования влияния диаметра жил термопары ТЖК(Ж) на инерционные показатели. Чем меньше диаметр жил термопар и размер рабочего спая, тем меньше тратится времени на его нагрев.

Разрабатывались способы уменьшения инерционности термопары в конструкции наконечников, такие как применение теплоотводящих колец из керамики и других материалов. При разработке термопары ТП-Б-ТЖК(Ж) в качестве изоляционного материала использовался стеклонеполненный полиамид. В аналоге термопары компании HF Mixing Group применяется особый вид керамики. По результатам испытаний был сделан вывод, что применение термокомпенсационных колец может улучшить показатели температурной инерции, но показатели надежности готовой термопары резко ухудшаются из-за наличия концентраторов напряжения в конструкции наконечника.

Рассматривался вопрос способа крепления рабочего спая к наконечнику. В качестве чувствительного элемента использовались как термопарный кабель, так и термопарные проводники. Для способа крепления спая использовалась аргонодуговая сварка в среде инертных газов, лазерная сварка, пайка серебряными припоями. У каждого из способов есть свои преимущества и недостатки. В результате длительных испытаний был разработан уникальный метод лазерной сварки рабочего спая к наконечнику, не имеющий аналогов. Данный способ позволяет увеличить площадь контакта рабочего спая и материала наконечника для быстрой передачи тепла.

Для обеспечения износостойкости применялись различные материалы для напыления на наконечник термопары. Любой из материалов, который напыляется на наконечник, увеличивает инерционные показатели готовой термопары. Поэтому покрытие должно отвечать следующим требованиям: быть износостойким (иметь наименьший коэффициент трения) и иметь наименьшую толщину. В таблице 2 указаны сравнительные характеристики порошковых материалов.

Таблица 2. – Сравнение покрытий наконечников термопары

Материал	Износостойкость	Увеличение показателя температурной инерции, с	Толщина, мм	Технология покрытия
Stellite SF6-M	высокая	+35	1,2	напыление с дальнейшим оплавлением
CASTOLIN 28020 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /3TiO <sub>2</sub>	высокая	+15	0,25	напыление
Специальный керамический порошок	высокая	+10	0,25	напыление

*Примечание.* Увеличение показателя температурной инерции – средний показатель разницы температурной инерции наконечников после нанесения покрытия и до.

Применялись различные методы присоединения наконечника из хромоникелевого сплава к монтажной части из нержавеющей стали 12X18H10T. Первый способ – аргонодуговая сварка в среде инертных газов с применением специальных присадочных материалов. Данный способ показал низкие показатели по усталостному разрушению наконечника термопары. Трещина в 100% случаев образовывалась именно на сварном шве. Последующая термообработка сварного шва позволяла увеличить срок службы термопар лишь на 2–3 недели. Другой способ – посадка с натягом (или горячая посадка). При постоянной знакопеременной нагрузке и воздействии температуры резиновой смеси наконечники выпрессовывались из защитного стержня. После усталостных испытаний пришли к выводу, что наиболее надежным способом крепления наконечника является специальная технология пайки, которая применяется для производства термопар, работающих при высоком и сверхвысоком давлении. За время промышленной эксплуатации термопар для резиносмесителей компании ООО «Поинт» ни одна из термопар не вышла из строя вследствие повреждения места пайки наконечника к монтажной части.

Показатели температурной инерции для преобразователей термоэлектрических ТП-Б определяются по переходному процессу в режиме простого охлаждения по ГОСТ 6616-94<sup>7</sup> (п. 8.3).

Для определения показателей тепловой инерции используются две точки:

- интенсивно перемешиваемая вода с температурой 15–20 °С;
- вода с температурой 50–100 °С.

Показатели тепловой инерции, определяемые по ГОСТ 6616-94, не являются информативными для заказчика по следующим причинам:

- измеряемая среда и ее агрегатное состояние у заказчика может быть различным (в частности, резиновая смесь);
- скорость потока и характер движение среды у заказчика могут быть совершенно другими. Понятие «интенсивно перемешиваемая вода» в ГОСТ 6616-94 не урегулировано скоростью или характером движения среды;
- рабочие температуры у заказчика отличаются от двух точек, прописанных в ГОСТ 6616-94.

Исходя из вышеизложенного, для определения показателей температурной инерции термопар на конкретном объекте или изделии заказчика необходимо проводить опытно-промышленную эксплуатацию или полностью восстанавливать условия работы термопары в лабораторных условиях с указанием всех параметров среды в техническом задании заказчика.

Для установления соответствия техническим характеристикам немецкой термопаре производили сравнение графиков показателей температурной инерции в масляном термостате ТЖ-01 ООО «Поинт», нагретом до 150 °С. Точность поддержания температуры масляного термостата составляет ±0,02 °С, градиент температуры по объему термостата не более ±0,02 °С. Термопары погружаются в термостат на 25–30 мм, и фиксируется время набора температуры. Контрольными точками являются температуры 75, 105 и 135 °С.

Графики показателей тепловой инерции преобразователя термоэлектрического ТП-Б-ТЖК(Т) производства ООО «Поинт» и термопар типа ТЖК(Т) компании HF Mixing Group показаны на рисунке 3.

Старый и новый термостаты компании ООО «Поинт» имеют одинаковую стабильность показаний по температуре по всему объему. Единственное – в новом термостате стоит более мощный насос для перемешивания жидкости. Следовательно, отличия в показателях температурной инерции термопары ООО «Поинт» и компании HF Mixing Group заключаются в разности скорости движения среды в термостатах.

<sup>7</sup> ГОСТ 6616-94 Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия. – Минск: Межгосударств. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1994. – 15 с.

ООО «Поинт» предоставил ОАО «Белшина» образец термопары ТП-Б-ТЖК(Ж) для проведения опытно-промышленной эксплуатации. В резиносмеситель были установлены две термопары: термопара компании HF Mixing Group в загрузочном устройстве и термопара компании ООО «Поинт» в разгрузочном устройстве. Сравнение графиков набора температуры по трендам, предоставленным компанией ОАО «Белшина», показали хорошие результаты (рисунок 4).

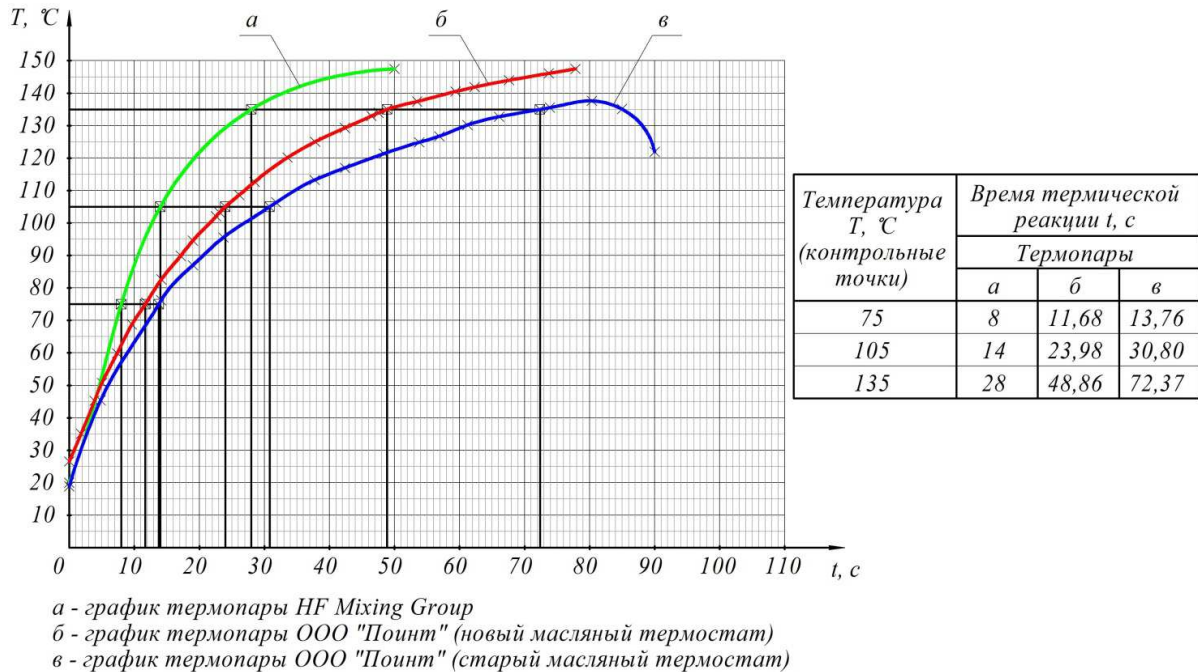


Рисунок 3. – Графики температурной инерции термопары ТП-Б-ТЖК(Ж) и аналога компании HF Mixing Group

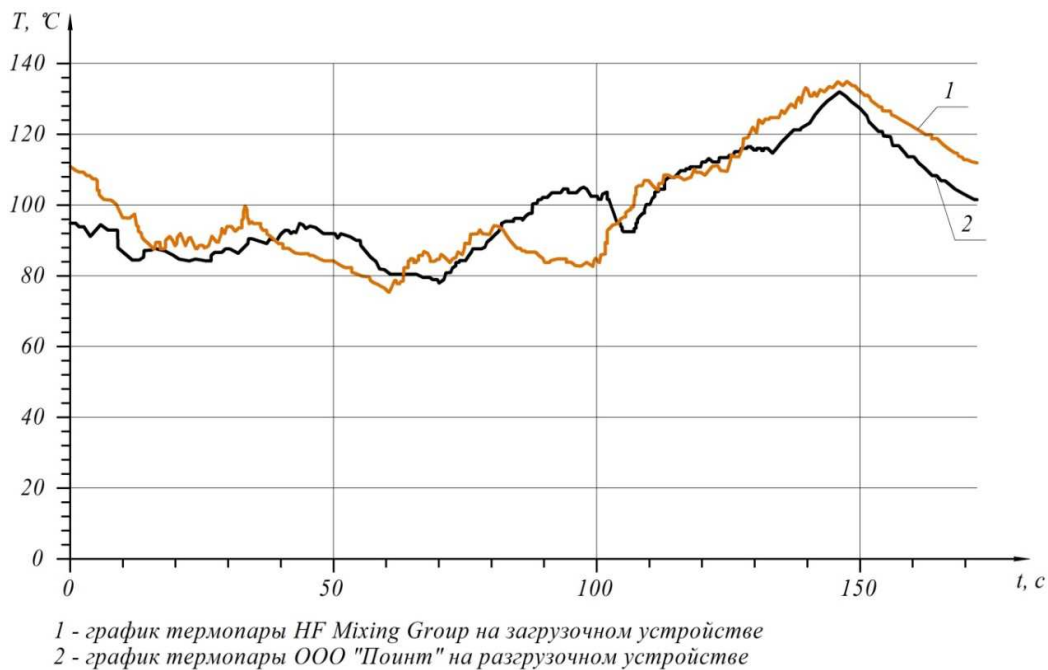


Рисунок 4. – Графики тренда показателей температуры резиносмесителя компании ОАО «Белшина»

**Заключение.** На основе анализа существующих конструкций термопар были выявлены их преимущества и недостатки, которые были учтены в разработках и исследованиях. В результате опытно-промышленной эксплуатации термопар на предприятии заказчика были достигнуты требуемые прочностные и инерционные характеристики наконечников для термопар. Разработанные компанией ООО «Поинт» термопары успешно

применяются на резиносмесителях компании ОАО «Белшина» и АО «Сибкабель». Благодаря применению современных материалов и уникальных технологий удалось решить сразу три задачи: обеспечение наименьших показателей температурной инерции, высокие прочность и износостойкость термопар для резиносмесителей. Даны рекомендации по проведению опытно-промышленной эксплуатации на конкретных резиносмесителях заказчика для определения показателей температурной инерции. В дальнейшем планируется проводить исследования по улучшению показателей надежности термопар и уменьшению времени температурной инерции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Машины и аппараты резинового производства / Б.И. Андрашников, Л.М. Антонов, Д.М. Барсков и др. – М.: Химия, 1975. – 600 с.

## REFERENCES

1. Andrashnikov, B.I., Antonov, L.M., Barskov, D.M., Gershman, B.G., Kepersha, L.M., Pinegin, V.A., ... Tsyganok, I.P. (1975). *Mashiny i apparaty rezinovogo proizvodstva*. Moscow: Khimiya. (In Russ.)

Поступила 12.03.2024

**ANALYSIS OF THERMOCOUPLES  
FOR MEASURING TEMPERATURE IN RUBBER MIXERS**

**N. POPOK**

*(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)*

**A. FRIK**

*(Point LLC, Polotsk)*

*The article analyzes domestic and foreign thermoelectric converters (thermocouples) for measuring the temperature of the rubber in rubber mixers. The advantages and disadvantages of existing thermocouple designs are considered, and the thermocouple design developed by Point LLC is presented. A comparative analysis of the influence of the material of thermocouple tips, the coating material of the tips and the diameter of the thermocouple wires on the strength characteristics of the finished product, as well as on the indicators of the thermal lag index, is presented. The results of tests for temperature inertia of the developed thermocouples and its analogue are shown. Recommendations are given for conducting pilot-industrial operation during the development and research of new designs of thermocouples for rubber mixers. The results of a joint test of a thermocouple from Point LLC and a foreign analogue are shown in the form of a temperature trend.*

**Keywords:** *thermoelectric transducer (thermocouple), rubber mixer, temperature measurement, thermal lag index.*

## БЕССВАРНЫЕ ГЕРМЕТИЧНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ И ИМПУЛЬСНЫХ ЛИНИЙ ТРУБНЫХ ПРОВОДОВ

*д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК*  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)  
**А.С. БАЛЫШ**  
(ООО «Поинт», Полоцк)

*Проведен анализ отечественных и зарубежных конструкций бессварных герметичных соединений трубопроводов малых диаметров и импульсных линий трубных проводок, а также применяемых марок материалов. Представлены конструкции соединений с зажимным и упорным кольцами и соединений с врезающимся кольцом. Определены преимущества и недостатки существующих конструкций. Рассмотрена возможность применения бессварных герметичных соединений на трубопроводах, транспортирующих агрессивные среды, которые вызывают коррозионное разрушение металла. Предложено новое исполнение соединения с зажимным и упорным кольцами из двухфазной дуплексной стали. Приведены результаты гидростатической прочности рассматриваемых конструкций после однократной и многократных сборки и разборки соединений на трубопроводе из нержавеющей коррозионностойкой стали аустенитного типа. Дана экономическая оценка целесообразности серийного производства соединений нового исполнения.*

**Ключевые слова:** *трубопроводы, бессварные соединения, зажимные и упорные кольца, дуплексная сталь.*

**Введение.** Трубопроводы представляют собой сооружения из труб, деталей (отводы, переходы, тройники, метизы, фланцы и т.д.), опор, подвесок, арматуры, плотно и прочно соединенных между собой и предназначенных для транспортировки жидкостей, газов, паров, парожидкостных смесей и иных продуктов промышленной и хозяйственной деятельности<sup>1, 2</sup>. И если для трубопроводов диаметрами  $DN 10–DN 4000$  разработаны, описаны и спроектированы разнообразные разъемные (фланцевые, муфтовые, раструбные и т.п.) и неразъемные (сварные, с пайкой и т.п.) соединения элементов трубопроводов, то для трубопроводов малых диаметров  $DN 1–DN 10$  разработанных и реализованных на практике методик соединений значительно меньше. К этой же категории трубопроводов малых диаметров относят импульсные линии трубных проводок, которые соединяют отборные устройства с контрольно-измерительными приборами на технологических трубопроводах, сосудах и аппаратах, а также могут служить в качестве линий питания, обогрева, охлаждения<sup>3, 4</sup>. Бесспорно, что для трубопроводов малых диаметров можно применять те же методики соединений, что и для трубопроводов больших диаметров, например, сварные соединения. Однако, как показывает практика, монтаж импульсных линий трубопроводов малых диаметров в основной массе происходит в значительно стесненных либо полевых условиях. Поэтому проектные, монтажные и эксплуатирующие организации при проектировании и разработке документации на трубные проводки все чаще отдают предпочтение бессварным разъемным соединениям трубопроводов.

**Основная часть.** Типовая схема манометрической (приборной) стойки с бессварными разъемными соединениями представлена на рисунке 1.

Наиболее распространенными типами бессварных разъемных соединений в промышленности являются соединения с врезающимся кольцом (рисунок 2) и соединения с зажимным и упорным кольцами (рисунок 3).

И если на территории бывшего Советского Союза чаще встречаются соединения с врезающимся кольцом, конструкция которого была описана и внедрена в 1970 г.<sup>5</sup>, то за рубежом широкое применение получили соединения с зажимным и упорным кольцами, которые в промышленности стран западного мира известны

<sup>1</sup> ГОСТ 32569-2013 Трубопроводы технологические стальные. Требования к устройству и эксплуатации на взрывопожароопасных и химически опасных производствах. – М.: Стандартинформ, 2015. – 184 с.

<sup>2</sup> ТКП 45-3.05-167-2009 Технологические трубопроводы. Правила монтажа и испытаний. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 70 с.

<sup>3</sup> СП 77.13330.2016 Системы автоматизации. Свод правил. – М.: Стандартинформ, 2017. – 70 с.

<sup>4</sup> РМ 4-242-92 Системы автоматизации. Рекомендации по проектированию обогрева и теплоизоляции трубных проводок. – М.: НПО «Монтажавтоматика» ГПКИ «Проектмонтажавтоматика», 1992. – 56 с.

<sup>5</sup> ГОСТ 15763-70 Соединения трубопроводов с врезающимся кольцом для гидравлики, пневматики и смазки на  $P_y 40$  МН/м кв. (примерно 400 кгс/см кв.). Технические требования. – М.: Гос. ком. стандартов Совета министров СССР, 1970. – 2 с.



уже с 1947 г.<sup>6,7</sup>. На территории же бывшего Советского Союза соединения с зажимным и упорными кольцами были описаны и внедрены только в 1991 г.<sup>8</sup>. Но ввиду того, что после распада Советского Союза в странах СНГ началось активное внедрение промышленного оборудования западных образцов, именно соединения с зажимным и упорным кольцами заняли передовые позиции в ряду герметичных соединений трубопроводов и трубных проводок.

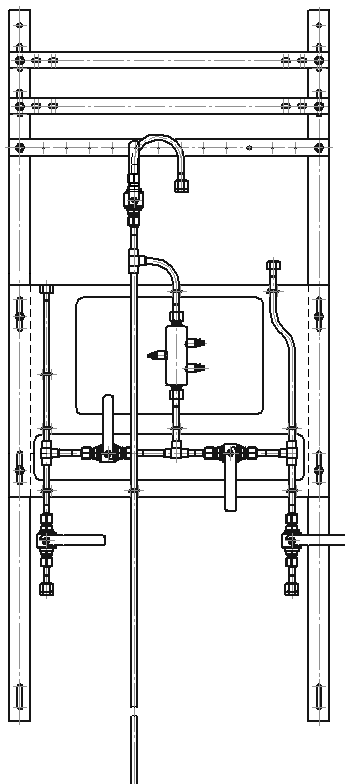
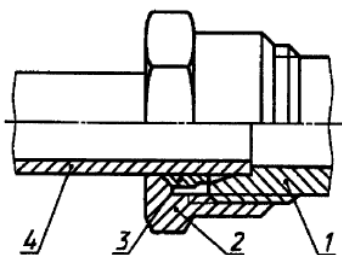


Рисунок 1. – Типовая схема манометрической (приборной) стойки отбора давления<sup>9</sup>



1 – присоединительный конец корпусной детали; 2 – накидная гайка; 3 – врезающееся кольцо; 4 – труба

Рисунок 2. – Соединение с врезающимся кольцом<sup>10</sup>

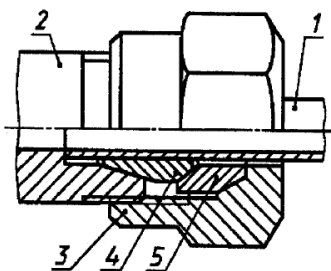
<sup>6</sup> Swagelok Tube Fitting Advantage [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.swagelok.com/-/media/distributor-media/o-s/singapore/tube-fitting-advantage-brochure.ashx> (дата обращения 29.01.2024).

<sup>7</sup> Трубные обжимные фитинги Swagelok® [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/ru/MS-06-16.PDF> (дата обращения 29.01.2024).

<sup>8</sup> ГОСТ 15763-91 Соединения трубопроводов резьбовые на Ру до 63 МПа (до около 630 кгс/см кв.). Общие технические условия. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1991. – 21 с.

<sup>9</sup> Манометрическая стойка (ОУД) [Электронный ресурс]. – URL: <https://pointltd.by/index.php/catalog/armatura-dlya-datchikov/manometricheskaya-stojka-oud> (дата обращения 29.01.2024).

<sup>10</sup> ГОСТ 15763-2005 Соединения трубопроводов резьбовые и фланцевые на PN (Ру) до 63 МПа (до около 630 кгс/см<sup>2</sup>). Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2008. – 35 с.



1 – труба; 2 – присоединительный конец корпусной детали; 3 – накидная гайка;  
4 – зажимное кольцо; 5 – упорное кольцо

Рисунок 3. – Соединение с зажимным и упорным кольцами<sup>11</sup>

Соединения с зажимным и упорным кольцами (далее – СЗУК), конструкция которых описана в ГОСТ 15763-2005<sup>11</sup>, имеют ряд особенностей, ограничивающих сферу применения указанных соединений в промышленности. Согласно ГОСТ 15763-2005 в качестве материала колец, накидной гайки, корпусных деталей рекомендуется применять углеродистые конструкционные стали, что не позволяет использовать данные соединения для агрессивных сред, вызывающих коррозионное разрушение углеродистых конструкционных сталей. В качестве материала трубы для соединений рекомендуются сталь 20, медь или латунь, что также не позволяет использовать СЗУК для трубопроводов и трубных проводок, изготовленных из нержавеющей коррозионностойких сталей (таблица 1).

Таблица 1. – Марки материала и сортамент труб<sup>11</sup>

Наименование деталей	Марка материала	Сортамент труб
Упорные кольца	Сталь 45	–
Зажимные кольца	Сталь 10	
	Сталь 3 Л63	
Гайки и контргайки	Сталь 45, 35 А30 10кп	
Корпусные детали	Сталь 45, 35 А30	
Трубы для соединений с зажимным кольцами	Сталь 20	Холоднодеформируемые трубы
	М3	Медные трубы
	Л63	Латунные трубы

Конструкция соединений типа СЗУК западного образца (рисунок 4), напротив, в стандартном исполнении предусматривает их изготовление из нержавеющей стали (как правило, марки 316/316L) и предназначена для монтажа на трубопроводах и трубных проводках из коррозионностойких сталей аустенитного типа (марки 304, 321, 316Ti, 316/316L и т.п.)<sup>12; 13</sup>. Однако недостатком такой конструкции является дороговизна ее разработки и сопутствующих исследований<sup>14</sup>, т.к. принципиальными отличиями от конструкции по ГОСТ 15763-2005 являются не только геометрические параметры элементов, но и технология изготовления отдельных деталей соединения. Например, упорное (заднее) кольцо западного образца подвергается дополнительному упрочнению по запатентованным западными фирмами технологиям, которое повышает механические свойства поверхностного слоя кольца без потери коррозионных свойств стали<sup>15; 16</sup>. В дополнение

<sup>11</sup> ГОСТ 15763-2005 Соединения трубопроводов резьбовые и фланцевые на PN (Рy) до 63 МПа (до около 630 кгс/см<sup>2</sup>). Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2008. – 35 с.

<sup>12</sup> Gaugeable Tube Fittings and Adapter Fittings [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.swagelok.com/media/distributor-media/c-g/calgary/services/pdf/ms-01-140.ashx> (дата обращения 29.01.2024).

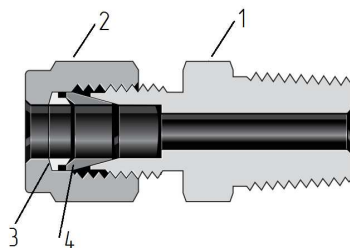
<sup>13</sup> CPI/A-LOK Tube Fittings [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.parker.com/literature/Instrumentation%20Products%20Division/Catalogs/Cat%204230-4233-Dec09%20-%20Final%20for%20Web.pdf> (дата обращения 29.01.2024).

<sup>14</sup> DesignNews. – URL: <https://www.designnews.com/metals/swagelok-improves-stainless-steel-hardness/> (дата обращения: 20.01.2024).

<sup>15</sup> SAT 12 Swagelok [Электронный ресурс]. – URL: <https://pdfcoffee.com/sat-12-swagelok-pdf-free.html> (дата обращения 29.01.2024).

<sup>16</sup> Engineering report on ferrule design-suparcase® [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.parker.com/literature/Instrumentation%20Products%20Division/Suparcase/CPI%20Promo%20Bulletin%204230%20B15.1.pdf> (дата обращения 29.01.2024).

накидная гайка имеет специальное серебряное покрытие, предотвращающее заедание резьбы и обеспечивающее простоту сборки<sup>17; 18</sup>.



1 – корпусная деталь; 2 – накидная гайка; 3 – упорное (заднее) кольцо;  
4 – зажимное (переднее) кольцо

Рисунок 4. – Конструкция соединений типа СЗУК западного образца<sup>19</sup>

В связи с тем, что предприятия энергетической, нефтехимической отраслей промышленности остро нуждаются в бесшовных герметичных соединениях для трубопроводов из коррозионностойких нержавеющей сталей, было решено разработать принципиальное новое исполнение соединений типа СЗУК, которое объединило бы лучшие стороны существующих конструкций отечественного и западных образцов с устранением их вышеописанных недостатков.

За основу была принята конструкция зарубежного образца, т.к. именно она сейчас имеет наибольшее применение в бесшовных герметичных соединениях трубопроводов и трубных проводок. Эксплуатирующему персоналу, специалистам КИПиА уже знакомы подобные фитинги, поэтому все присоединительные размеры и материальное исполнение корпусных деталей целесообразнее оставить взаимозаменяемыми с соединениями западного образца для облегчения замены, монтажа и обслуживания оборудования на технологических объектах. При этом требования к механическим свойствам материалов для изготовления деталей соединений (таблица 2), а также правила приемки (герметичность соединений трубопроводов, герметичность соединений трубопроводов при многократной сборке и разборке, стойкость к воздействиям пульсации давления и вибрации) нового исполнения СЗУК соответствуют требованиям ГОСТ 15763-2005<sup>20</sup>.

Таблица 2. – Механические свойства материала для изготовления деталей соединений<sup>20</sup>

Наименование деталей	$R_m$ , МПа	$R_e$ , МПа	$A_5$ , %
Корпусные детали	420	240	15
Накидные гайки	380	220	8
Упорные кольца	700	420	7
Зажимные кольца	340	–	31

Примечание.  $R_m$  – временное сопротивление разрыву;  $R_e$  – предел текучести;  $A_5$  – относительное удлинение.

Как было отмечено ранее, механические свойства материалов, приведенные в таблице 2, не позволяют использовать СЗУК для трубопроводов и трубных проводок из нержавеющей коррозионностойких сталей, т.к. твердость нержавеющей аустенитных сталей (12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т и т.п.) выше, чем у углеродистой стали 20, меди М3 или латуни Л63 (таблица 3).

Для поиска оптимальной конструкции соединения и материала упорного (заднего) кольца с целью применения нового исполнения на трубопроводах и трубных проводках, изготовленных из нержавеющей коррозионностойких сталей аустенитного типа, были проведены стендовые испытания различных конструктивов СЗУК.

<sup>17</sup> Engineering report on ferrule design-suparcase® [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.parker.com/literature/Instrumentation%20Products%20Division/Suparcase/CPI%20Promo%20Bulletin%204230%20B15.1.pdf> (дата обращения 29.01.2024).

<sup>18</sup> Фитинги с торцевым уплотнением VCR® с металлической прокладкой. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/ru/ms-01-24.pdf> (дата обращения 29.01.2024).

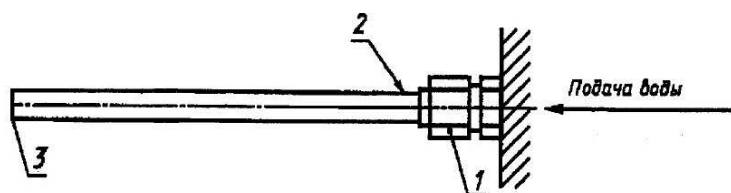
<sup>19</sup> Gaugeable Tube Fittings and Adapter Fittings [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.swagelok.com/media/distributor-media/c-g/calgary/services/pdf/ms-01-140.ashx> (дата обращения 29.01.2024).

<sup>20</sup> ГОСТ 15763-2005 Соединения трубопроводов резьбовые и фланцевые на PN (Ру) до 63 МПа (до около 630 кгс/см кв.). Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2008. – 35 с.

Таблица 3. – Показатели твердости некоторых марок материала

Марка материала	Твердость, НВ
12X18H10T	не более 179 НВ <sup>21</sup>
10X17H13M2T	не более 200 НВ <sup>22</sup>
Сталь 20	не более 163 НВ <sup>23</sup>
Медь МЗ	не менее 95 НВ <sup>24</sup>
Латунь Л63	не менее 130 НВ <sup>25</sup>

Методика испытаний заключалась в следующем: на испытуемый образец и трубку (рисунок 5) подавалось пробное гидростатическое давление, которое фиксировалось манометром, обеспечивающим регламентированные условия испытаний. Свободный конец трубки закрыли заглушкой. Рабочая среда (вода) поступала с постоянным давлением, выдержка образца при установившемся давлении производилась в течение не менее 5 (пяти) мин.



1 – испытуемый образец; 2 – трубка; 3 – заглушка

Рисунок 5. – Схема типовой установки для проведения стендовых испытаний на прочность гидростатическим давлением

По результатам экспериментальных исследований было установлено (таблицы 4, 5), что для обеспечения возможности применения СЗУК с нержавеющими трубками достаточно, чтобы твердость упорного (заднего) кольца была не менее 35 HRC, а механические свойства кольца при этом соответствовали характеристикам, указанным в таблице 2. Для аустенитных нержавеющих сталей (12X18H10T, 10X17H13M2T и т.п.) таких показателей твердости и механических свойств в состоянии после проката или после термической обработки добиться невозможно [1; 2]. Поэтому по результатам экспериментальных исследований в качестве материала упорного (заднего) кольца решено использовать двухфазную дуплексную сталь, которая при высоких показателях механических свойств (см. таблицу 2) и твердости 35–45 HRC по коррозионной стойкости сопоставима со сталями аустенитного типа [3].

Таблица 4. – Результаты экспериментальных исследований гидростатической прочности конструкций СЗУК различного типа после однократного использования

Испытуемый образец	Тип упорного (заднего) кольца	Твердость кольца	Пробное гидростатическое давление, МПа	Результат испытаний
Соединение по ГОСТ 15763-2005	двухфазная дуплексная сталь	35–45 HRC	25,0	неудовлетворительно, пропуск рабочей среды
Соединение западного типа	двухфазная дуплексная сталь	35–45 HRC	40,0	удовлетворительно, пропуск рабочей среды не выявлен
Соединение западного типа	316/316L с упрочнением	до 1800 HV	40,0	удовлетворительно, пропуск рабочей среды не выявлен
Соединение западного типа	316/316L	не более 22 HRC	40,0	удовлетворительно, пропуск рабочей среды не выявлен

Примечание. Рабочая среда – вода комнатной температуры, материал испытуемой трубки – 12X18H10T.

<sup>21</sup> ГОСТ 25054-81 Поковки из коррозионно-стойких сталей и сплавов. Общие технические условия. – М.: Гос. ком. СССР по стандартам, 1983. – 9 с.

<sup>22</sup> ГОСТ 15763-2005 Соединения трубопроводов резьбовые и фланцевые на PN (Ру) до 63 МПа (до около 630 кгс/см кв.). Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2008. – 35 с.

<sup>23</sup> ГОСТ 1050-2013 Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2014. – 31 с.

<sup>24</sup> ГОСТ 1173-2006 Фольга, ленты, листы и плиты медные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2007. – 22 с.

<sup>25</sup> ГОСТ 2060-2006 Прутки латунные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2007. – 27 с.

Таблица 5. – Результаты экспериментальных исследований гидростатической прочности конструкций СЗУК различного типа после многократной сборки и разборки (не менее 6 раз)

Испытуемый образец	Тип упорного (заднего) кольца	Твердость кольца	Пробное гидростатическое давление, МПа	Результат испытаний
Соединение западного типа	двухфазная дуплексная сталь	35–45 HRC	40,0	удовлетворительно, пропуск рабочей среды не выявлен
Соединение западного типа	316/316L с упрочнением	до 1800 HV	40,0	удовлетворительно, пропуск рабочей среды не выявлен
Соединение западного типа	316/316L	не более 22 HRC	40,0	неудовлетворительно, пропуск рабочей среды

Примечание. Рабочая среда – вода комнатной температуры, материал испытуемой трубки – 12X18H10T.

**Закключение.** Экспериментальные исследования показали, что при однократном использовании СЗУК твердость и механические свойства упорного (заднего) кольца не оказывают существенного влияния на работоспособность и эксплуатационные свойства соединения западного образца с трубкой из нержавеющей коррозионностойкой стали. При многократной сборке и разборке СЗУК (не менее 6 раз) для обеспечения работоспособности и эксплуатационных свойств соединения можно применять кольца с твердостью не менее 35 HRC и механическими свойствами согласно ГОСТ 15763-2005.

Бессварные герметичные соединения типа СЗУК с кольцом из двухфазной дуплексной стали не требуют больших финансовых вложений в подготовку производства таких соединений (в отличие от фитингов западного образца) и могут применяться в энергетической и нефтехимической промышленности при контакте с агрессивными рабочими средами, где не допустимо использовать фитинги, изготовленные из углеродистых конструкционных сталей согласно ГОСТ 15763-2005.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Материаловедение и технология металлов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др. – М.: Высш. шк., 2001. – 638 с.
2. Рыбасенко И.Д., Якубовский Л.А., Каган И.З. Технология изготовления химической аппаратуры из нержавеющей стали. – Киев: Гос. науч.-техн. изд-во машиностр. лит., 1951. – 147 с.
3. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. – М.: МИСИС, 1999. – 407 с.

#### REFERENCES

1. Fetisov, G.P., Karpman, M.G., Matyunin, V.M., Gavrilyuk, V.S., Sokolov, V.S., Sokolova, N.Kh., ... Gol'tsov, V.A. (2001). *Materialovedenie i tekhnologiya metallov*. Moscow: Vysshaya shkola. (In Russ.)
2. Rybasenko, I.D., Yakubovskii, L.A. & Kagan, I.Z. (1951). *Tekhnologiya izgotovleniya khimicheskoi apparatury iz nerzhavayushchei stali*. Kyiv: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'noi literatury. (In Russ.)
3. Gol'dshtein, M.I., Grachev, S.V. & Veksler, Yu.G. (1999). *Spetsial'nye stali*. Moscow: MISIS. (In Russ.)

Поступила 12.03.2024

### NON-WELDED SEALED FITTINGS FOR SMALL DIAMETER PIPELINES AND TUBING

**N. POPOK**

*(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)*

**A. BALYSH**

*(Point LLC, Polotsk)*

*An analysis of domestic and foreign designs of non-welded sealed fittings for small diameter pipelines and tubing is carried out, the grades of materials used are considered, the designs of fittings with clamping and thrust rings and fittings with a cutting ring are presented. The advantages and disadvantages of existing structures are analyzed, the possibility of using non-welded sealed fittings on pipelines transporting aggressive media that cause corrosive destruction of metal is considered. A new design of the fittings with clamping and thrust rings using rings made of two-phase duplex steel is proposed. The results of the hydrostatic strength of the structures under consideration after single and multiple assembly and disassembly of fittings on a pipeline made of stainless, corrosion-resistant steel of the austenitic type are given. An economic assessment of the feasibility of mass production of new fittings has been carried out.*

**Keywords:** pipelines, non-welded fittings, clamping and thrust rings, duplex steel.

## ПАРАМЕТРЫ МГНОВЕННОГО ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОБРАТНОМ РАБОЧЕМ ХОДЕ КЛЕТИ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПИЛЬГЕРНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

канд. техн. наук, доц. С.В. ПИЛИПЕНКО

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Приведены результаты исследований, касающиеся развития теоретических основ определения величины обжатия трубы по толщине стенки в мгновенном очаге деформации при обратном рабочем ходе клетки стана холодной пильгерной прокатки труб. Выведены упрощенные зависимости для расчета параметров обжатия при обратном рабочем ходе клетки. В предложенных зависимостях не учитываются упругие деформации клетки, с чем будет связано дальнейшее развитие метода расчета деформационных параметров рассматриваемого случая ведения процесса холодной пильгерной прокатки.

**Ключевые слова:** холодная прокатка, пильгерная прокатка, трубы, обжатие, толщина стенки, вытяжка.

**Введение.** Производительность станов холодной пильгерной прокатки труб и точность готовых труб, прокатываемых в стане, – в большинстве случаев противоположные понятия. С ростом линейного сдвига трубы за двойной ход точность труб, как правило, ухудшается [1–3]. В то же время с уменьшением величины подачи, например, – условие для получения более точных труб, – уменьшается линейный сдвиг трубы за двойной ход клетки, снижается производительность стана. Один из способов повышения его производительности без ухудшения качества труб – применение поворота и подачи трубы в обоих положениях клетки. Таким образом, деформационные возможности процесса холодной пильгерной прокатки можно использовать более эффективно [4]. Однако пильгерный процесс в таких условиях деформации до конца не изучен. В частности, в достаточной мере не исследованы зависимости, описывающие изменение параметров трубы в мгновенном очаге деформации (МОД) при обратном ходе клетки.

**Цель работы** – развитие теоретических основ определения величины обжатия трубы по толщине стенки в мгновенном очаге деформации при обратном рабочем ходе клетки, вывод формул для расчета величин вытяжки и обжатия по толщине стенки в сечениях рабочего конуса при обратном рабочем ходе клетки.

**Основная часть. Методы исследования.** Первый этап заключался в анализе работ, связанных с методом расчета деформационных параметров процесса холодной пильгерной прокатки. Исходя из выделенных в ходе анализа зависимостей и особенностей процесса холодной пильгерной прокатки в различных ее подвидах, будет произведен синтез зависимостей, позволяющих определить обжатие по толщине стенки и вытяжку в мгновенном очаге деформации при рабочем обратном ходе клетки. Адекватность выведенных зависимостей будет проверена на расчете силовых параметров, основой для которого являются правильно рассчитанные деформационные параметры. Данные расчетов будут сверены с данными замеров силы прокатки на действующем оборудовании, взятыми из литературных источников. В конце сделаны выводы о перспективах дальнейшего развития теоретических основ метода расчета деформационных параметров рассматриваемого в работе процесса.

**Анализ исследований.** При холодной прокатке труб клетка движется возвратно-поступательно относительно неподвижно зажатого конуса деформации (рисунок 1, поз. 4).

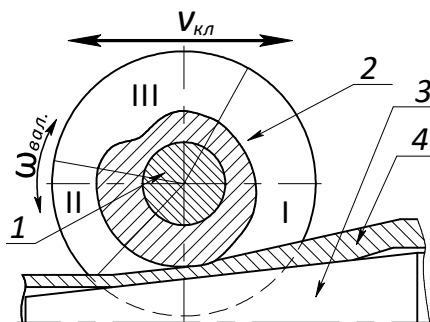


Рисунок 1. – Схема деформации трубы в стане холодной пильгерной валковой прокатки

Валок стана холодной пильгерной валковой прокатки (ХПГ) состоит из непосредственно вала (см. рисунок 1, поз. 1) и калибра переменной радиуса (см. рисунок 1, поз. 2). Труба деформируется между раствором, образованным ручьем калибра, и оправкой (конусной либо с криволинейной образующей рабочей поверхно-

сти)<sup>1</sup> [5; 6]. В ручье, условно, можно выделить три основных зоны: зону обжатия (см. рисунок 1, I), зону калибровки (см. рисунок 1, II) и зону холостого участка (см. рисунок 1, III). Если используется калибр-полудиск, то зона холостого участка разделяется на зону подачи и зону поворота. В зоне деформации можно выделить участки: свободного редуцирования (труба, обжимаясь по диаметру, утолщается), обжатия стенки и предотделки. В участке обжатия стенки деформируются и диаметр, и толщина стенки. В участке предотделки калибруется толщина стенки. В зоне калибровки калибруется диаметр трубы. Здесь внутренняя стенка не касается оправки.

В отличие от стана ХПТ стан холодной пильгерной роликовой прокатки (ХПТР) деформирует трубу между роликами с диаметром ручья, равным диаметру готовой трубы (рисунок 2, поз. 2), и цилиндрической оправкой (рисунок 2, поз. 1). Диаметр цилиндрической оправки равен внутреннему диаметру готовой трубы. В стане клеть также движется возвратно-поступательно, и в ходе процесса образовывается конус деформации (рабочий конус, пильгерголова, рисунок 2, поз. 4). Ролики в этом стане опираются своими цапфами на опорную планку. Форма рабочей поверхности опорной планки схожа с разверткой ручья калибра стана ХПТ. В начале конуса ролики максимально раздвинуты относительно линии прокатки, в конце конуса ролики сжимаются, образуя тесный ручей. На станах ХПТР прокатывают трубы особой точности. Особенности привода движения клетки при верной настройке кулисного механизма привода позволяют максимальным образом нивелировать действие осевых сил. В стане типа ХПТ кинематикой процесса деформации управляют подбором ведущей шестерни с необходимым начальным радиусом и подбором диаметра калибра (последнее – если калибр кольцевой).

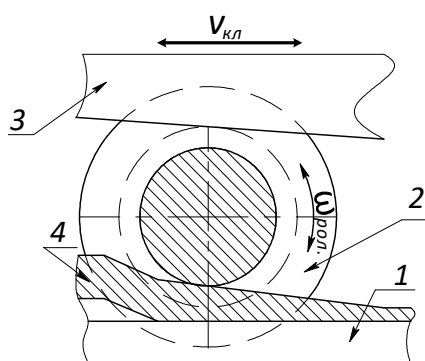


Рисунок 2. – Схема деформации трубы в стане холодной пильгерной роликовой прокатки

Весь процесс деформации в станах холодной пильгерной прокатки можно представить как движущийся вдоль рабочего конуса мгновенный очаг деформации, параметры которого изменяются непрерывно. Среди параметров мгновенного очага следует выделить обжатие по толщине стенки и вытяжку. В самом мгновенном очаге деформации также разделяют угол редуцирования (зону редуцирования) и угол обжатия стенки (зону обжатия стенки).

В процессе ХПТ разделяют обжатие вдоль конуса деформации (рабочего конуса) и обжатие в мгновенном очаге деформации. Обжатие вдоль конуса довольно точно определяют по правилу П.Т. Емельяненко [7; 8]: величина обжатия вдоль конуса деформации равна разности между высотой рассматриваемого сечения и высотой такого сечения, которое отстоит от рассматриваемого на таком расстоянии, при котором объем трубы, заключенный между этими сечениями, равен объему ее подачи перед рабочим ходом клетки.

На рисунке 3 показана схема процесса деформации трубы в мгновенном очаге деформации стана ХПТ при обратном рабочем ходе клетки [3; 5; 6].

До деформации в МОД некое сечение бесконечно малой протяженности  $\Delta x$ , сдвинутое перед обратным рабочим ходом на величину подачи  $m$ , имеет диаметр  $D_{x-a}$  и толщину стенки  $S_{x-a}$  (рисунок 3, а). После обжатия (рисунок 3, б) сечение получает вытяжку величиной  $\mu_{\Delta x}$  и приобретает значение диаметра  $D_x$  с толщиной стенки  $S_x$ . Расстояние между сечением рабочего конуса, которое будет иметь параметры толщины стенки и диаметра  $S_{x-a}$  и  $D_{x-a}$ , и сечением конуса с полученными параметрами  $S_x$  и  $D_x$  равно

$$a = m + \Delta x \cdot \mu_{\Delta x} . \quad (1)$$

Другими словами, величина  $a$  близка к величине подачи и ее значение зависит от обжатия трубы в МОД. Исходя из этого, в источниках [5; 6] величину обжатия по толщине стенки в МОД при обратном рабочем ходе клетки для рассматриваемого случая пильгерной прокатки определили как

$$\Delta S_{x,обр} = (S_{x-m} - S_x) \mu_{об,x} , \quad (2)$$

<sup>1</sup> Отчет ВНИТИ № 84-77. Рук. НИР Б.Ю. Меликов, Н.Н. Король. Разработать, исследовать и внедрить процесс прокатки труб на станах ХПТР 8-15 и ХПТР 15-30 конструкции ВНИИМЕТМАШ с увеличением хода клетки на стане ХПТР 8-15 с двойной подачей заготовки на станах обеих типоразмеров.

где  $\mu_{об.х}$  – вытяжка в мгновенном очаге деформации данного сечения,

$$\mu_{об.х} = \frac{F_{x-m}}{F_x};$$

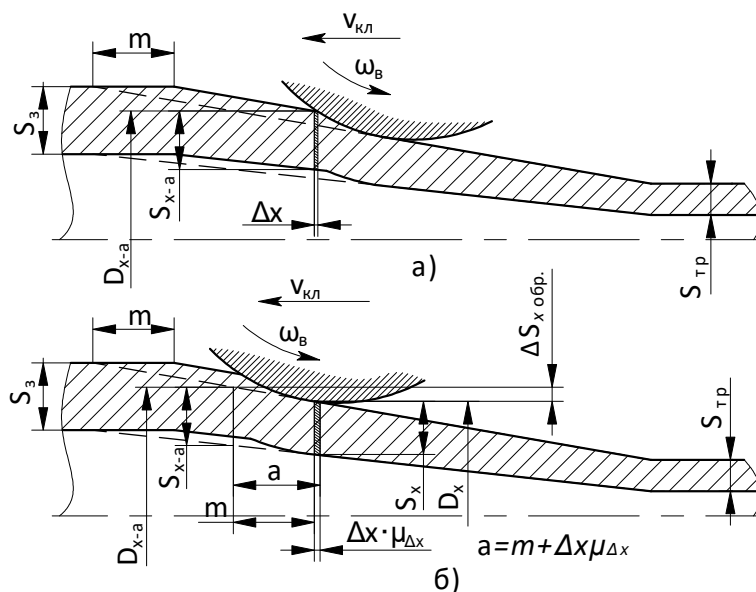
$S_{x-m}$  – толщина стенки в сечении  $x-m$ ;

$S_x$  – толщина стенки в сечении  $x$ ;

$m$  – подача перед обратным ходом;

$F_x$  – площадь трубы в сечении  $x$  конуса деформации;

$F_{x-m}$  – площадь трубы в сечении  $x-m$  конуса деформации.



$a$  – положение клетки до обжатия сечения  $\Delta x$  мгновенным очагом деформации;

$b$  – положение клетки после обжатия сечения  $\Delta x$  мгновенным очагом деформации;

$V_{кл}$  – скорость и направление движения клетки при обратном ходе;  $S_{заг}$  – толщина стенки трубы-заготовки;

$S_{заг}$  – толщина стенки готовой трубы

Рисунок 3. – Схема обжатия металла в мгновенном очаге деформации при обратном рабочем ходе клетки стана холодной пильгерной валковой прокатки

Описание материала исследования. Из определенного выше линейное смещение металла в МОД при обратном рабочем ходе клетки можно вычислить из зависимости

$$a = \Delta x = m \frac{F_{x-m}}{F_x}. \quad (3)$$

Толщина стенки трубы до деформации в МОД при обратном ходе клетки для случая рабочего прямого хода

$$S_{x-m} = S_x + a \cdot (\operatorname{tg}\gamma_i - \operatorname{tg}\alpha_i) = S_x + m \frac{F_{x-m}}{F_x} (\operatorname{tg}\gamma_i - \operatorname{tg}\alpha_i), \quad (4)$$

где  $F_{x-m} = \pi \cdot S_{x-m} (2r_{x-m} + S_{x-m})$ ;

$r_{x-m}$  – внутренний диаметр трубы в сечении конуса деформации (для ХПТР – готовой трубы);

$\operatorname{tg}\gamma_i$  – конусность развертки ручья калибра в рассматриваемом сечении;

$\operatorname{tg}\alpha_i$  – конусность оправки в рассматриваемом сечении (для стана ХПТР  $\operatorname{tg}\alpha_i = 0$ ).

Подставляя значение  $F_{x-m}$  в формулу (4), получаем квадратное уравнение, решив которое можно найти значение толщины стенки до деформации обратным рабочим ходом клетки стана холодной пильгерной прокатки труб:

$$S_{x-m} = \frac{1}{2A_i} \left( F_i - 2A_i \cdot r - \sqrt{4A_i (A_i \cdot r^2 - F_i (r + S_i)) + F_i^2} \right), \quad (5)$$

где  $A_i = \pi \cdot m \cdot (\operatorname{tg}\gamma_i - \operatorname{tg}\alpha_i)$  (для стана ХПТР  $A_i = \pi \cdot m \operatorname{tg}\gamma_i$ ).

Зная  $S_{x-m}$ , обжатие стенки в МОД находим из разницы  $S_{x-m}$  и  $S_x$ .



Отсюда обжатие в МОД при обратном ходе клетки в стане ХПТР в случаи обратного рабочего хода клетки

$$\Delta S_{x.обп} = \left( \frac{1}{2A_i} \left( F_i - 2A_i \cdot r - \sqrt{4A_i(A_i \cdot r^2 - F_i(r + S_i)) + F_i^2} \right) - S_x \right) \mu_{об.х}. \quad (6)$$

Вытяжка в сечении при обратном рабочем ходе клетки стана ХПТР находится из выведенной зависимости

$$\mu_{об.х} = \frac{F_{x-m}}{F_x} = (S_x + m \cdot \operatorname{tg}\gamma_x) \frac{2r + S_x + m \cdot \operatorname{tg}\gamma_x}{S_x(2r + S_x)}. \quad (7)$$

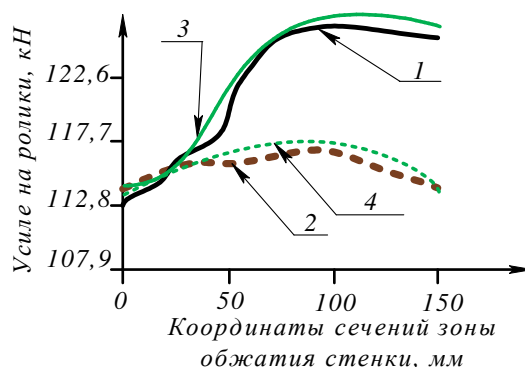
Аналогичным образом выводится формула для определения вытяжки в МОД при обратном рабочем ходе клетки в стане ХПТ:

$$\mu_{об.х} = \frac{F_{x-m}}{F_x} = (S_x + m \cdot (\operatorname{tg}\gamma_x - \operatorname{tg}\alpha_x)) \frac{D_x + m \operatorname{tg}\gamma_x - S_x - m \cdot (\operatorname{tg}\gamma_x - \operatorname{tg}\alpha_x)}{S_x(D_x + S_x)}. \quad (8)$$

В качестве проверки работы данных формул сделан расчет усилий деформации при прямом и обратном ходах клетки стана ХПТР для случая прокатки трубы из стали 0X18H10T по маршруту 21x1,7-20x0,6 мм.

Расчетные данные по полученным зависимостям сравнивались с экспериментальными, изложенными в работе<sup>2</sup>. Кроме прочего, в этой работе производились замеры усилий деформации при прямом и обратном ходах клетки стана ХПТР. Рассматривался случай именно с подачей заготовки в обоих крайних положениях клетки. Прокатка осуществлялась с подачей  $m = 8 + 8$  мм. Поскольку на точность расчета силовых параметров напрямую влияет точность определения деформационных, то по полученным расчетным значениям силовых параметров можно судить о точности расчета величины обжатия по толщине стенки при обратном рабочем ходе клетки.

По данным калибровки инструмента (методика расчета уточнялась отдельно) были рассчитана деформационные, а затем и силовые параметры обжатия трубы в зоне деформации стенки. Расчет параметров деформации в зоне редуцирования и калибровки не производился, поскольку значения усилий деформации в этих зонах заведомо значительно меньше, чем в зоне обжатия стенки. Зона предотделки по известным причинам в калибровке рабочего инструмента стана ХПТР не выполняется, т.к. используется цилиндрическая оправка. Результаты расчетов силовых параметров показаны на рисунке 4.



1 – измеренное распределение усилия деформации при прямом ходе клетки; 2 – измеренное распределение усилия деформации при обратном ходе; 3 – расчетное распределение усилия деформации при прямом ходе клетки; 4 – расчетное распределение усилия деформации при обратном ходе

Рисунок 4. – Расчетные графики и графики замеров<sup>2</sup> усилий деформации при прямом и обратном ходах клетки стана ХПТР при подаче заготовки в обоих крайних положениях клетки (маршрут 21x1,7-20x0,6, 0X18H10T,  $m = 8 + 8$  мм)

Сравнивая данные графиков, можно сделать вывод об адекватности полученных в ходе расчета данных о распределении силы деформации вдоль зоны обжатия. Они хорошо коррелируются с кривыми, полученными в результате экспериментов. Это прямое доказательство верности предложенных теоретических выкладок.

**Закключение.** В работе показаны дополнительные пути развития теоретических основ процесса холодной пильгерной прокатки труб. Рассмотрен случай ведения процесса при подаче заготовки в обоих крайних положениях клетки. Предложенные в статье зависимости для расчета величины обжатия по толщине стенки и вытяжки трубы в МОД при обратном рабочем ходе клетки станов типа станов ХПТР и ХПТ уточняют метод расчета параметров

<sup>2</sup> Отчет ВНИТИ № 84-77. Рук. НИР Б.Ю. Меликов, Н.Н. Король. Разработать, исследовать и внедрить процесс прокатки труб на станах ХПТР 8-15 и ХПТР 15-30 конструкции ВНИИМЕТМАШ с увеличением хода клетки на стане ХПТР 8-15 с двойной подачей заготовки на станах обеих типоразмеров.

деформации в этих станах. Результаты расчетов силовых параметров (выполненные на основании результатов расчетов деформационных параметров по выведенным зависимостям) косвенно доказывают верность теоретических выкладок. Полученные расчетные данные не идут в разрез с результатами более ранних исследований.

Предложенные упрощенные зависимости для расчета параметров обжатия при обратном рабочем ходе клетки дают небольшие погрешности и могут использоваться в инженерных расчетах. Однако они требуют дальнейшей проверки. Следует заметить, что в предложенных зависимостях не учитываются упругие деформации клетки. С этим, возможно, будет связано дальнейшее развитие метода расчета деформационных параметров рассматриваемого случая ведения процесса холодной пильгерной прокатки. Также следует уточнить влияние недеформируемой части металла, которая остается в выпусках калибра от предыдущего рабочего хода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технология трубного производства: учеб. / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 640 с.
2. Столетний М.Ф., Клемперт Е.Д. Точность труб. – М.: Metallurgia, 1975. – 239 с.
3. Шевакин Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 269 с.
4. Попов М.В., Атанасов С.В., Беликов Ю.М. Совершенствование процесса периодической прокатки труб. – Днепропетровск: Дива, 2008. – 192 с.
5. Осада Я.Е., Пляцковский О.А., Беликов Ю.М. Определение обжатий при периодической прокатке труб на станах ХПТ при подаче заготовки в обоих крайних положениях клетки // Сталь. – 1978. – № 5. – С. 452–454.
6. Определение обжатий при периодической прокатке труб на станах ХПТ при подаче заготовки в обоих крайних положениях клетки / Ю.М. Беликов, А.П. Головченко, А.А. Терещенко и др. // Обработка материалов давлением. – 2009. – № 2(21). – С. 294–299.
7. Пилипенко С.В. Теоретические основы холодной пильгерной прокатки труб. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2022. – 288 с.
8. A 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, V.A. Kozechko et al. // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2021. – № 1. – С. 078–083.

#### REFERENCES

1. Danchenko, V.N., Kolikov, A.P., Romantsev, B.A. & Samusev, S.V. (2002). *Tekhnologiya trubnogo proizvodstva*. Moscow: Internet Inzhiniring. (In Russ.)
2. Stoletnii, M.F. & Klempert, E.D. (1975). *Tochnost' trub*. Moscow: Metallurgiya. (In Russ.)
3. Shevakin, Yu.F. (1963). *Kalibrovka i usiliya pri kholodnoi prokatke trub*. Moscow: Metallurgizdat. (In Russ.)
4. Popov, M.V., Atanasov, S.V. & Belikov, Yu.M. (2008). *Sovershenstvovanie protsessy periodicheskoi prokatki trub*. Dnepropetrovsk: Diva. (In Russ.)
5. Osada, Ya.E., Plyatskovskii, O.A. & Belikov, Yu.M. (1978). *Opreделение obzhatii pri periodicheskoi prokatke trub na stanakh KhPT pri podache zagotovki v oboikh krainikh polozheniyakh kleti*. *Stal'*, (5), 452–454. (In Russ.)
6. Belikov, Yu.M., Golovchenko, A.P., Tereshchenko, A.A., Frolov, Ya.V., Grigorenko, V.U. & Dekhtyarev, V.S. (2009). *Opreделение obzhatii pri periodicheskoi prokatke trub na stanakh KhPT pri podache zagotovki v oboikh krainikh polozheniyakh kleti [Determination of wringing out at the periodic rolling of pipes on the figures of CRP at the serve of purveyance in both extreme positions of cage]*. *Obrabotka materialov davleniem [Materials working by pressure]*, 2(21), 294–299. (In Russ., abstr. in Engl., in Ukrainian)
7. Pilipenko, S.V. (2022). *Teoreticheskie osnovy kholodnoi pil'gernoi prokatki trub*. Novopolotsk: Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk. (In Russ.)
8. Pilipenko, S.V., Grigorenko, V.U., Kozechko, V.A. & Bohdanov, O.O. (2021). A 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), 078–083.

Поступила 08.07.2024

### PARAMETERS OF THE DEFORMATION CONTAINMENT VOLUME AT THE BACKWARD STROKE OF COLD-DIE-PILGERING AND COLD-ROLLER-PILGERING MILLS WHEN FEEDING THE BILLET IN EITHER POSITIONS OF THE STAND

S. PILIPENKO

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

*The results of research concerning the development of the theoretical foundations for determining the value of pipe compression by wall thickness in the deformation site, during the reverse working flow of the cage, the cold pilger rolling mill of pipes are presented. Simplified dependencies are derived in the work to calculate the compression parameters during the reverse working stroke of the rolling stand. The proposed dependencies do not take into account the elastic deformations of the rolling mill stand. This will be associated with the further development of the method for calculating the deformation parameters of the considered case of conducting the cold pilger rolling process.*

**Keywords:** cold rolling, pilger rolling, pipes, compression, wall thickness, extraction.

УДК 629.3

DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-19-24

**КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ ПЕРЕДАЧ МОБИЛЬНЫХ МАШИН***д-р техн. наук, доц. С.А. РЫНКЕВИЧ**(Полоцкий государственный университет имени Ефросинии Полоцкой)*

*Рассмотрена классификация дефектов зубчатых передач мобильных машин. Отмечено, что основными процессами, способствующими возникновению дефектов и неисправностей в зубчатых передачах, являются такие, как трение, возникающее в зоне непосредственного контакта зубьев; постепенное разрушение поверхностей деталей при их относительном движении; наличие знакопеременных нагрузок; периодически возникающие динамические удары в трансмиссии; превышение напряжений, действующих на площадках контактов, предела текучести; неоднократные перегрузки передачи, вызванные сложными режимами нагружения. Проведен подробный анализ причин возникновения дефектов в передачах механических и гидромеханических трансмиссий мобильных машин. Классификация повреждений и дефектов зубчатых передач позволяет исследовать отклонения в их работе и принимать своевременные решения по увеличению срока службы зубчатых зацеплений, а также служит базой данных для создания алгоритмов бортовых систем диагностики при распознавании неисправностей коробок передач мобильных машин различного назначения.*

**Ключевые слова:** *зубчатая передача, дефект, мобильная машина, классификация.*

**Введение.** Трансмиссии мобильных машин, включающие планетарные и вальные передачи, работают в сложных условиях. В процессе эксплуатации большинства мобильных и многих технологических машин элементы зубчатых передач подвергаются износу, коррозии и старению. Как следствие, при этом неизбежно возникают всевозможные дефекты и повреждения, носящие разнообразный физико-химический характер.

Зубчатые передачи широко используют в механическом оборудовании мобильных и технологических машин для преобразования параметров вращательного движения. Срок их службы определяет показатели безотказности работы механизма. При этом отказы механического оборудования из-за износа или разрушения зубчатых колес приводят к наиболее длительным простоям и требуют больших затрат для восстановления работоспособности. Предупредить аварийное разрушение зубьев и увеличить срок службы передачи позволяют своевременные и оперативные ремонтные мероприятия, обоснованные результатами визуального износа, а также активным мониторингом технического состояния трансмиссий [1].

**Основная часть.** В процессе эксплуатации невозможно контролировать физические процессы, происходящие в зоне контакта зубчатого зацепления. В то же время вид износа, характер разрушения и распределение действующих сил дают возможность получить информацию о параметрах эксплуатации и характере старения.

Под идентификацией дефектов и повреждений подразумевается отнесение неисправностей к определенному классу или виду (*усталость, износ, деформация, фреттинг-коррозия* и т.п.). Идентифицируя дефект или повреждение, зная его физическое происхождение, эксперт в дальнейшем может определить причины появления неисправности и степень ее влияния на техническое состояние (ТС) механизма. Идентификация выявленных дефектов и повреждений осуществляется путем сравнения их характерных признаков с известными образцами или описаниями, которые для удобства пользования могут собираться и систематизироваться в иллюстрированных каталогах.

Таблица 1 составлена для описания повреждений зубчатых зацеплений в коробках передач трансмиссий мобильных машин.

Типичные повреждения рабочих поверхностей зубчатых передач определяются конструкцией и особенностями эксплуатации. Силы, действующие на зубья, вызывают изгиб, сжатие и тангенциальные деформации за счет трения в зоне контакта. Циклическое изменение этих сил, а также изгибающие и контактные напряжения, вызванные этими силами, являются причиной поломки зубьев и усталостного выкрашивания их рабочей поверхности. Трение, возникающее в зоне контакта зубьев, вызывает износ и заедание.

Виды повреждений зубчатых передач: изменение геометрии рабочих поверхностей в результате механического, абразивного, усталостного изнашивания и схватывания сопряженных поверхностей, вследствие чего развиваются повреждения. Это *поломка зубьев, абразивное изнашивание, усталостное выкрашивание, заедание, задиры, сколы, трещины.*

Появление ряда дефектов в зубчатых передачах связано с негативными явлениями и нештатными процессами в механических и гидромеханических трансмиссиях мобильных машин при их эксплуатации. Это плохое качество включения/выключения ступеней (передач) из-за спекания пар фрикционных муфт, обеспечивающих включение ступеней; нарушение режимов работы гидротрансформатора, особенно при его блокировании/разблокировании; ухудшение плавности хода при трогании груженого автомобиля и др.






Таблица 1. – Виды дефектов зубчатых передач

Наименование дефекта	Описание дефекта	Изображение дефекта
1	2	3
Поломка и накопленный излом зубьев	<p>Поломка является следствием усталости материала зубьев от действующих повторно-переменных напряжений изгиба или от перегрузки ударного характера. Такое возможно при попадании между зубьев постороннего предмета или резкого переключения ступеней в коробке передач.</p> <p>Усталостные трещины образуются у основания зуба на той стороне, где от изгиба возникают наибольшие напряжения растяжения. Прямые короткие зубья выламываются полностью по сечению у основания зуба. При усталостном разрушении на теле колеса после излома остается вогнутая, а при подломке вследствие перегрузки – выпуклая поверхность</p>	
Излом зубьев из-за воздействия динамических ударов	<p>Динамические удары часто приводят к изломам зубьев, причем поломка зубьев может вызываться большими перегрузками ударного или статического действия или усталостью материала от многократно повторяющихся нагрузок.</p> <p>Поломки от перегрузок часто бывают связаны: а) с концентрацией нагрузки по длине зубьев из-за погрешностей изготовления или больших упругих деформаций валов; б) с износом зубьев, приводящим к их ослаблению и росту динамических нагрузок; в) с вводом в зацепление на ходу подвижных шестерен</p>	
Абразивный износ зубьев	<p>Механический износ возникает в процессе постепенного разрушения поверхностей деталей при относительном движении. Это явление возникает в результате попадания абразивных частиц (пыли, окалина, частиц нагара и т.д.) между трущимися поверхностями.</p> <p>Механическое изнашивание является результатом разрушения поверхностного слоя твердого тела за счет его многократного деформирования.</p> <p>Первоначальное проявление абразивного износа – появление царапин или рисок на рабочей поверхности в направлении движения абразивного материала</p>	
Окислительный износ поверхности зубчатой передачи при жидкостном трении	<p>Если преобладает жидкостное трение, обеспечивающее минимальный коэффициент трения, и происходит полное разделение контактирующих поверхностей слоем масла, то в этом случае преобладающим является окислительный износ. При этом трущиеся поверхности достаточно плотно разделены смазочным слоем большой толщины</p>	
Полирование поверхности зуба при граничном трении	<p>Возникновение граничного трения приводит к контакту двух деталей, проявляясь в полировании рабочей поверхности зубчатых передач. Этот процесс – обычный вид износа. Наиболее часто граничное трение проявляется на начальной стадии приработки новых зубчатых колес.</p> <p>При полировании поверхности зуба происходит медленное удаление металла с контактирующих поверхностей, скорость которого обычно не влияет на работу редуктора в пределах установленного для него срока службы</p>	

Продолжение таблицы 1

1	2	3
<p>Возникновение сколов на шестернях</p>	<p>Сколы на шестернях образуются вследствие чрезмерного износа или когда зубья не выдерживают перегрузок, а также в случае возникновения кратковременных, но резких ударных нагрузок. Это может произойти и при перегреве коробки передач.</p> <p>Сколы образуются по краям зубьев шестерни, часто большая часть скола располагается на боковой (внутренней) стороне рабочего зуба, контактирующего с другим колесом. Обычно сколы имеют 2–3 мм в длину и 1 мм глубину.</p> <p>В результате наличия сколов происходит уменьшение общей площади пятна контакта</p>	
<p>Пластические сдвиги на рабочей поверхности зубчатой передачи</p>	<p>Пластические сдвиги на рабочей поверхности зубчатой передачи происходят при превышении напряжений, действующих на площадках контактов, предела текучести. Поверхностный слой металла перемещается от делительного диаметра к вершине зуба, образуя выступ.</p> <p>Промежуточными проявлениями таких процессов являются: отслаивание частиц металла с рабочей поверхности зубьев; наклеп из-за сильных ударов при наличии зазора в зацеплении</p>	
<p>Осповидное выкрашивание рабочей поверхности</p>	<p>Знакопеременные силы приводят к появлению на площадках контакта напряжений, превышающих предел выносливости материала. При этом нагрузка по длине зуба распространяется неравномерно. В результате на рабочей поверхности в зонах концентрации нагрузки появляются микротрещины и пятнообразные углубления, вызываемые усталостью материала. Как результат – осповидное выкрашивание рабочей поверхности.</p> <p>На нижнем рисунке показано предельное состояние осповидного выкрашивания</p>	
<p>Осповидное выкрашивание ролика подшипника</p>	<p>Возникает из-за воздействия знакопеременных нагрузок ввиду высокого давления при трении качения при напряжениях в материале, достигающих предела выносливости.</p> <p>Многочисленные нагружения вызывают усталость материала, при этом на плоскостях максимальных напряжений внутри ролика зарождаются трещины. Их развитие приводит к разрыву контактной поверхности, что принципиально изменяет характер взаимодействия деталей</p>	

Окончание таблицы 1

1	2	3
Угловое смещение пятна контакта зубчатой передачи	Возникает из-за перекоса валов редуктора, а также несовпадения углов наклона зубьев шестерни и колеса. Отклонения зубьев в процессе нарезания от заданного направления, перекосы осей гнезд подшипников, деформации под нагрузкой приводят к тому, что пятно контакта смещается к одному из торцов зубчатых колес. Эти факторы приводят к повышению нагрузок, концентрации напряжений, вызывают поломки и задиры зубьев	
Изнашивание или разбивание заходных кромок подвижной зубчатой полумуфты	Зубья муфт переключения передач с течением времени изнашиваются. Износу подвергаются как боковые поверхности зубьев, так и заходные кромки зубьев ведущих и ведомых зубчатых полумуфт. При изнашивании или разбивании заходных кромок зубьев изменяется их конфигурация, что затрудняет поворот запирающего звена после синхронизации угловых скоростей и перемещение подвижной полумуфты для ее включения	
Хрупкое разрушение металла втулки зубчатой муфты	Возникает вследствие перегрузки передачи, низкого качества поковки или неправильно выбранной марки стали. Происходит изменение физико-механических свойств металла при длительном действии циклически изменяющихся во времени напряжений и деформаций. Иногда поломка возникает из-за несоблюдения условий смазки	
Срезание шлицев первичного вала коробки передач	При длительной эксплуатации возможна выработка и срезание шлицев первичного вала коробки передач. Признаком этого дефекта является отсутствие движения при включении в коробке передач режима <i>D</i> или <i>R</i>	
Разрушение сепаратора подшипника качения вала	В основном это происходит, когда остаточный ресурс подшипника составляет 25–40%, а оставшийся срок службы редко превышает несколько недель или месяцев. Наблюдается также увеличение интенсивности вибрации в высокочастотной зоне	

Рассмотрим более подробно такие виды дефектов передач, как поломка зубьев, усталостное выкрашивание рабочих поверхностей зубьев и абразивный износ зубьев. Эти дефекты являются наиболее характерными и часто встречающимися.

*Поломка зубьев* – особенно опасный вид разрушения. Она происходит из-за возникающих в зубьях переменных напряжений при деформации изгиба. Поломка зубьев может происходить в результате больших перегрузок ударного и статического характера, а также усталостного разрушения от действия переменных напряжений в течение длительного времени. Трещины усталости возникают у основания зуба из-за неучтенных расчетом перегрузок. Перенапряжение зубьев может вызывать концентрацию нагрузки по длине зуба вследствие неправильного монтажа (непараллельности валов), а также из-за недостаточной обработки поверхности впадин зубьев, заклинивания зубьев при нагреве передачи и недостаточных боковых зазорах. Чаще всего наблюдаются отколы углов зубьев, связанные с концентрацией нагрузки.

*Усталостное выкрашивание рабочих поверхностей зубьев* – наиболее распространенный эксплуатационный вид повреждения закрытых передач. Возникает в результате действия переменных контактных напряжений в поверхностных слоях материала. В зубчатых передачах, работающих при высоких контактных напряжениях, главным образом, на ножках и у полюсной линии, появляются веерообразные микротрещины, которые, развиваясь вглубь по кругу, замыкаются, что и приводит к явлению выкрашивания. Стимулирует выкрашивание смазка,

попадающая в трещины. Вследствие клиновидности трещины давление смазки возрастает по глубине и достигает максимального значения у вершины трещины. Прогрессирующий износ вызывает искажение профиля и приводит к снижению ресурса.

*Абразивный износ зубьев* – основной вид разрушения открытых передач. Это разновидность механического износа, когда имеет место процесс постепенного разрушения поверхностей деталей при их относительном движении. Вид поверхности при абразивном износе – ряд мелких параллельных полос, перпендикулярных оси колеса. Износ поверхностного слоя, имеющего наибольшую твердость, приводит к увеличению скорости изнашивания. В процессе износа уменьшается размер зуба по толщине, увеличиваются зазоры в зацеплении, нарушается эвольвентность рабочего участка профиля зуба.

При исследовании дефектных валвных коробок передач гидромеханических трансмиссий автосамосвалов «БелАЗ» (поломки трансмиссий происходили в процессе их эксплуатации) установлено, что наиболее частые виды повреждений и дефектов следующие:

- изнашивание и излом зубьев;
- появление трещин на отдельных участках зубчатых колес;
- абразивный износ зубчатых зацеплений;
- деформация поверхностей и канавок;
- смятие и разбивание рабочих граней шлицев, торцов зубьев;
- осповидное выкрашивание поверхности под действием контактных напряжений.

Согласно рекомендациям завода «БелАЗ» для эксплуатирующихся автосамосвалы организаций, зубчатые колеса коробок передач необходимо заменять в случае обнаружения классифицированного дефекта, характеристики которого выходят за пределы установленных значений.

Назовем типичные причины, когда следует производить ремонт или замену зубчатого колеса:

- при изломе зуба, наличии трещин возле основания зуба, пластической деформации материала зуба;
- при осповидном выкрашивании с повреждением рабочей поверхности зубьев более чем на 20% и глубине ямок выкрашивания более 5% толщины зуба;
- при абразивном износе зуба на 10–20% от его толщины;
- при наклепе, задирах на рабочей поверхности зуба и повреждении более 20% площади рабочей поверхности;
- при наличии цветов побежалости на рабочей поверхности зубьев;
- при размере пятна контакта менее 25–60% по высоте и 30–80% по ширине зуба.

В таблице 2 представлены основные дефекты зубчатых передач, проявляющиеся при эксплуатации карьерных автосамосвалов. Даны причины появления дефектов, а также приведены относительные частоты отказов коробок передач на 100 000 и 200 000 км пробега автосамосвала, вызванных тем или иным дефектом зубчатого зацепления.

Таблица 2. – Основные дефекты зубчатых передач, проявляющиеся при эксплуатации карьерных автосамосвалов

Вид дефекта	Причина возникновения дефекта и его характеристика	Относительная частота появления отказа	
		на 100 000 км пробега	на 200 000 км пробега
Износ	Недостаточное количество смазочного масла, масло загрязнено, зубья подвержены процессу изнашивания. Износ делает толщину зуба тоньше, а зазор между зубьями увеличивается, вызывая удары и в тяжелых случаях перегрузку, что может привести к поломке	0,075	0,25
Пластическая деформация	При перегрузке из-за пластической деформации материала поверхность зуба будет иметь пластическое течение, чаще всего это происходит на зубчатых колесах с низкой твердостью, а также при плохой приработке зубчатой пары	0,15	0,48
Сколы (царапины)	Из-за нагрева и нагрузки пленка масла будет разрушена, при этом сырые металлические поверхности зубьев находятся в прямом контакте, что приводит к прилипанию поверхностей зубьев	0,45	1,42
Пятна	При длительном контактом напряжении поверхность зуба образует усталостные трещины, которые продолжают расширяться, вызывая отслоение мелких металлических частичек и образование пятен. Когда коррозия является серьезной, возникают вибрация и аномальный звук	0,125	0,412
Облом зубьев	Проявление изгибной усталости. Если поверхность зуба нагружена и наибольшее изгибное напряжение сосредоточено у основания зуба, когда изгибное напряжение превышает предельное, то происходит перегрузочное, или усталостное, разрушение	0,05	0,165

Относительная частота появления отказов, вызванная опасными дефектами, определялась как отношение количества автосамосвалов, у которых возник опасный отказ, к суммарному количеству автосамосвалов в автохозяйстве, достигших определенного пробега (100 000 или 200 000 км).

Например, значение относительной частоты, равное 0,075, означает, что из 40 функционирующих в автохозяйстве автосамосвалов у 3 машин до достижения 100 000 км пробега проявится опасная поломка коробки передач из-за накопленного износа (см. вторую строку таблицы 2), т.е.  $0,075 = 3/40$ .

**Заключение.** Предложенная классификация повреждений и дефектов позволяет, во-первых, последовательно исследовать отклонения в работе зубчатых передач и принимать своевременные решения по увеличению срока службы зубчатых передач, во-вторых, типовые дефекты зубчатых зацеплений можно использовать в алгоритмах бортовых систем диагностики при распознавании неисправностей коробок передач мобильных машин.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рынкевич С.А. Активный мониторинг сложных элементов гидромеханических передач мобильных машин // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2024. – № 1. – С. 71–78. DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-71-78
2. Рынкевич С.А. Механические и гидромеханические передачи: анализ работоспособности и отказы // Актуальные проблемы транспорта и логистики: сб. науч. тр. БелГУТ. – 2023. – С. 137–142.
3. Рынкевич С.А. Система бортового диагностирования и мониторинга гидромеханической передачи автосамосвала // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2023. – № 4(81). – С. 53–60. DOI 10.24412/2077-8481-2023-4-53-60

#### REFERENCES

1. Rynkevich, S.A. (2024). Aktivnyi monitoring slozhnykh elementov gidromekhanicheskikh peredach mobil'nykh mashin [Active monitoring of complex elements of hydromechanical transmissions of mobile machines]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science], 1(49), 71–78. (In Russ., abstr. in Engl.) DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-71-78
2. Rynkevich, S.A. (2023). Mekhanicheskie i gidromekhanicheskie peredachi: analiz rabotosposobnosti i otказы. *Aktual'nye problemy transporta i logistiki: Sbornik nauchnykh trudov BelGUT*, (137–142). Gomel: BelGUT. (In Russ.)
3. Rynkevich, S.A. (2023). Sistema bortovogo diagnostirovaniya i monitoringa gidromekhanicheskoi peredachi avtosamosvala [System for On-board Diagnostics and Monitoring of dump truck hydromechanical transmission]. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta*, 4(81), 53–60. (In Russ., abstr. in Engl.) DOI 10.24412/2077-8481-2023-4-53-60

Поступила 09.07.2024

### CLASSIFICATION OF DEFECTS IN MOBILE MACHINE TRANSMISSIONS

S. RYNKEVICH

(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*The classification of defects in gears of mobile machines is considered. It is noted that the main processes that contribute to the occurrence of defects and malfunctions in gears are: friction that occurs in the zone of direct contact of the teeth, gradual destruction of the surfaces of parts during their relative movement, the presence of alternating loads, periodically occurring dynamic shocks in the transmission, excess stress, acting on the contact areas, yield strength, repeated transmission overloads caused by complex loading conditions. A detailed analysis of the causes of defects in the transmissions of mechanical and hydromechanical transmissions of mobile machines was carried out. The classification of damage and defects in gears makes it possible to study deviations in the operation of these gears and make timely decisions to increase the service life of gears, and also serves as a database for creating algorithms for on-board diagnostic systems for recognizing faults in gearboxes of mobile machines for various purposes.*

**Keywords:** gear transmission, defect, mobile machine, classification.



УДК 621.785.545

DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-25-29

## ТЕХНОЛОГИЯ ДИФФУЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРОВОЛОКИ ПУТЕМ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРЕВА

**М.В. СЕМЕНЧЕНКО**

*(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

*Представлена установка для диффузионного насыщения и термической обработки проволоки электроконтактным циклическим нагревом путем ее непрерывной и ступенчатой подачи. Установка допускает обработку с длительностью импульса и длительностью паузы 0,01 с – 999 мин с заданной силой тока при максимальном значении 100 А и выбранной величиной напряжения из диапазона 3–32 В. Скорость движения проволоки в зоне обработки в базовом исполнении составляет 10 см/мин. Проведены исследования влияния фракционного состава насыщающей среды на протекание процесса диффузионного насыщения проволоки. Для борирования стальной проволоки рекомендовано применять насыщающую среду с размером частиц 63–160 мкм. Предложена методика оптимизации режимов диффузионного насыщения и термической обработки проволоки при изменении диаметра проволоки, химического состава материала проволоки и насыщающей среды, а также времени обработки.*

**Ключевые слова:** технология, установка, проволока, диффузионное насыщение, термоциклирование, электроконтактный нагрев, порошковая среда.

**Введение.** Химический состав проволоки, применяемой для формирования защитных и восстановительных покрытий, напрямую зависит от условий эксплуатации последних. Количество и вид вводимых легирующих элементов определяют характеристики формируемого слоя. Широкая номенклатура выпускаемых легируемых проволочных материалов не всегда позволяет выбрать оптимальный вариант для восстановления геометрии или упрочнения поверхности дешевых деталей. Перечень материалов, закупаемых предприятием, ограничен не только финансовыми возможностями, но и необходимостью выделения складских помещений для хранения приобретаемых позиций.

В такой ситуации представляется перспективным изготовление небольшого количества экономно-легирующей проволоки, имеющей дешевую основу. Путем введения подходящих легирующих элементов можно получить наплавочный материал для формирования защитных и восстановительных покрытий с нужными свойствами. Для этого предприятие должно располагать оборудованием, допускающим нагрев до температуры, при которой возможно протекание диффузионных процессов. Диффузионное насыщение проволоки в условия печного нагрева трудоемко, предполагает использование специальных контейнеров<sup>1</sup> для равномерного распределения легирующих элементов по поверхности. Применение электролитической ванны позволит получить композиционное покрытие, но существенно увеличит затраты на изготовление и потребует закупки дорогостоящего оборудования для реализации процесса<sup>2</sup>.

В качестве альтернативного способа представляется перспективным диффузионное насыщение проволоки путем электроконтактного циклического нагрева<sup>3</sup> [1]. При этом под электроконтактным нагревом понимается технологический процесс сквозного нагрева металла за счет тепловой энергии протекающего по металлу электрического тока [2]. Способ обеспечивает повышение производительности процесса диффузионного насыщения. Термическая обработка стальной проволоки путем электроконтактного циклического нагрева дает возможность получить проволочный материал с требуемыми механическими свойствами.

**Основная часть.** Для реализации технологии диффузионного насыщения и термической обработки проволоки путем электроконтактного циклического нагрева нами разработана специальная установка<sup>4</sup> (рисунок 1), которая состоит из трансформатора 1, устройства для контроля силы электрического тока, проходящего через стальную проволоку, и температуры упомянутой проволоки 2, соединенного с блоком управле-

<sup>1</sup> Контейнер для химико-термической обработки проволоки: пат. РБ № 695В 21F 21/00 / В.М. Константинов, А.С. Губанов, Ф.И. Пантелеенко, М.В. Семенченко. – Оpubл. 30.12.02.

<sup>2</sup> Композиционная сварочная проволока: пат. № 2416504 МПК (2006) В23К 35/02, В23К 35/10 / С.Г. Паршин, С.С. Паршин. – Оpubл. 20.04.2011.

<sup>3</sup> Семенченко М.В. Электроконтактный нагрев в режиме термоциклирования – перспективный способ получения экономно-легирующей проволоки [Электронный ресурс] // Инновационные технологии в машиностроении: электрон. сб. материалов междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию Полоц. гос. ун-та / под. ред. В.К. Шелега, Н.Н. Попок. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2018. – С. 121–124.

<sup>4</sup> Установка для диффузионного насыщения стальной проволоки: заявка ВУ а 20220105 / М.В. Семенченко. – Оpubл. 30.12.23.

ния, выполненного в виде твердотельного реле 3, соединенного в свою очередь с контроллером 4, подключенным к источнику питания 5 на 12 В, контейнера с насыщающей смесью 6, на противоположных концах которого расположены пары токоподводящих сопрягаемых роликов 7, барабан для обработанной проволоки 8.

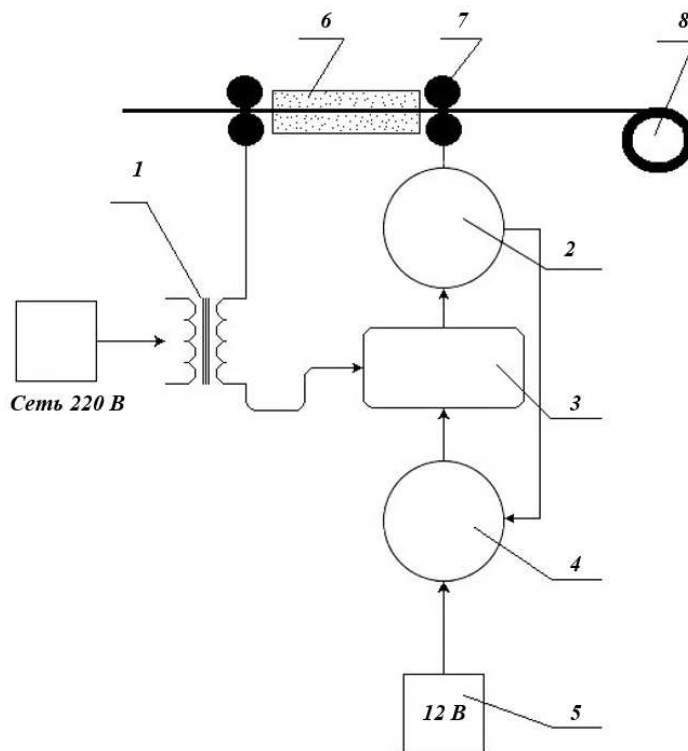


Рисунок 1. – Установки для диффузионного насыщения проволоки

Порядок работы установки следующий: от размоточного механизма (на схеме не показан) необработанная стальная проволока проходит контейнер 6 с насыщающей смесью с заданной постоянной скоростью или подается ступенчато с заданным шагом в зону обработки. Трансформатор 1, работающий от сети 220 В, обеспечивает подачу тока на токоподводящие ролики 7. Контроллер 4, соединенный с твердотельным реле 3, работает от источника питания 5. Сила электрического тока, проходящего через опытный образец, и температура стальной проволоки контролируются с помощью устройства для контроля силы электрического тока через стальную проволоку, и температуры упомянутой проволоки 2. Специальное электронное табло позволяет задать нужную величину. Максимальная величина силы тока может равна 100 А, что дает возможность обрабатывать проволочный материал большого диаметра.

Термоциклирование обеспечивается парой твердотельное реле 3/контроллер 4. Контроллер 4, работающий от источника питания 5, позволяет задать время нагрева и охлаждения образца во время обработки. При поступлении управляющего сигнала от контролера 4 твердотельное реле 3 разрывает цепь. Стальная проволока охлаждается. После завершения заданного времени охлаждения контроллер 4 отправляет сигнал на твердотельное реле 3. Цепь замыкается. Стальная проволока начинает нагреваться. Цикл обработки повторяется. Технические характеристики разработанной установки позволяют выбрать время нагрева и охлаждения из диапазона 0,01 с – 999 мин. Скорость движения проволоки в зоне обработки в базовом исполнении – 10 см/мин. Однако при необходимости может быть изменена. Величина напряжения регулируется и составляет 3–32 В.

Ступенчатая обработка в режиме термоциклирования реализуется за счет наличия связи между устройством для контроля силы электрического тока, проходящего через стальную проволоку, и температуры проволоки 2 и контроллером 4. При достижении заданных параметров устройство для контроля силы электрического тока через стальную проволоку, и температуры упомянутой проволоки 2 отправляет управляющий сигнал на контроллер 4 для изменения режима обработки.

Термическая обработка стальной проволоки в режиме термоциклирования может производиться в защитной атмосфере, для размещения которой используется контейнер с насыщающей смесью 6, либо без нее. Ступенчатая термическая обработка в режиме термоциклирования реализуется за счет наличия связи между устройством для контроля силы электрического тока, проходящего через стальную проволоку, и температуры проволоки 2 и контроллером 4. Изменение режима термической обработки происходит при получении контроллером управляющего сигнала от устройства для контроля силы электрического тока, проходящего через стальную проволоку, и температуры упомянутой проволоки 2.

Нами проводилось диффузионное насыщение проволоки Св 08Г2С ГОСТ 2246-80 диаметром 1,2 мм бором, титаном и алюминием<sup>5</sup>. Диффузионное насыщение проволоки бором осуществляли в порошке ферробора ФБ 17 (17% В) ГОСТ 14848-69 и смеси, состоящей из 99% В4С + 1% NaF, титаном – в порошке ферротитана ФТи 35 (35 % Ti) ГОСТ 4761-91, алюминием – в смеси, состоящей из оксида алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и чистого алюминия (Al). Электрический ток пропускали через проволоку циклически с длительностью импульса 1–10 с и длительностью паузы 1–3 с. Обработка производилась по маятниковой схеме, исключая выдержку обрабатываемого проволочного материала при максимальной и минимальной температурах. Нагрев и охлаждение выполнялись непрерывно в течение заданного временного интервала.

Металлографические исследования проволоки, покрытий проводили на шлифах, изготовленных в соответствии с ГОСТ 9.302. Использовали металлографический комплекс на базе микроскопа Nikon-Epiphot. Измерение микротвердости структурных составляющих проводили на микротвердомере IdentaMet 1106 (Викерс) с камерой UI-1540С и управляющим компьютером в комплекте.

Анализировалась зависимости между производительностью борирования проволоки, измеряемой в г/мм<sup>2</sup>\*мин (количество легирующего элемента, введенного в единицу площади за единицу времени), и фракционным составом насыщающей среды. Для этого порошок ферробора был разделен на четыре группы в зависимости от фракционного состава частиц: 0–63 мкм, 63–160 мкм, 160–200 мкм и 200–315 мкм соответственно.

Для оптимизации режима обработки проволоки разработана методика (рисунок 2), позволяющая назначить при заданной силе тока время нагрева ( $\tau_u$ ) и охлаждения ( $\tau_n$ ) для каждого цикла обработки в зависимости от диаметра проволоки.



**Рисунок 2. – Методика оптимизации режимов диффузионного насыщения и термической обработки проволоки в условиях электроконтактного циклического электронагрева**

На первом этапе опытным путем устанавливались максимальный и минимальный режимы обработки проволоки. Под максимальным режимом обработки подразумевается режим, при котором материал проволоки нагревается до температуры, близкой к температуре плавления, т.е. режим, при котором проволока оплавляется, но при этом обеспечивается непрерывность процесса (максимально возможная длительность импульса  $\tau_{u\max}$  и минимально возможная длительность паузы  $\tau_{n\min}$ ). Дополнительно учитывались особенности насыщающей среды. Недопустимо наличие пирроэффекта, возгорание насыщающей среды.

<sup>5</sup> Способ диффузионного насыщения стальной проволоки: пат. № 13370 МПК (2009) С 23С 8/00, С 23С 10/00, С 23D 1/34 / В.М. Константинов, М.В. Семенченко, В.Г. Дашкевич, А.С. Губанов. – Опубл. 30.06.2010.

При минимальном режиме обработки проволока нагревается до видимого красного свечения (минимально возможная длительность импульса  $\tau_{u \min}$  и максимально возможная длительность паузы  $\tau_{n \max}$ ). Зависит от характеристик и свойств обрабатываемой проволоки.

Далее назначались два пробных режима обработки:

– длительность импульса определялась путем уменьшения максимальной длительности импульса на величину, не превышающую 1 с; длительность паузы – минимальная. При этом на поверхности проволоки полностью исключались участки оплавления;

– длительность импульса – минимальная, длительность паузы меньше максимальной длительности паузы на 1 с.

По результатам проведенных металлографических исследований оценивалась проведенная обработка: наличие и толщина диффузионного слоя, значение микротвердости диффузионного слоя и материала проволоки. Выбирался режим с наилучшим качеством диффузионного слоя.

Далее режим обработки устанавливался путем уменьшения длительности паузы (если выбран максимальный режим обработки) и увеличения длительности импульса (если выбран минимальный режим). Назначение режимов обработки производилось до получения оптимального результата.

Разработанная методика позволила выбрать для насыщения проволоки цинком:  $\tau_u = 0,15$  с,  $\tau_n = 1$  с, алюминием и титаном:  $\tau_u = 10$  с,  $\tau_n = 1$  с. Микроструктура алитированной проволоки представлена на рисунке 3.

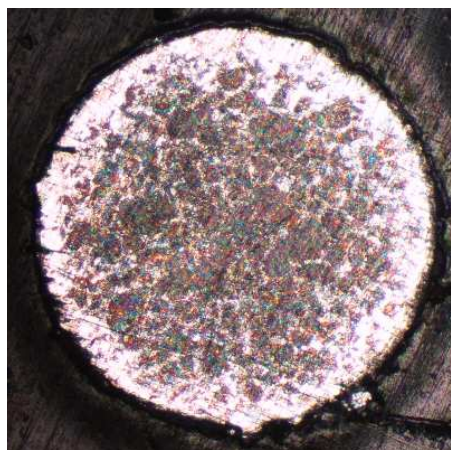


Рисунок 3. – Микроструктура алитированной проволоки,  $\times 50$

Металлографические исследования проволоки, подвергнутой диффузионному насыщению бором, показали, что формирования химического соединения ( $\text{FeB}$  и  $\text{FeB}_2$ ) не происходит. Микротвердость диффузионного слоя соответствует микротвердости твердого раствора бора в  $\alpha$ -железе. Градиент концентрации бора в поперечном сечении проволоки в направлении от поверхности к центру меньше по сравнению с диффузионным насыщением в печи, что снижает риск скалывания сформированного слоя (и, как следствие, уменьшения концентрации легирующего элемента) в процессе формирования восстановительного покрытия. При этом качество поверхности намного выше.

Исследование влияния составов смесей, используемых для диффузионного насыщения проволоки в режиме электроконтактного циклического нагрева, свидетельствует о том, что в качестве насыщающей среды предпочтительно применять порошки чистых металлов либо порошки химических веществ, из которых выделение активных атомов легирующего элемента не требует длительного времени и высокой температуры. Это обусловлено особенностями диффузионного насыщения стальной проволоки путем пропускания тока через изделие, при котором температура проволоки выше температуры насыщающей смеси и температура процесса постоянно меняется. В случае применения химических веществ, разлагающихся при высокой температуре и в результате длительной изотермической выдержки, формирование диффузионного слоя проходить не будет из-за недостаточности времени для выделения активных атомов легирующего элемента. Так, при диффузионном насыщении проволоки бором в смеси, содержащей 99%  $\text{B}_4\text{C}$  + 1%  $\text{NaF}$ , формирование диффузионного слоя не наблюдалось.

Исследования влияния фракционного состава насыщающей среды на производительность процесса продемонстрировали, что диффузионный слой наибольшей толщины формируется при размере частиц 0–63 мкм. Однако в этом случае местами наблюдается значительное прилипание частиц насыщающей среды к поверхности проволоки, препятствующее ее прохождению между электроконтактными роликами, что делает процесс насыщения нестабильным. Поэтому для борирования стальной проволоки рекомендуется применять насыщающую среду с размером частиц от 63 до 160 мкм.

Предложенная технология диффузионного насыщения и термической обработки позволяет получить относительно недорогую проволоку по сравнению со сложнолегированным проволочным материалом за ограниченный промежуток времени. Время нахождения каждого микрообъема металла проволоки в зоне диффузионного насыщения составляет 2–4 мин вместо нескольких часов при традиционном насыщении в печи. Нет ограничений по длине обработки. Полученная проволока может использоваться как присадочный материал при формировании защитных и восстановительных покрытий, как готовое изделие.

**Заключение.** Таким образом, можно сделать следующие выводы:

– технология диффузионного насыщения и термической обработки проволоки путем электроконтактного циклического нагрева обеспечивает получение экономно-легированной проволоки, подходящей для восстановления или упрочнения дешевых малоресурсных деталей, или проволоки с нужными механическими свойствами;

– предложенная установка допускает обработку с длительностью импульса и длительностью паузы 0,01 с – 999 мин. Специальное электронное табло позволяет задать величину силы тока при максимальном значении 100 А. Скорость движения проволоки в зоне обработки в базовом исполнении составляет 10 см/мин. Величина напряжения регулируется и составляет 3–32 В;

– разработанная методика позволяет назначить оптимальный режим диффузионного насыщения или термической обработки проволоки различного диаметра и разных сред путем электроконтактного циклического нагрева. Выбраны режимы для насыщения проволоки СВ08Г2С ГОСТ 2246-80 диаметром 1,2 мм цинком:  $\tau_u = 0,15$  с,  $\tau_n = 1$  с; алюминием и титаном:  $\tau_u = 10$  с,  $\tau_n = 1$  с;

– применением циклического электронагрева при диффузионном насыщении и термической обработке проволоки имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при назначении режима обработки и выборе состава насыщающей среды. Так, в качестве насыщающей среды предпочтительно использовать порошки чистых металлов либо порошки химических веществ, из которых выделение активных атомов легирующего элемента не требует длительного времени и высокой температуры. Имеет значение фракционный состав. Для борирования стальной проволоки рекомендуется применять насыщающую среду с размером частиц от 63 до 160 мкм.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Семенченко М.В. Диффузионное насыщение стальной проволоки в условиях электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования // Тенденции развития науки и образования. – 2017. – № 32-4. – С. 60–61.
2. Романов Д.И. Электроконтактный нагрев металлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1981. – 168 с.

#### REFERENCES

1. Semenchenko, M.V. (2017). Diffuzionnoe nasyshchenie stal'noi provoloki v usloviyakh elektrokontaktnogo nagreva v rezhime termotsiklirovaniya [Diffusion saturation of steel wire under conditions of electric contact heating in the thermal cycling mode]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*, (32-4), 60–61. (In Russ., abstr. in Engl.)
2. Romanov, D.I. (1981). *Elektrokontaknyi nagrev metallov*. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.)

Поступила 11.07.2024

### TECHNOLOGY OF DIFFUSION SATURATION AND HEAT TREATMENT OF WIRE BY ELECTROCONTACT CYCLIC HEATING

**M. SEMENCHENKO**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*An installation for diffusion saturation and heat treatment of wire by electrocontact cyclic heating is proposed. The equipment allows processing by continuous and stepwise wire feeding. The installation allows processing with a pulse duration and a pause duration of 0,01 seconds – 999 minutes. Allows you to set the current strength at a maximum value of 100 A and select the voltage value from the range of 3–32 V. The speed of movement of the wire in the processing area in the basic version is 10 cm/min. The influence of the fractional composition of the saturating medium on the course of the diffusion saturation of the wire has been studied. It is recommended to use a saturating medium with a particle size of 63–160 microns for borating steel wire. A method is proposed for optimizing the modes of diffusion saturation and heat treatment of wire when changing the diameter of the wire, the chemical composition of the wire material and the saturating medium, and the processing time.*

**Keywords:** *technology, installation, wire, diffusion saturation, thermal cycling, electric contact heating, powder medium.*

## ТРАНСПОРТ

УДК 656.13; 656.051

DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-30-35

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ  
В КОНФЛИКТНОЙ ЗОНЕ ДЛЯ ПОПУТНОГО ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА  
ПОСРЕДСТВОМ УТОЧНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРИВЕДЕНИЯ ПО ТЯЖЕСТИ ДТП*д-р техн. наук, проф. Д.В. КАПСКИЙ**(Белорусский национальный технический университет, Минск)**канд. техн. наук Д.П. ХОДОСКИН**(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)*

*Погрешность существующего метода прогнозирования аварийности в конфликте «транспорт–транспорт» в попутном транспортном потоке составляет порядка 40% (для рассматриваемой методики). Более глубокий анализ данного метода показал, что он обладает широкими теоретическими (основанными на предложении усовершенствованной методики определения инертной и активной зон дилеммы) и аналитическими возможностями его усовершенствования, которые связаны с детализацией общих изменений в базовом методе, направленных на уточнение расположения и продолжительности конфликтной зоны, их формализацию, корректировку значения служебного замедления при подъезде к регулируемому перекрестку (РПК), а также учет средневзвешенного значения замедления в конфликтной зоне. Кроме того, существенную роль в дальнейшем снижении погрешности прогноза играет и поправка значений коэффициентов приведения ДТП по тяжести с их последующим включением в построение зависимости аварийности от потенциальной опасности.*

**Ключевые слова:** конфликт «транспорт–транспорт», зона дилеммы, конфликтная зона, замедление, уравнение регрессии.

**Введение.** Прогнозирование аварийности в работе<sup>1</sup> осуществлялось в конфликте «транспорт–транспорт» при подходе к РПК при смене сигналов светофора, т.е. во внутрифазном режиме. Рассматриваемые в данном режиме столкновения с ударом сзади и попутные столкновения характеризуются тем фактом, что происходят в конфликтной зоне, расположенной на подъезде к стоп-линии. Под конфликтной зоной понимается неразрывная группа компактно расположенных и взаимодействующих между собой конфликтных точек, находящихся на полосе движения в зоне дилеммы<sup>2</sup> [1].

За базовую (существующую) принята методика прогнозирования аварийности по методу конфликтных зон во внутрифазном режиме, положения которой приведены в источнике<sup>3</sup>. На основе результатов анализа методов исследования механизма конфликтов в попутном транспортном потоке (ТП) и прогнозирования аварийности, положений разработанной модели определения местоположения зоны дилеммы и модели конфликтного взаимодействия автомобилей в попутном потоке и ее формализации, а также ряда проведенных экспериментальных исследований<sup>1</sup> в данной статье кратко приведены изменения, характеризующие новую методику расчета потенциальной опасности.

**Основная часть.** *Учет изменений в базовом методе.* По результатам исследований<sup>1</sup> [2] наиболее опасными являются зона *B* (инертная зона дилеммы) и зона *C* (характеризующаяся применением замедления больше служебного). Эти зоны расположены одна за другой и обладают указанными проблемными характеристиками. В связи с этим было принято решение об объединении их в одну *конфликтную зону на полосе*, параметры которой внесены в новую методику прогнозирования (рисунок 1). При попадании в первую (зону *C*) водитель для остановки у стоп-линии должен будет применить замедление, превышающее служебное; попадание во вторую (зону *B*) с большой вероятностью спровоцирует межфазный конфликт «транспорт–транспорт» или конфликт с пешеходом на отдаленном пешеходном переходе (при решении проезда перекрестка). Следовательно, данная зона определяется следующими параметрами: общей длиной конфликтной зоны  $S_{кз}$ , м, состоящей из длин зон  $S_C$ , м, и  $S_{длв}$ , м; шириной полосы движения  $b$ , м; замедлениями соответственно в зонах *C* и *B* –  $j_C$ ,  $j_B$ , м/с<sup>2</sup>, и замедлением в конфликтной зоне  $j_{кз}$ , м/с<sup>2</sup>. Скорости лидирующего и ведомого автомобилей определялись по усовершенствованной методике, приведенной в работе<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Ходоскин Д.П. Снижение аварийности на подходах к регулируемым перекресткам путем управления движением попутных транспортных средств: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10. – Минск, 2023. – 163 л.

<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. – Минск, 2003. – 132 л.

<sup>3</sup> Капский Д.В. Методология повышения безопасности дорожного движения в городских очагах аварийности: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.10. – Минск, 2013. – 194 л.

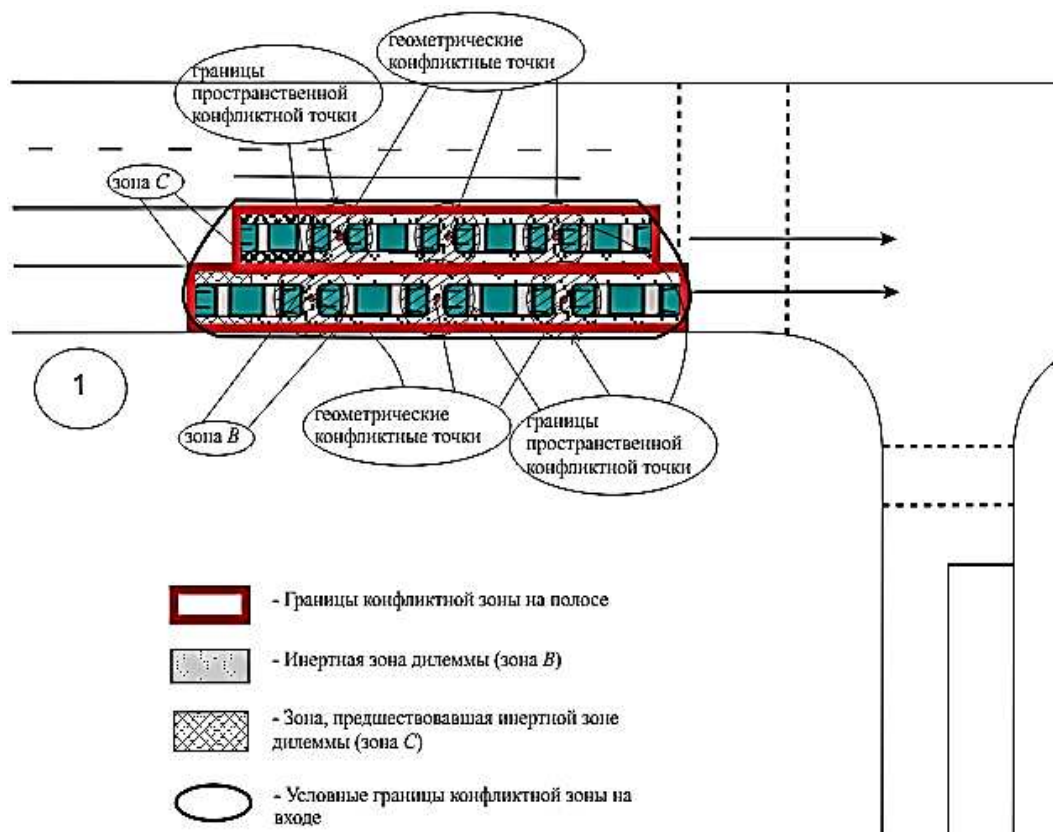


Рисунок 1. – Схема образования конфликтной зоны на входе

Конфликтная зона на входе представляет собой совокупность конфликтных зон на каждой из его полос (см. рисунок 1). Формулы для расчета протяженности конфликтных зон для каждого из возможных случаев соотношения искомых расстояний  $S_{min}$ ,  $S_{min C}$ ,  $S_{max}$  приведены в работе<sup>4</sup>. Например, для наиболее опасного случая (с наличием инертной зоны дилеммы) –  $S_{max} < S_{min} < S_{min C}$ , протяженность определяется как

$$S_{КЗ} = S_{длВ} + S_C, \tag{1}$$

где  $S_{длВ}$  – протяженность инертной зоны дилеммы  $B$ , м;  
 $S_C$  – протяженность зоны  $C$ , м.

Одним из необходимых параметров при расчете значения потенциальной опасности является величина замедления в каждой из указанных выше проблемных зон (составляющих конфликтную зону). Поэтому по аналогии с формулой для определения величины среднего замедления в центре зоны дилеммы [1] представляется возможным определить замедление в каждой из них.

В соответствии с результатами исследований<sup>4</sup> предлагается в качестве служебного замедления использовать значение  $3,28 \text{ м/с}^2$ , т.к. значение, взятое, например, в источниках [3–5] и равное  $2,0\text{--}3,0 \text{ м/с}^2$  (в базовом методе<sup>5</sup> применяется значение  $2,0 \text{ м/с}^2$ ), как видится, уже устарело в силу изменений, произошедших за последние 10–20 лет и связанных с улучшениями динамических свойств транспортных средств, покрытия проезжей части и т.п.

Предлагается использовать расчетную формулу для определения продолжительности конфликтной зоны  $t_{КЗ}$

$$t_{КЗ} = \frac{S_{КЗ}}{v_B}, \tag{2}$$

где  $v_B$  – скорость лидирующего автомобиля, м/с.

<sup>4</sup> Ходоскин Д.П. Снижение аварийности на подходах к регулируемым перекресткам путем управления движением попутных транспортных средств: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10. – Минск, 2023. – 163 л.

<sup>5</sup> Капский, Д.В. Методология повышения безопасности дорожного движения в городских очагах аварийности: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.22.10. – Минск, 2013. – 194 л.

Для определения времени оповещения о предстоящей смене сигнала светофора в условиях недостаточной видимости предлагается использовать формулу<sup>6</sup>

$$t_{\text{оп}} = \frac{S_o}{v_p} - 0,6, \quad (3)$$

где  $S_o$  – фактическое расстояние видимости ТСОДД, м;

$v_p$  – разрешенная скорость движения ТП на данном участке УДС, м/с.

Согласно вводимым изменениям, большое влияние на точность прогнозирования наряду с величиной замедления в конкретной зоне оказывает и учет непосредственной длины каждой из зон. Для рассматриваемого случая ( $S_{\text{max}} < S_{\text{min}} < S_{\text{min c}}$ ) замедление в конфликтной зоне определяется как

$$j_{\text{КЗ}} = \frac{j_C S_C + j_B S_{\text{длВ}}}{S_C + S_{\text{длВ}}}. \quad (4)$$

Таким образом, замедление в конфликтной зоне определяется при помощи средневзвешенной величины, что позволяет учесть влияние протяженности зон  $C$  и  $B$  на величину итогового замедления.

Превышение среднего замедления в конфликтной зоне относительно служебного с учетом указанных положений рассчитывается как

$$\Delta j_{\text{КЗ}} = j_{\text{КЗ}} - 3,28 \geq 0. \quad (5)$$

Аналогично при расчете коэффициента замедления будет учитываться  $\Delta j_{\text{КЗ}}$  [3]:

$$K_{\text{адл}} = 1 + \Delta j_{\text{КЗ}}^2. \quad (6)$$

Указанные выше изменения вносятся в структурную формулу для определения потенциальной опасности<sup>6</sup>

$$P_o = K_{\text{он}}^{a_1} \cdot K_v^{a_2} \cdot K_e^{a_3} \cdot K_p^{a_4} \cdot K_n^{a_5} \cdot K_y^{a_6} \cdot K_t^{a_7}, \text{ ед./год}, \quad (7)$$

где  $K_{\text{он}}'$  – уточненный коэффициент начальной вероятности конфликта;

$K_v'$  – уточненный коэффициент скоростей;

$K_e'$  – уточненный коэффициент вида конфликта;

$K_p'$  – коэффициент плотности;

$K_n'$  – уточненный коэффициент нарушений;

$K_y'$  – уточненный коэффициент условий;

$K_t'$  – коэффициент времени;

$a_1$ – $a_7$  – показатели степени ранжирования.

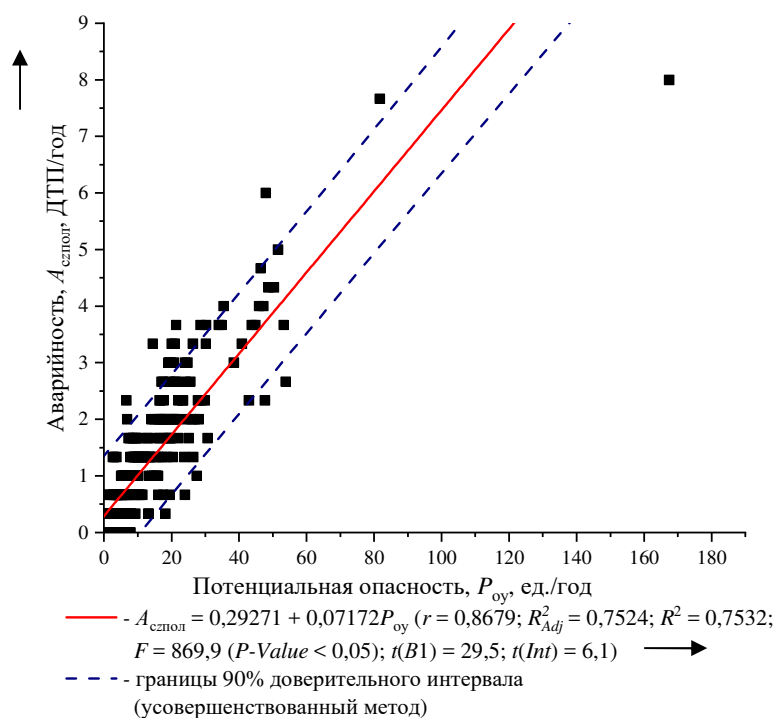
Зависимость аварийности от потенциальной опасности внутрифазного режима по конфликтным зонам на полосах с использованием усовершенствованного метода представлена на рисунке 2.

Для оценки возможности практического использования полученной (и последующих) регрессионной модели на первом этапе выполняется контроль ее адекватности. Она заключается в проверке выполнения модельных предположений, которая осуществляется на основании анализа остатков. На втором этапе производится оценка статистической значимости уравнения регрессии при помощи расчета и оценки коэффициентов корреляции и детерминации, критериев Фишера, Стьюдента и  $P$ -Value. На третьем этапе оценивается качество уравнения регрессии при помощи коэффициента детерминации и скорректированного коэффициента детерминации. Последний необходим при сравнении альтернативных регрессионных моделей, отличающихся друг от друга разным количеством параметров [6–8].

Значения статистических параметров по модели, приведенной на рисунке 2: коэффициентов корреляции ( $r$ ) – 0,87, детерминации ( $R^2$ ) – 0,753; скорректированного коэффициента детерминации ( $R_{\text{Adj}}^2$ ) – 0,752; критерия Фишера ( $F$ ) – 869,9; критериев Стьюдента ( $t$ ) для ( $B1$ ) – 29,5, для свободного члена – 6,1.

<sup>6</sup> Капский, Д.В. Методология повышения безопасности дорожного движения в городских очагах аварийности: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.22.10. – Минск, 2013. – 194 л.





**Рисунок 2. – Зависимость аварийности от потенциальной опасности внутрифазного режима с использованием изменений в существующем методе<sup>7</sup>**

Значение коэффициента корреляции свидетельствует о наличии высокой зависимости, однако значение коэффициента детерминации – об удовлетворительном качестве полученной регрессионной модели, поскольку она объясняет порядка 75% изменения аварийности. Соответственно 25% изменчивости аварийности можно отнести к влиянию других факторов (хотя это не соответствует действительности). Значения критериев Стьюдента, Фишера и  $P\text{-Value}$  указывают на статистическую значимость полученного уравнения регрессии.

Учет в методике уточненных коэффициентов приведения по тяжести ДТП. Приведение ДТП по тяжести последствий неоднозначно, что следует из сравнения величин коэффициентов приведения<sup>8</sup> [3; 9] (особенно от их абсолютной разницы между собой). Кроме того, определенная на данной стадии величина потенциальной опасности уже в достаточной мере характеризует тяжесть последствий, поскольку учитывает в используемой методике основные параметры, влияющие на тяжесть ДТП, такие как скорость движения, интенсивность, коэффициент приведения состава транспортного потока и др. Поэтому необходимо оценить адекватность выбора соответствующего коэффициента для ДТП с ранеными и со смертельным исходом.

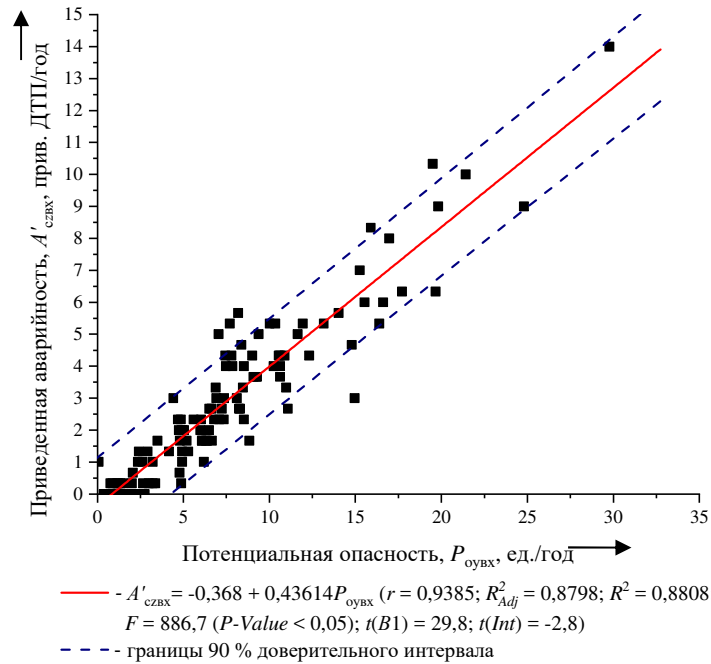
С помощью алгоритма выполнен поиск наилучших зависимостей между аварийностью и потенциальной опасностью при различных значениях коэффициентов приведения для ДТП с ранеными от 1,5 до 5 с шагом 0,5 и для ДТП со смертельным исходом от 5 до 50 с шагом 0,5. В результате установлены следующие значения:  $K_p = 4$ ,  $K_c = 9$ . Указанные диапазоны и полученные значения примерно подтверждаются справочными и вычисленными данными, представленными в работах, указанных выше. Зависимость приведенной аварийности от потенциальной опасности с учетом установленных значений коэффициентов приведения для ДТП с ранеными и ДТП с погибшими изображена на рисунке 3.

Значения статистических параметров для модели, изображенной на рисунке 3, составляют: коэффициентов корреляции ( $r$ ) – 0,94; детерминации ( $R^2$ ) – 0,881; скорректированного коэффициента детерминации ( $R_{Adj}^2$ ) – 0,88; критерия Фишера ( $F$ ) – 886,7; критериев Стьюдента ( $t$ ) для ( $B1$ ) – 29,8, для свободного члена – (-2,8).

Значение коэффициента корреляции показывает на наличие высокой зависимости, а значение коэффициента детерминации – на достаточно хорошее качество полученной регрессионной модели, поскольку она объясняет 88% изменения аварийности. Соответственно 12% изменчивости аварийности можно причислить к влиянию других факторов. Выводы по исследованию критериев Стьюдента, Фишера и  $P\text{-Value}$  аналогичны предыдущей зависимости. Графическое исследование остатков показало определенную близость их графиков к горизонтальной «полосе», поэтому регрессионная модель считается удовлетворительной.

<sup>7</sup> Ходоскин Д.П. Снижение аварийности на подходах к регулируемым перекресткам путем управления движением попутных транспортных средств: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10. – Минск, 2023. – 163 л.

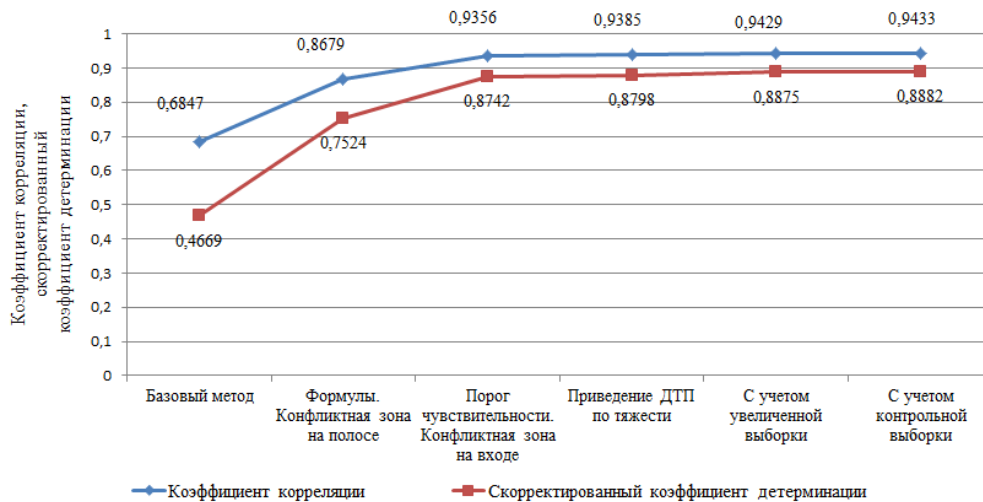
<sup>8</sup> Капский Д.В. Совершенствование метода прогнозирования аварийности на регулируемых перекрестках для повышения безопасности дорожного движения: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10. – Минск, 2003. – 132 л.



**Рисунок 3. – Зависимость приведенной аварийности от потенциальной опасности по конфликтным зонам на входах с учетом уточненных коэффициентов приведения по тяжести ДТП<sup>9</sup>**

По имеющейся выборке ДТП за исследуемый период установлено процентное распределение общего числа ДТП в попутном транспортном потоке по тяжести, которое позволило в дальнейшем прогнозировать конкретное число ДТП с разбивкой по тяжести.

**Заключение.** Учет порога чувствительности является одним из шагов в совершенствовании модели зависимости аварийности от потенциальной опасности для рассматриваемых видов конфликтов. На рисунке 4 показаны результаты пошагового совершенствования параметров, характеризующих зависимость, которая получена по базовой методике расчета потенциальной опасности.



**Рисунок 4. – Пошаговое изменение коэффициента корреляции и скорректированного коэффициента детерминации**

В результате совершенствования методики поитерационный подход позволил достичь существенного улучшения качества статистических параметров, характеризующих итоговую регрессионную модель по сравнению с параметрами модели, соответствующей базовому методу. На рисунке 4 представлена динамика коэф-

<sup>9</sup> Ходоскин Д.П. Снижение аварийности на подходах к регулируемым перекресткам путем управления движением попутных транспортных средств: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10. – Минск, 2023. – 163 л.

фициента корреляции и скорректированного коэффициента детерминации, который используется для сравнения альтернативных регрессионных моделей, отличающихся друг от друга разным количеством параметров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Капский Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2008. – 243 с.
2. Капский Д.В., Ходоскин Д.П. Разработка мероприятий по снижению аварийности в попутном транспортном потоке // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2022. – № 10(46). – С. 86–91.
3. Врубель Ю. А. Организация дорожного движения. В 2 ч. Ч. 1. – Минск: Белорус. фонд безопасности дорож. движения, 1996. – 328 с.
4. Лукьянчук А.Д., Капский Д.В. Безопасность транспортных средств: учеб. пособие. – Минск: БНТУ, 2016. – 264 с.
5. Молодцов В.А. Безопасность транспортных средств: учеб. пособие. – Тамбов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 236 с.
6. Серегина В.С., Старовойтов А.Н., Бочаров Д.И. Анализ данных: учеб.-метод. пособие. – Гомель: БелГУТ, 2012. – 136 с.
7. Харин Ю.С., Малюгин В.И., Абрамович М.С. Математические и компьютерные основы статистического анализа данных и моделирования: учеб. пособие. – Минск: БГУ, 2008. – 455 с.
8. Четыркин Е.М., Калихман И.Л. Вероятность и статистика. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 319 с.
9. Автомобильные перевозки и организация дорожного движения: справ.: [пер. с англ.] / В. У. Рэнкин, П. Клафи, Г. С. Левинсон и др. – М.: Транспорт, 1981. – 592 с.

## REFERENCES

1. Kapskii, D.V. (2008). *Prognozirovanie avariinosti v dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.)
2. Kapskii, D.V. & Khodoskin, D.P. (2022). *Razrabotka meropriyatii po snizheniyu avariinosti v poputnom transportnom potoke* [Development of Activities for Reducing Accidents in Following Traffic Stream]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science], 10(46), 86–91. (In Russ., abstr. in Engl.)
3. Vrubel', Yu.A. (1996). *Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya*: V 2 ch. Ch. 1. Minsk: Belorus. fond bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya. (In Russ.)
4. Luk'yanchuk, A.D. & Kapskii, D.V. (2016). *Bezopasnost' transportnykh sredstv*. Minsk: BNTU. (In Russ.)
5. Molodtsov, V.A. (2013). *Bezopasnost' transportnykh sredstv*. Tambov: FGBOU VPO «TGTU». (In Russ.)
6. Seregina, V.S., Starovoitov, A.N. & Bocharov, D.I. (2012). *Analiz dannykh*. Gomel': BelGUT. (In Russ.)
7. Kharin, Yu.S., Malyugin, V.I. & Abramovich, M.S. (2008). *Matematicheskie i komp'yuternye osnovy statisticheskogo analiza dannykh i modelirovaniya*. Minsk: BGU. (In Russ.)
8. Chetyrkin, E.M. & Kalikhman, I.L. (1982). *Veroyatnost' i statistika*. Moscow: Finansy i statistika. (In Russ.)
9. Renkin, V. U., Klafi, P., Levinson, G. S., Kvinbi, G. D., Uotlvort, Dzh., Robinson, K. K., ... Kass, S. (1981). *Avtomobil'nye perevozki i organizatsiya dorozhnogo dvizheniya: spravochnik*. Moscow: Transport. (In Russ.)

Поступила 17.06.2024

**IMPROVING THE METHOD FOR CALCULATING POTENTIAL DANGEROUS  
IN THE CONFLICT ZONE FOR COMMON TRAFFIC FLOW THROUGH  
CLARIFICATION OF REDUCTION COEFFICIENTS FOR THE SEVERITY OF ROAD ACCIDENTS**

**D. KAPSKI**

*(Belarusian National Technical University, Minsk)*

**D. KHODOSKIN**

*(Belarusian State University of Transport, Gomel)*

*The forecast error of the existing method for predicting accident rates in a transport-transport conflict in a passing traffic flow is about 40% (for the method under consideration). A deeper analysis of this method showed that it has broad theoretical (based on the proposal of an improved methodology for determining the inert and active zones of the dilemma) and analytical possibilities for its improvement, which are associated with clarifying general changes in the basic method aimed at clarifying the location and duration of the conflict zone and their formalization, the values of service deceleration when approaching a signalized intersection (SIC), as well as taking into account the weighted average value of deceleration in the conflict zone. In addition, a significant role in further reducing the forecast error is played by clarifying the values of the coefficients for reducing accident severity and then taking them into account when constructing the dependence of the accident rate on the potential danger.*

**Keywords:** *transport-transport conflict, dilemma zone, conflict zone, slowdown, regression equation.*

## ИНТЕГРАЦИЯ МЕТОДОВ КОГНИТИВНОГО АНАЛИЗА В СИСТЕМУ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

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

*Представлен инновационный подход к оценке опасности участков автомобильных дорог, основанный на интеграции методов когнитивного моделирования и нечеткой логики. Предложена комплексная методика, позволяющая учитывать широкий спектр количественных и качественных характеристик дорожных условий, а также моделировать сложные нелинейные взаимосвязи между различными факторами риска. Разработанный подход включает несколько ключевых этапов: построение детализированной когнитивной карты, отражающей структуру взаимосвязей между факторами безопасности; формализацию факторов опасности с использованием аппарата нечетких множеств; алгоритм анализа рисков, основанный на импульсном моделировании. Отмечены перспективные направления дальнейших исследований, включая интеграцию разработанного подхода с геоинформационными системами, применение методов машинного обучения для автоматической настройки параметров модели и разработку динамических когнитивных карт, способных адаптироваться к изменяющимся условиям в реальном времени.*

***Ключевые слова:** безопасность дорожного движения, когнитивное моделирование, нечеткая логика, оценка рисков, автомобильные дороги, прогнозирование аварийности.*

**Введение.** В современном мире проблема безопасности дорожного движения остается одной из наиболее актуальных. Несмотря на постоянное совершенствование транспортных средств и дорожной инфраструктуры, количество дорожно-транспортных происшествий (ДТП) и их последствия продолжают оставаться на высоком уровне, особенно на загородных автомобильных дорогах. По данным Всемирной организации здравоохранения, ежегодно в мире в результате ДТП погибает около 1,3 млн человек, а еще от 20 до 50 млн получают травмы различной степени тяжести<sup>1</sup>.

Традиционные методы оценки безопасности дорожного движения, основанные на статистическом анализе уже произошедших ДТП, зачастую не позволяют своевременно выявлять потенциально опасные участки дорог и принимать превентивные меры. В связи с этим возникла необходимость в разработке новых подходов к анализу и оценке безопасности дорожного движения, которые бы учитывали многофакторность и сложность взаимодействия элементов системы «водитель–автомобиль–дорога–среда» (ВАДС).

Одним из перспективных направлений в решении данной проблемы является применение методов когнитивного моделирования и нечеткой логики. Эти подходы дают возможность учитывать не только количественные, но и качественные характеристики дорожных условий, а также моделировать сложные причинно-следственные связи между различными факторами, влияющими на безопасность движения.

*Цель данного исследования* – разработка методики оценки опасности участков автомобильных дорог на основе когнитивного моделирования с применением аппарата нечеткой логики. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ существующих подходов к оценке безопасности дорожного движения и выявить их ограничения.
2. Разработать концептуальную модель оценки опасности участков загородных автодорог с учетом ключевых факторов риска.
3. Формализовать факторы опасности с использованием теории нечетких множеств.
4. Построить когнитивную карту взаимосвязей между факторами риска и уровнем опасности дорожных участков.
5. Разработать алгоритм анализа и оценки рисков на основе когнитивной модели.

Научная новизна исследования заключается в интеграции методов когнитивного моделирования и нечеткой логики для комплексной оценки опасности участков автомобильных дорог, что позволяет учитывать неопределенность и субъективность экспертных оценок, а также моделировать сложные взаимосвязи между различными факторами риска.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования разработанной методики для выявления потенциально опасных участков дорог, а также для оптимизации мероприятий по повышению безопасности дорожного движения на существующих автомобильных дорогах.

<sup>1</sup> Global status report on road safety 2023. – Geneva: World Health Organization; 2023. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. – URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/375016/9789240086517-eng.pdf>

**Основная часть.** *Когнитивное моделирование в контексте дорожной безопасности.* Когнитивное моделирование представляет собой инструмент для анализа и прогнозирования поведения сложных систем, особенно в условиях неопределенности и неполноты информации. В контексте дорожной безопасности этот подход позволяет учитывать многочисленные взаимосвязанные факторы, влияющие на уровень опасности участков автомобильных дорог.

Основой когнитивного моделирования является построение когнитивной карты – ориентированного графа, в котором вершины соответствуют факторам (концептам), а дуги отражают причинно-следственные связи между ними [1]. В случае оценки безопасности дорожного движения концептами могут выступать различные характеристики дороги, окружающей среды, транспортного потока и поведения водителей.

Математически когнитивная карта может быть представлена в виде кортежа

$$G = (V, E, W),$$

где  $V = \{v_i\}, i = 1, 2, \dots, n$  – множество вершин (концептов);

$E = \{e_{ij}\}, i, j = 1, 2, \dots, n$  – множество дуг, отражающих взаимосвязи между концептами;

$W = \{w_{ij}\}, i, j = 1, 2, \dots, n$  – множество весов дуг, характеризующих силу влияния концептов друг на друга.

Для анализа когнитивной карты и прогнозирования изменений в системе используется аппарат импульсных процессов [2]. Изменение значения концепта  $v_i$  в момент времени  $t + 1$  может быть описано как

$$v_i(t+1) = v_i(t) + \sum_{j \neq i} (j \neq i) w_{ji} * [v_j(t) - v_j(t-1)], \quad (1)$$

где  $v_i(t)$  – значение  $i$ -го концепта в момент времени  $t$ ;

$w_{ji}$  – вес влияния  $j$ -го концепта на  $i$ -й.

Применение когнитивного моделирования в оценке безопасности дорожного движения имеет ряд преимуществ:

- возможность учета как количественных, так и качественных факторов, влияющих на безопасность движения;
- способность моделировать сложные, нелинейные взаимосвязи между различными аспектами дорожной ситуации;
- гибкость в адаптации модели к конкретным условиям и особенностям исследуемого участка дороги;
- возможность проведения сценарного анализа и оценки эффективности различных мероприятий по повышению безопасности.

Однако при использовании когнитивного моделирования в задачах оценки дорожной безопасности необходимо учитывать следующее:

- субъективность при определении структуры когнитивной карты и весов связей между концептами. Для минимизации этого эффекта рекомендуется привлечение группы экспертов и использование методов согласования экспертных оценок;
- сложность формализации некоторых факторов, влияющих на безопасность движения (например, психологическое состояние водителя или внезапные изменения погодных условий);
- необходимость регулярного обновления и калибровки модели с учетом новых данных и изменений в дорожной инфраструктуре.

Для преодоления этих ограничений и повышения точности оценки опасности участков загородных автомобильных дорог целесообразно интегрировать методы когнитивного моделирования с аппаратом нечеткой логики, что позволит более адекватно учитывать неопределенность и нечеткость исходных данных.

В целом применение когнитивного моделирования открывает новые возможности для комплексного анализа и прогнозирования уровня опасности участков автомобильных дорог, что может существенно повысить эффективность мероприятий по обеспечению безопасности дорожного движения.

*Нечеткая логика и ее применение в оценке дорожных рисков.* Нечеткая логика, впервые предложенная Лотфи Заде в 1965 г. [3], представляет собой математический аппарат для работы с неточными, приближенными рассуждениями. В отличие от классической булевой логики, где высказывания могут быть либо истинными, либо ложными, нечеткая логика позволяет оперировать промежуточными значениями истинности, что делает ее особенно полезной при анализе сложных систем с высокой степенью неопределенности.

В контексте оценки дорожных рисков применение нечеткой логики позволяет более адекватно моделировать реальные ситуации, где границы между «безопасным» и «опасным» состояниями дороги часто размыты и зависят от множества взаимосвязанных факторов.

Основные понятия нечеткой логики, применимые к оценке дорожных рисков, включают:

- лингвистические переменные: например, «скорость движения», «состояние дорожного покрытия», «видимость»;

– нечеткие множества: например, множество «высокая скорость» может быть определено функцией принадлежности  $\mu(x)$ , где  $x$  – скорость транспортного средства:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq 80 \text{ км/ч} \\ (x - 80) / 40, & \text{если } 80 < x < 120 \text{ км/ч} \\ 1, & \text{если } x \geq 120 \text{ км/ч} \\ \end{cases}$$

– лингвистические правила: например, «ЕСЛИ скорость высокая И состояние покрытия плохое, ТО риск ДТП высокий».

Процесс оценки дорожных рисков с использованием нечеткой логики обычно включает следующие этапы:

1. Фаззификация: преобразование четких входных данных в нечеткие значения с использованием функций принадлежности.
2. Применение нечетких правил: обработка входных данных с помощью базы правил, основанных на экспертных знаниях.
3. Агрегирование: объединение результатов применения различных правил.
4. Дефаззификация: преобразование нечетких выходных данных в четкие значения.

Для реализации этого процесса можно использовать различные методы нечеткого вывода, такие как метод Мамдани или метод Сугено [4].

Применение нечеткой логики в оценке дорожных рисков имеет ряд преимуществ:

- возможность работы с качественными описаниями и экспертными оценками;
- учет неопределенности и неточности исходных данных;
- интуитивно понятная интерпретация результатов;
- гибкость в настройке модели под конкретные условия;

Существуют также и некоторые ограничения:

- субъективность при определении функций принадлежности и правил вывода;
- сложность учета динамических изменений в системе;
- потенциальная вычислительная сложность при большом количестве входных переменных.

Для преодоления этих ограничений и повышения эффективности оценки дорожных рисков целесообразно интегрировать методы нечеткой логики с когнитивным моделированием. Это позволяет создать гибридную модель, сочетающую преимущества обоих подходов.

В контексте оценки опасности участков автомобильных дорог нечеткая логика может быть использована для решения следующих задач: формализация экспертных знаний о влиянии различных факторов на безопасность движения; моделирование нечетких взаимосвязей между элементами когнитивной карты; агрегирование различных показателей риска в интегральную оценку опасности участка дороги.

Например, можно определить нечеткое отношение  $R$  между множеством факторов риска  $X$  и уровнем опасности участка дороги  $Y$ :

$$R: X \rightarrow Y, R(x, y) = \mu R(x, y),$$

где  $\mu R(x, y)$  – функция принадлежности, отражающая степень влияния фактора  $x$  на уровень опасности  $y$ .

Интегральная оценка опасности участка дороги может быть получена с использованием операции максиминной свертки:

$$\mu Y(y) = \max(\min(\mu X(x), \mu R(x, y))),$$

где  $\mu X(x)$  – функция принадлежности входного нечеткого множества факторов риска;

$\mu Y(y)$  – функция принадлежности выходного нечеткого множества уровня опасности.

Таким образом, интеграция нечеткой логики в когнитивную модель оценки опасности участков автомобильных дорог позволяет более адекватно учитывать неопределенность и сложность взаимосвязей между различными факторами риска, что повышает точность и надежность получаемых оценок.

*Ключевые факторы опасности на автомобильных дорогах.* Для эффективной оценки опасности участков автомобильных дорог необходимо выделить и систематизировать ключевые факторы, влияющие на безопасность дорожного движения. На основе анализа литературы и статистических данных можно выделить следующие группы факторов (рисунок 1).

Важно отметить, что влияние этих факторов на безопасность дорожного движения часто носит нелинейный характер и может усиливаться при их сочетании. Например, влияние недостаточного радиуса кривой в плане может быть особенно опасным при мокром покрытии и в темное время суток [5]. Кроме этого, в случае наличия на участке отдельных объектов, влияющих на безопасность движения (пересечения, искусственные сооружения и др.), их также можно выделить.

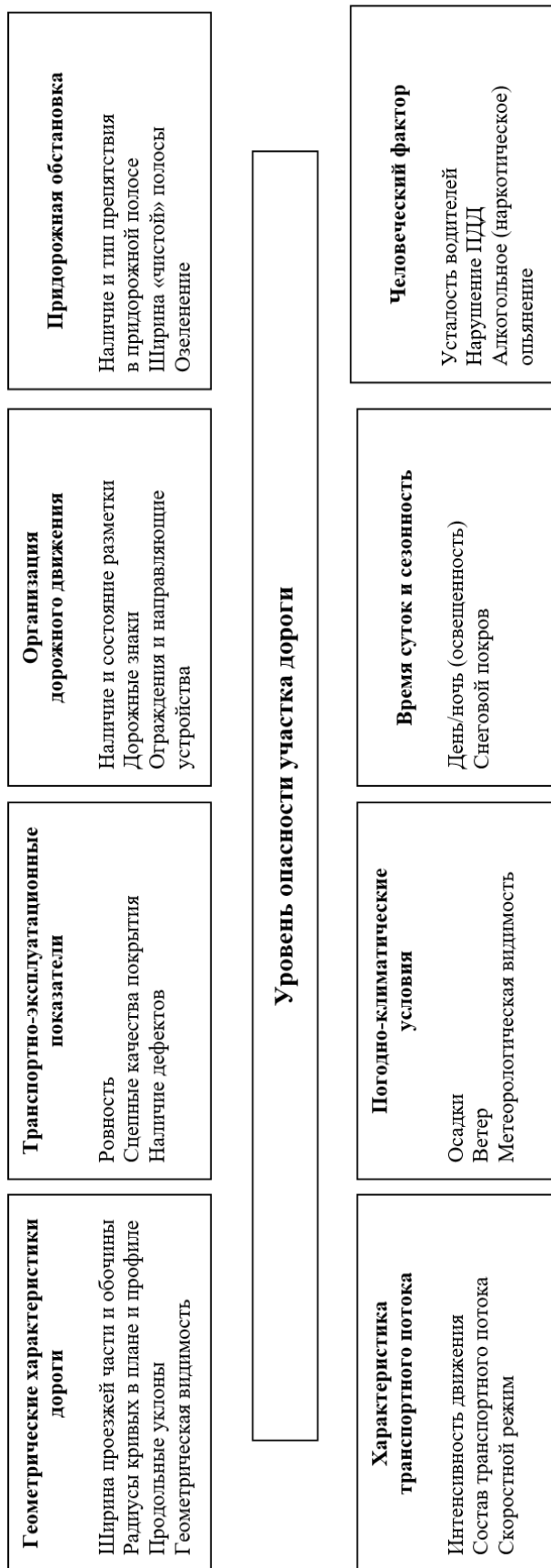


Рисунок 1. – Основные факторы опасности

Для количественной оценки влияния различных факторов на аварийность часто используются статистические методы, к примеру, регрессионный анализ. Так, была предложена модель для оценки вероятности ДТП на загородных дорогах [6]:

$$P(\text{ДТП}) = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n)}{(1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n))},$$

где  $X_i$  – значения факторов риска;  
 $\beta_i$  – коэффициенты регрессии.

Однако такие модели не всегда точно отражают сложные взаимосвязи между факторами и могут давать некорректные результаты при экстраполяции за пределы диапазона исходных данных.

Применение когнитивного моделирования и нечеткой логики позволяет преодолеть эти ограничения и учесть качественные оценки экспертов. Например, в работе [7] предложена нечеткая когнитивная карта для оценки рисков проекта автомагистрали. При построении когнитивной модели оценки опасности участков автомобильных дорог необходимо не только выявить ключевые факторы, но и определить характер и силу их взаимного влияния. Это требует привлечения экспертов в области безопасности дорожного движения и анализа статистических данных о ДТП на различных участках дорог.

Таким образом, комплексный учет ключевых факторов опасности на автомобильных дорогах с использованием методов когнитивного моделирования и нечеткой логики позволяет создать более точную и гибкую систему оценки рисков, способную адаптироваться к различным условиям и учитывать локальные особенности дорожной сети.

*Разработка когнитивной модели оценки опасности дорожных участков.* Разработка когнитивной модели для оценки опасности участков автомобильных дорог включает несколько ключевых этапов:

1. Определение концептов (факторов) модели.
2. Установление причинно-следственных связей между концептами.
3. Определение силы влияния (весов) связей.
4. Построение когнитивной карты.
5. Верификация и валидация модели.

На первом этапе на основе анализа литературы и экспертных оценок выделяются основные факторы, влияющие на безопасность дорожного движения. Эти факторы становятся концептами когнитивной модели.

В нашем случае выделяем следующие группы концептов:

- геометрические характеристики дороги ( $G$ );
- транспортно-эксплуатационные показатели ( $R$ );
- организация дорожного движения ( $T$ );
- придорожная обстановка ( $E$ );
- характеристики транспортного потока ( $V$ );
- погодные-климатические условия ( $W$ );
- время суток и сезонность ( $S$ );
- человеческий фактор ( $H$ );
- уровень опасности участка дороги ( $D$ ).

Каждая группа может быть детализирована до конкретных показателей, например,  $G1$  – ширина проезжей части,  $G2$  – радиус кривой в плане и т.д.

На втором этапе устанавливаются причинно-следственные связи между концептами. Для этого используются методы экспертных оценок, такие как метод Дельфи, или метод анализа иерархий [8]. Например, можно установить, что транспортно-эксплуатационные показатели ( $R$ ) влияют на уровень опасности участка ( $D$ ), а погодные-климатические условия ( $W$ ) – как на транспортно-эксплуатационные показатели ( $R$ ), так и непосредственно на уровень опасности ( $D$ ).

На третьем этапе определяется сила влияния (веса) установленных связей. Для этого можно использовать шкалу от  $-1$  до  $1$ , где отрицательные значения означают обратную зависимость, а положительные – прямую. Например, улучшение транспортно-эксплуатационных показателей ( $R$ ) снижает уровень опасности ( $D$ ), поэтому вес этой связи будет отрицательным. Для определения весов можно использовать методы нечеткого оценивания [9].

На четвертом этапе строится когнитивная карта в виде ориентированного графа. Вершинами графа являются концепты, а дуги представляют причинно-следственные связи с соответствующими весами. Математически когнитивная карта может быть представлена в виде матрицы смежности  $W = [w_{ij}]$ , где  $w_{ij}$  – вес влияния концепта  $i$  на концепт  $j$ . Пример фрагмента когнитивной карты представлен на рисунке 2.

На пятом этапе проводятся верификация и валидация модели. Верификация включает проверку внутренней согласованности модели, отсутствия противоречий и полноты учета факторов. Валидация предполагает проверку соответствия модели реальным данным, например, путем сравнения результатов моделирования с историческими данными о ДТП на различных участках дорог [10].



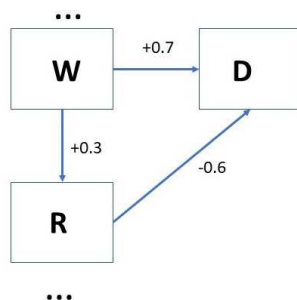


Рисунок 2. – Пример фрагмента когнитивной карты оценки опасности участка дороги

Для анализа разработанной когнитивной модели можно использовать методы импульсного моделирования и сценарного анализа. Импульсное моделирование позволяет оценить, как изменение одного или нескольких концептов повлияет на всю систему. Допустим, можно проанализировать, как улучшение состояния дорожного покрытия повлияет на общий уровень опасности участка.

Сценарный анализ позволяет рассмотреть различные варианты развития ситуации и оценить их последствия. Так, можно смоделировать сценарии изменения погодных условий или интенсивности движения и оценить их влияние на безопасность дорожного движения.

Разработанная когнитивная модель может быть использована для решения следующих задач:

- выявление наиболее критических факторов, влияющих на безопасность конкретного участка дороги;
- прогнозирование изменения уровня опасности при различных сценариях;
- оценка эффективности различных мероприятий по повышению безопасности дорожного движения;
- поддержка принятия решений при планировании дорожных работ и мероприятий по организации движения.

*Формализация факторов опасности с использованием нечетких множеств.* Для более точного учета неопределенности и субъективности экспертных оценок при анализе факторов опасности на загородных автодорогах целесообразно использовать аппарат теории нечетких множеств. Это позволяет формализовать лингвистические переменные и оперировать нечеткими понятиями, что особенно важно при оценке качественных характеристик дорожных условий.

Процесс формализации факторов опасности с использованием нечетких множеств включает следующие этапы:

1. Определение лингвистических переменных для каждого фактора опасности.
2. Задание терм-множеств для лингвистических переменных.
3. Построение функций принадлежности для каждого термина.
4. Определение правил нечеткого вывода.

Рассмотрим пример формализации фактора «Транспортно-эксплуатационные показатели» ( $R$ ):

1. Определяем лингвистическую переменную «Транспортно-эксплуатационные показатели» с областью определения  $[0, 10]$ , где 0 соответствует идеальному состоянию, а 10 – крайне неудовлетворительному.

2. Задаем терм-множество:  $T(R) = \{\text{«отличное»}, \text{«хорошее»}, \text{«удовлетворительное»}, \text{«плохое»}, \text{«критическое»}\}$ .

3. Строим функции принадлежности для каждого термина. В данном случае можно использовать трапециевидные функции принадлежности<sup>2</sup>:

$$\mu_{\text{отличное}}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } 0 \leq x \leq 1 \\ (2 - x)/1, & \text{если } 1 < x < 2 \\ 0, & \text{если } x \geq 2 \end{cases}$$

$$\mu_{\text{хорошее}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq 1 \text{ или } x \geq 4 \\ (x - 1)/1, & \text{если } 1 < x \leq 2 \\ 1, & \text{если } 2 < x \leq 3 \\ (4 - x)/1, & \text{если } 3 < x < 4 \end{cases}$$

... (аналогично для остальных термов)

<sup>2</sup> Zimmermann H. J. Fuzzy set theory – and its applications. – New York: Springer Science & Business Media, 2011. – URL: [https://kashanu.ac.ir/Files/Content/H\\_J\\_Zimmermann%20\(auth\\_\)%20Fuzzy%20Set%20Theory%20E2%80%94and%20Its%20Applications%202001.pdf](https://kashanu.ac.ir/Files/Content/H_J_Zimmermann%20(auth_)%20Fuzzy%20Set%20Theory%20E2%80%94and%20Its%20Applications%202001.pdf)

4. Определяем правила нечеткого вывода, например:

*ЕСЛИ транспортно-эксплуатационные показатели «отличные» ИЛИ «хорошие», ТО уровень опасности «низкий»*

*ЕСЛИ транспортно-эксплуатационные показатели «удовлетворительные», ТО уровень опасности «средний»*

*ЕСЛИ транспортно-эксплуатационные показатели «плохие» ИЛИ «критические», ТО уровень опасности «высокий».*

Аналогичным образом формализуются и другие факторы опасности, выделенные в когнитивной модели.

Для агрегирования различных факторов и получения интегральной оценки опасности участка дороги можно использовать операции над нечеткими множествами. Например, применить метод Мамдани [4] для нечеткого вывода:

1. Фаззификация входных переменных.
2. Применение нечетких правил (операции min для связки «И», max для «ИЛИ»).
3. Импликация (обычно используется операция min).
4. Агрегирование результатов применения всех правил (операция max).
5. Дефаззификация (например, методом центра тяжести).

Формула для дефаззификации методом центра тяжести

$$y^* = \frac{\int y^* \mu(y) dy}{\int \mu(y) dy},$$

где  $y^*$  – четкое значение выходной переменной;

$\mu(y)$  – функция принадлежности результирующего нечеткого множества.

Использование нечетких множеств в сочетании с когнитивным моделированием позволяет:

- учитывать неопределенность и субъективность экспертных оценок;
- оперировать качественными характеристиками дорожных условий;
- моделировать сложные нелинейные зависимости между факторами;
- получать интерпретируемые результаты в лингвистической форме.

В то же время при применении данного подхода имеются и сложности: необходимость тщательного подбора функций принадлежности и правил нечеткого вывода; вероятность возникновения проблемы размерности при большом количестве входных переменных; необходимость валидации модели на реальных данных.

Для преодоления этих ограничений можно использовать методы оптимизации нечетких систем, такие как генетические алгоритмы [12] или нейронечеткие системы типа ANFIS [14]. В целом формализация факторов опасности с использованием нечетких множеств позволяет создать гибкую и адаптивную модель оценки опасности участков загородных автомобильных дорог, способную учитывать сложные взаимосвязи между различными характеристиками дорожных условий и поведением участников движения.

*Алгоритм анализа и оценки рисков.* На основе разработанной когнитивной модели и формализации факторов опасности с использованием нечетких множеств предлагается следующий алгоритм анализа и оценки рисков для участков автомобильных дорог:

1. Сбор исходных данных.
2. Фаззификация входных переменных.
3. Активация нечетких правил.
4. Агрегирование результатов.
5. Анализ когнитивной карты.
6. Дефаззификация и интерпретация результатов.
7. Оценка чувствительности и устойчивости модели.

Рассмотрим каждый этап подробнее.

1. Сбор исходных данных.

На этом этапе производится сбор информации о характеристиках исследуемого участка дороги, включая геометрические параметры, состояние покрытия, интенсивность движения, статистику ДТП и другие релевантные данные. Используются как объективные измерения, так и экспертные оценки.

2. Фаззификация входных переменных.

Полученные данные преобразуются в нечеткие значения с использованием функций принадлежности, определенных на этапе формализации факторов опасности. Например, измеренная ширина проезжей части 7,2 м может быть преобразована в нечеткое значение «достаточная» с степенью принадлежности 0,8.

## 3. Активация нечетких правил.

На основе фаззифицированных входных данных активируются соответствующие нечеткие правила. Для каждого правила вычисляется степень его истинности с использованием операций нечеткой логики (например,  $\min$  для связки «И»,  $\max$  для «ИЛИ»)<sup>3</sup>.

## 4. Агрегирование результатов.

Результаты применения всех активированных правил объединяются для получения итогового нечеткого множества, характеризующего уровень опасности участка дороги. Обычно для этого используется операция  $\max$ .

## 5. Анализ когнитивной карты.

Проводится анализ взаимовлияний факторов с использованием методов импульсного моделирования [13]. Вычисляются изменения значений концептов при различных сценариях с использованием (1).

## 6. Дефаззификация и интерпретация результатов.

Полученное нечеткое множество, характеризующее уровень опасности, преобразуется в четкое значение с использованием метода дефаззификации (например, центра тяжести). Результат интерпретируется в терминах лингвистической шкалы опасности и сопоставляется с результатами анализа когнитивной карты.

## 7. Оценка чувствительности и устойчивости модели.

Анализируется чувствительность модели к изменениям входных параметров и весов связей в когнитивной карте. Для этого могут использоваться методы глобального анализа чувствительности, такие как метод Соболя<sup>4</sup>. Также оценивается устойчивость модели к небольшим возмущениям входных данных.

Формула для оценки индекса чувствительности первого порядка по методу Соболя

$$S_i = \frac{V[E(Y | X_i)]}{V(Y)},$$

где  $V[E(Y | X_i)]$  – дисперсия условного математического ожидания выхода  $Y$  при фиксированном входе  $X_i$ ;

$V(Y)$  – полная дисперсия выхода.

Предложенный алгоритм дает возможность проводить комплексную оценку опасности участков загородных автомобильных дорог с учетом и количественных, и качественных характеристик. Интеграция когнитивного моделирования и нечеткой логики обеспечивает гибкость подхода и возможность его адаптации к различным условиям.

*Программное обеспечение для реализации алгоритма оценки рисков.* Для практической реализации алгоритма целесообразно использовать специализированное программное обеспечение, которое предоставляет инструменты для работы с нечеткими системами и когнитивными картами. Среди наиболее известных программных продуктов можно назвать следующие:

1. Mental Modeler. Веб-инструмент для построения и анализа когнитивных карт. Позволяет создавать модели взаимосвязей между факторами, оценивать их влияние и проводить сценарный анализ.

2. FCMapper. Программное обеспечение для построения нечетких когнитивных карт (Fuzzy Cognitive Maps). Предоставляет возможности для моделирования сложных систем с учетом неопределенности и нечеткости взаимосвязей.

3. iThink & STELLA. Инструменты для системной динамики и когнитивного моделирования. Позволяют создавать визуальные модели, проводить симуляции и анализировать поведение систем во времени.

4. Pajek. Программа для анализа и визуализации больших сетей, включая социальные, информационные и биологические сети. Может применяться для изучения взаимосвязей в когнитивных моделях.

5. R с пакетами igraph и FCMapper. Язык программирования R предоставляет широкие возможности для когнитивного моделирования. Пакеты igraph и FCMapper дают возможность создавать, анализировать и визуализировать когнитивные карты.

6. CMAP Tools. Набор инструментов для построения концептуальных карт (concept maps), которые могут использоваться для представления знаний и моделирования когнитивных процессов.

7. Gephi. Открытая платформа для визуализации и исследования сетей, включая когнитивные модели. Предоставляет широкие возможности для анализа и визуального представления взаимосвязей.

8. Python с библиотеками NetworkX и FuzzyLib. Язык программирования Python также предоставляет инструменты для когнитивного моделирования. Библиотеки NetworkX и FuzzyLib позволяют создавать и анализировать когнитивные модели.

<sup>3</sup> Ross T. J. Fuzzy logic with engineering applications. John Wiley & Sons. – 2017. – URL: <https://home.iitk.ac.in/~avrs/ManyValuedLogic/FuzzyLogicforEngineers.pdf>

<sup>4</sup> Global sensitivity analysis: the primer / A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres et al. – John Wiley & Sons, 2008. – URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC40639>

Выбор конкретного программного средства зависит от специфики задачи, масштаба модели, требуемых функциональных возможностей и предпочтений пользователя. Некоторые из перечисленных инструментов имеют более специализированную направленность, в то время как другие предоставляют широкий спектр возможностей для когнитивного моделирования.

*Пример реализации алгоритма оценки рисков.* В качестве примера рассмотрим реализацию алгоритма оценки риска с помощью инструмента когнитивного моделирования Mental Modeler<sup>5</sup>.

Этот веб-инструмент реализован в виде нескольких интерфейсных окон. Первый и основной интерфейс отображения концепций позволяет пользователям наполнять концептуальное виртуальное пространство компонентами, которые составляют рассматриваемую систему. При создании нечеткой когнитивной карты важно определить компоненты, их способность увеличиваться или уменьшаться, а также уровень влияния при связывании с другими компонентами. После того как концепции в модели определены, отношения между концепциями можно добавить с помощью стрелок, направления которых указывают влияние одного компонента на другой. Уровень влияния может быть любым от +1 (по мере того, как один компонент увеличивается, другой компонент значительно увеличивается) до -1 (по мере того, как один компонент увеличивается, другой компонент значительно уменьшается). Отношения и нечеткие веса между переменными добавляются для представления структурных связей между понятиями в модели.

Mental Modeler позволяет рассматривать как упрощенную когнитивную модель, включающую только основные концепции, так и более сложную, когда каждая из концепций детализирована до конкретных показателей. В этом случае количество связей в модели может существенно вырасти. Пример упрощенной карты представлен на рисунке 3.

На рисунке 4 представлена детализированная когнитивная модель, построенная в соответствии с рисунком 1. Видно, что появляются связи между отдельными показателями, причем относящимися к разным концепциям.

Mental Modeler также включает интерфейс Matrix (рисунок 5). В матричном интерфейсе перечислены все концепции, включенные в модель. Этот интерфейс представляет собой другое представление концептуальной модели в форме, необходимой для последующего использования в интерфейсе «Сценарий». Интерфейс Matrix можно легко пересмотреть на основе исходной концептуальной карты.

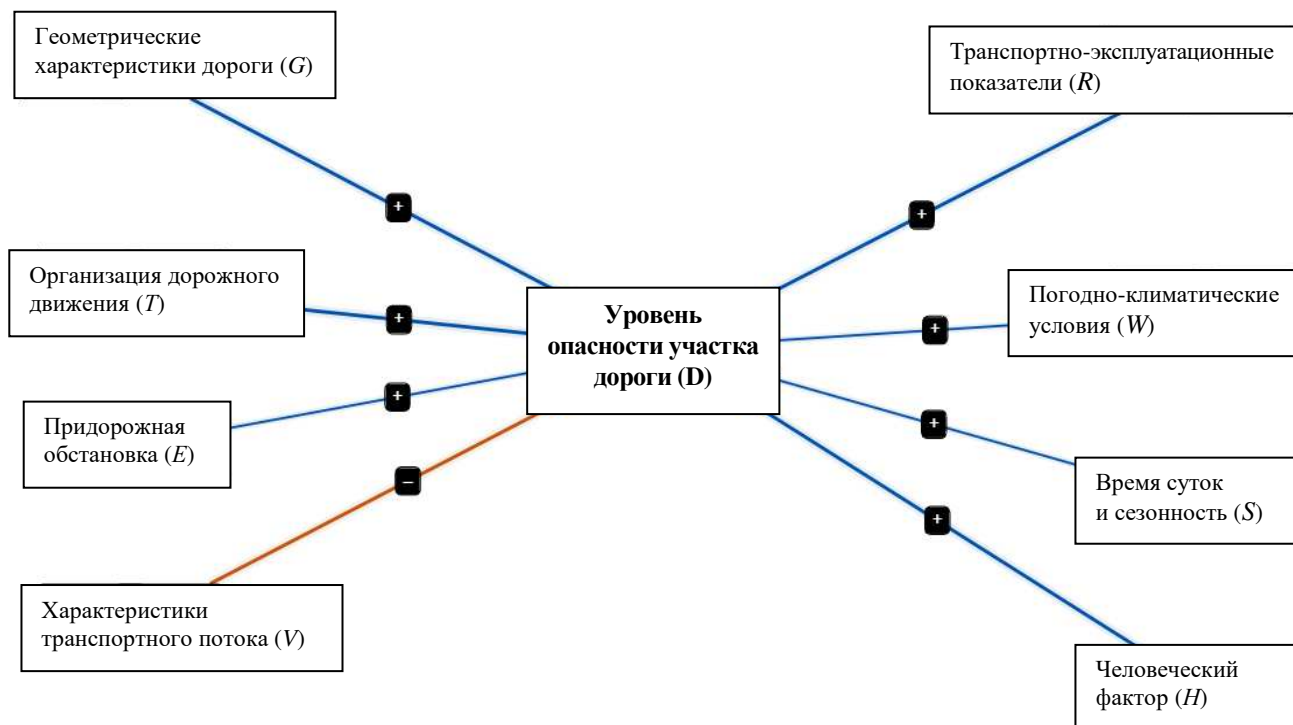


Рисунок 3. – Пример упрощенной когнитивной карты оценки опасности участка дороги

<sup>5</sup> Mental Modeler – Fuzzy Logic Cognitive Mapping // MentalModeler. – URL: <https://www.mentalmodeler.com/>

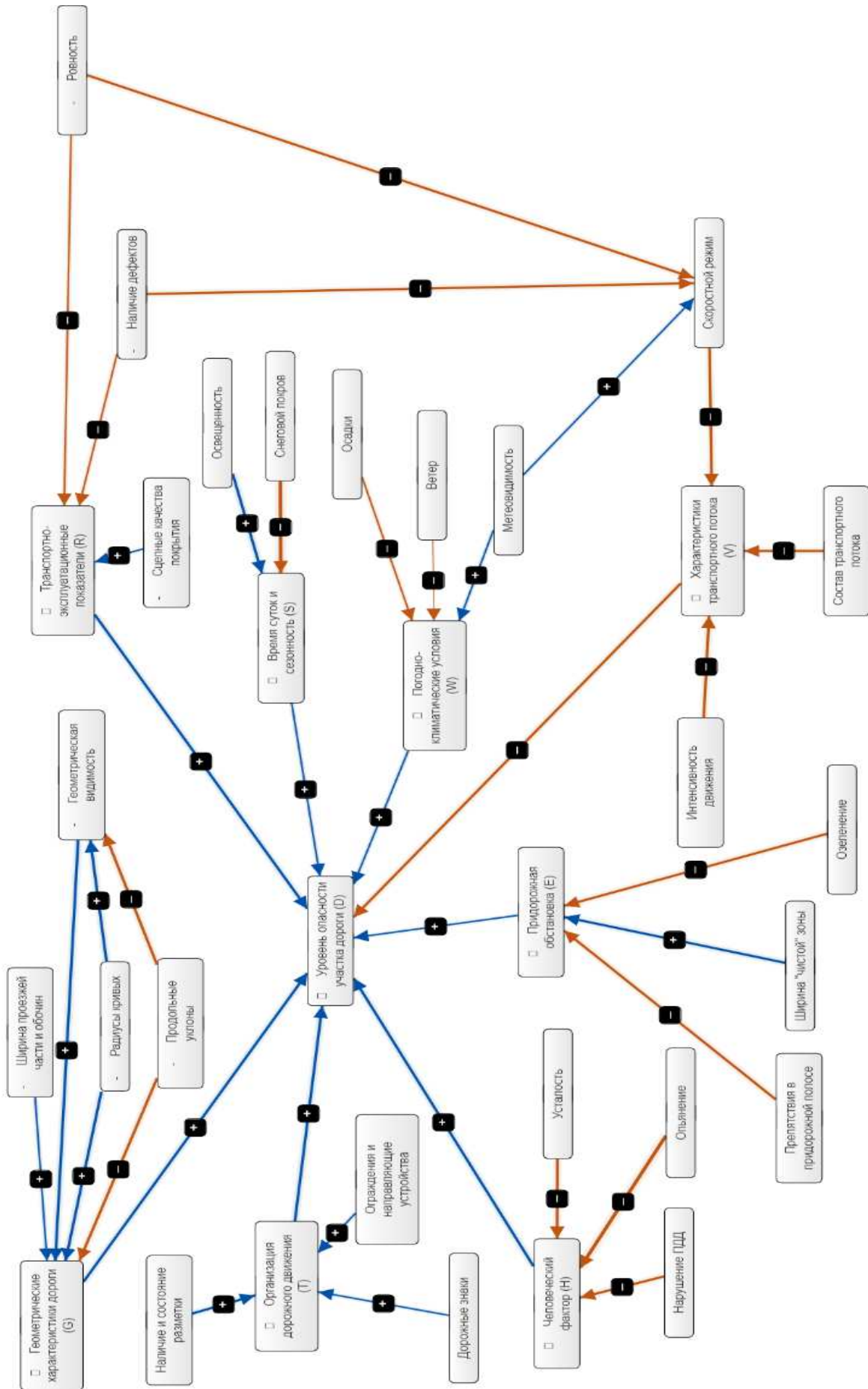


Рисунок 4. – Пример детализированной когнитивной карты оценки опасности участка дороги

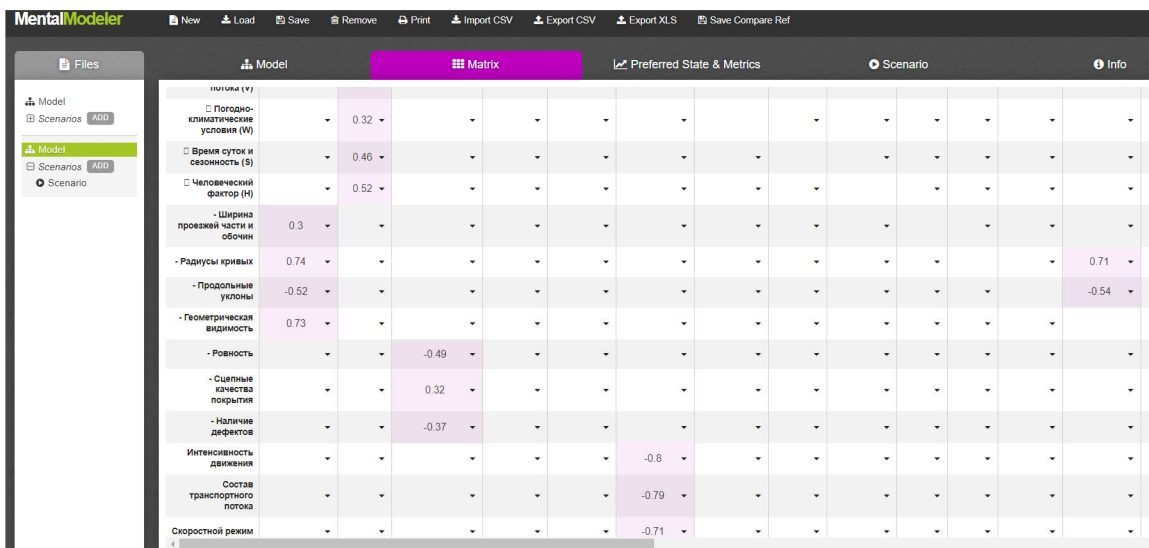


Рисунок 5. – Пример интерфейсного окна «Matrix»

Третий интерфейс для когнитивного моделирования – это интерфейс сценария, в котором можно запускать и сравнивать искусственные сценарии. Здесь имеется возможность указать величину относительных изменений в компонентах, включенных в модель, на основе заданных весов связей, определенных в интерфейсе отображения концепций в соответствии с выбранным сценарием. Можно решить, какой сценарий запустить, исходя из вероятных, маловероятных, постепенных и экстремальных изменений в системе. Для запуска сценария каждой переменной можно установить значение от -1 (сильное отрицательное изменение компонента) до +1 (сильное положительное изменение компонента). Относительные изменения в системе отображаются в виде гистограммы, показывающей степень относительного изменения для каждого компонента, включенного в модель, в соответствии со сценарием.

Например, для модели, представленной на рисунке 4, при изменении компонентов «освещенность», «ширина “чистой” зоны» и «озеленение» произойдет относительное ухудшение факторов «придорожная обстановка» на 0,18, «время суток и сезонность» – на 0,17, что приведет к относительному ухудшению уровня опасности участка дороги на 0,02 (рисунок 6).

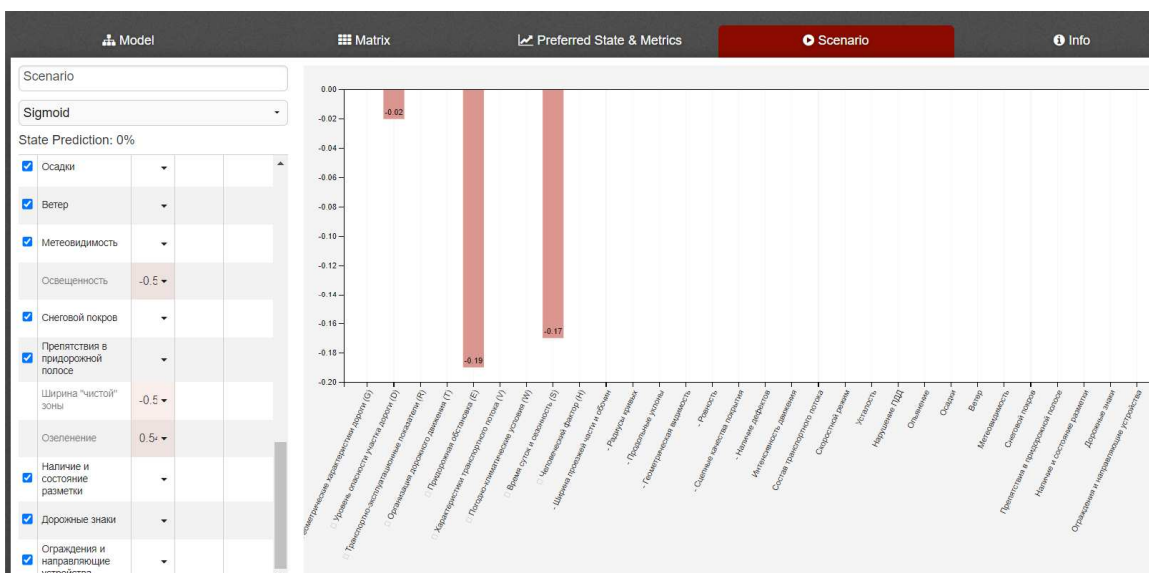


Рисунок 6. – Пример интерфейсного окна сценариев

По сравнению с классическими методами оценки опасности участков автомобильных дорог предлагаемый метод, основанный на интеграции когнитивного моделирования и нечеткой логики, имеет ряд преимуществ.

Достаточно часто для оценки опасности дорожных участков используются статистические методы, основанные на анализе данных о ДТП за определенный период времени. К числу наиболее распространенных показателей относятся коэффициент относительной аварийности (число ДТП на 1 млн автомобиле-кило-

метров), коэффициент тяжести ДТП (число погибших на 100 пострадавших), индекс опасности (комбинированный показатель, учитывающий число и тяжесть ДТП).

Преимущества предложенного метода: возможность прогнозирования потенциальной опасности участков без статистики ДТП; учет взаимосвязей между различными факторами риска; возможность моделирования сценариев изменения условий.

Предлагаемый метод имеет преимущества также по сравнению с методом коэффициентов аварийности, или методикой IRAP, поскольку позволяет осуществлять учет нелинейных взаимодействий между факторами, дает возможность включения качественных экспертных оценок, отличается адаптивностью модели к изменяющимся условиям.

Следует, однако, отметить, что предложенный метод требует более сложной подготовки исходных данных и настройки модели, что может ограничивать его применение в некоторых ситуациях. Кроме того, интерпретация результатов когнитивного моделирования может быть менее интуитивно понятной для неспециалистов по сравнению с простыми статистическими показателями.

Несмотря на несомненные преимущества, предложенный подход к оценке опасности участков автомобильных дорог на основе интеграции когнитивного моделирования и нечеткой логики имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при его практическом применении. К числу ограничений метода относятся:

– субъективность при построении когнитивной карты и определении весов связей между концептами. Хотя использование экспертных оценок позволяет учесть неформализуемые знания, оно также вносит элемент субъективности в модель;

– сложность учета динамических изменений дорожной обстановки. Предложенная модель пока ориентирована на статическую оценку опасности участков дорог и может не в полной мере отражать изменения, происходящие в реальном времени;

– потенциальная вычислительная сложность при анализе больших дорожных сетей;

– необходимость регулярной актуализации модели. Изменения в нормативной базе, технологиях дорожного строительства и содержания дорог, поведении участников движения требуют постоянного обновления когнитивной карты и правил нечеткого вывода;

– сложность интерпретации результатов для неспециалистов. Когнитивные карты и нечеткие множества могут быть не всегда интуитивно понятны для лиц, принимающих решения в области безопасности дорожной инфраструктуры.

В то же время эти ограничения открывают перспективы для дальнейшего развития и совершенствования метода:

– интеграция с геоинформационными системами (ГИС). Объединение разработанного подхода с ГИС-технологиями позволит создать интерактивные карты опасности дорожной сети и улучшить визуализацию результатов анализа;

– применение методов машинного обучения для автоматической настройки параметров модели. Использование алгоритмов оптимизации, таких как генетические алгоритмы или градиентный бустинг, может помочь в автоматическом определении весов связей и функций принадлежности нечетких множеств;

– разработка динамических когнитивных карт. Внедрение механизмов адаптации когнитивной карты к изменяющимся условиям позволит более точно моделировать динамику дорожной ситуации [14];

– интеграция с системами мониторинга дорожного движения в реальном времени. Использование данных с дорожных датчиков, камер и подключенных транспортных средств позволит повысить точность и актуальность оценок опасности [15];

– применение методов анализа больших данных для выявления скрытых закономерностей в дорожно-транспортных происшествиях. Использование технологий Big Data может помочь в обнаружении неочевидных факторов риска и их взаимосвязей [16].

Реализация этих перспективных направлений позволит преодолеть существующие ограничения и создать более совершенный инструмент для оценки и прогнозирования опасности участков загородных автомобильных дорог. Это, в свою очередь, будет способствовать повышению эффективности мероприятий по обеспечению безопасности дорожного движения и снижению числа ДТП.

**Заключение.** В рамках данного исследования был предложен подход к оценке опасности участков загородных автомобильных дорог, основанный на интеграции методов когнитивного моделирования и нечеткой логики. Проведенная работа позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Применение когнитивного моделирования в сочетании с аппаратом нечеткой логики обеспечивает более комплексный и гибкий подход к анализу факторов, влияющих на безопасность дорожного движения, по сравнению с традиционными методами оценки.

2. Разработанный методика позволяет учитывать как количественные, так и качественные характеристики дорожных условий, а также моделировать сложные взаимосвязи между различными факторами риска.

3. Интеграция разработанного подхода с геоинформационными системами и технологиями мониторинга дорожного движения в реальном времени открывает новые возможности для повышения эффективности управления дорожной безопасностью.

4. Несмотря на ряд ограничений, связанных с субъективностью экспертных оценок и вычислительной сложностью, предложенный метод имеет значительный потенциал для дальнейшего развития и совершенствования.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанной методики для выявления потенциально опасных участков дорог на этапе проектирования дорог, оптимизации мероприятий по повышению безопасности дорожного движения на существующих автомобильных дорогах, прогнозирования изменений уровня опасности при различных сценариях развития дорожной ситуации, поддержки принятия решений в области управления дорожной инфраструктурой.

Перспективы дальнейших исследований в данном направлении включают:

1. Уточнение количества факторов, входящих в модель и значений весов связей.
2. Разработку когнитивных моделей для отдельных сложных участков, например, пересечений автомобильных дорог.
3. Разработку динамических когнитивных карт, способных адаптироваться к изменяющимся условиям дорожного движения.
4. Применение методов машинного обучения для автоматической настройки параметров модели.

В целом проведенное исследование демонстрирует перспективность применения методов когнитивного моделирования и нечеткой логики в задачах оценки безопасности дорожного движения. Дальнейшее развитие и внедрение предложенного подхода может внести существенный вклад в повышение безопасности на автомобильных дорогах и снижение числа дорожно-транспортных происшествий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kosko B. Fuzzy cognitive maps // *International Journal of Man-Machine Studies*. – 1986. – № 24(1). – P. 65–75. DOI: 10.1016/S0020-7373(86)80040-2
2. Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам / пер. с англ. А.М. Раппопорта, С.И. Травкина; под ред. А.И. Теймана. – М.: Наука, 1986. – 496 с.
3. Zadeh L.A. Fuzzy sets // *Information and Control*. – 1965. – № 8(3). – P. 338–353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X
4. Mamdani E.H., Assilian, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // *International Journal of Man-Machine Studies*. – 1975. – № 7(1). – P. 1–13. DOI: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2
5. Hauer E. Speed and safety // *Transportation Research Record*. – 2009. – № 2103(1). – P. 10–17. DOI: 10.3141/2103-02
6. Shankar V., Mannering F., Barfield W. (1995). Effect of roadway geometrics and environmental factors on rural freeway accident frequencies // *Accident Analysis & Prevention*. – 1995. – № 27(3). – P. 371–389. DOI: 10.1016/0001-4575(94)00078-Z
7. Bağdatlı Muhammed Emin Cihangir, Akbıyıklı Rıfat, Papageorgiou Elpiniki I. A Fuzzy Cognitive Map Approach Applied in Cost–Benefit Analysis for Highway Projects // *International Journal of Fuzzy Systems*. – 2016. – Vol. 19. – P. 1512–1527. DOI: 10.1007/s40815-016-0252-3
8. Saaty T.L. Decision making with the analytic hierarchy process // *International Journal of Services Sciences*. – 2008. – № 1(1). – P. 83–98. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590
9. Predrycz Witold, Ekel Petr, Parreiras Roberta. Fuzzy Multicriteria Decision-Making: Models, Methods and Applications // *ResearchGate*. – 2011. DOI: 10.1002/978-0-470-97403-2.
10. Papageorgiou E.I., Salmeron J.L. A review of fuzzy cognitive maps research during the last decade // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. – 2013. – № 21(1). – P. 66–79. DOI: 10.1109/TFUZZ.2012.2201727
11. Cordon O. A historical review of evolutionary learning methods for Mamdani-type fuzzy rule-based systems: Designing interpretable genetic fuzzy systems // *International Journal of Approximate Reasoning*. – 2011. – № 52(6). – P. 894–913. DOI: 10.1016/j.ijar.2011.03.004
12. Jang J.S. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. – 1993. – № 23(3). – P. 665–685. DOI: 10.1109/21.256541
13. Groumpos P.P. Fuzzy cognitive maps: Basic theories and their application to complex systems. In *Fuzzy cognitive maps (1–22)*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-03220-2\_1
14. Dynamical cognitive network – an extension of fuzzy cognitive map / Y. Miao, Z.Q. Liu, C.K. Siew et al. // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. – 2001. – № 9(5). – P. 768–777. DOI: 10.1109/91.963762
15. Guerrero-Ibáñez J., Zeadally S., Contreras-Castillo J. Sensor technologies for intelligent transportation systems // *Sensors*. – 2018. – № 18(4). 1212. doi.org/10.3390/s18041212
16. Shi Q., Abdel-Aty M. Big data applications in real-time traffic operation and safety monitoring and improvement on urban expressways // *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*. – 2015. – № 58. – P. 380–394. DOI: 10.1016/j.trc.2015.02.022

#### REFERENCES

1. Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, 24(1), 65–75. DOI: 10.1016/S0020-7373(86)80040-2
2. Roberts, F.S. (1986). *Diskretnye matematicheskie modeli s prilozheniyami k sotsial'nym, biologicheskim i ekologicheskim zadacham*. Moscow: Nauka. (In Russ.)
3. Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X
4. Mamdani, E.H. & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), 1–13. DOI: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2



5. Hauer, E. (2009). Speed and safety. *Transportation Research Record*, 2103(1), 10–17. DOI: 10.3141/2103-02
6. Shankar, V., Mannering, F. & Barfield, W. (1995). Effect of roadway geometrics and environmental factors on rural freeway accident frequencies. *Accident Analysis & Prevention*, 27(3), 371–389. DOI: 10.1016/0001-4575(94)00078-Z
7. Bağdatlı Muhammed Emin Cihangir, Akbıyıklı, Rifat & Papageorgiou, Elpiniki I. (2016). A Fuzzy Cognitive Map Approach Applied in Cost–Benefit Analysis for Highway Projects. *International Journal of Fuzzy Systems*, (19), 1512–1527. DOI: 10.1007/s40815-016-0252-3
8. Saaty, T.L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590
9. Predrycz, W., Ekel, P. & Parreiras, R. (2011). Fuzzy Multicriteria Decision-Making: Models, Methods and Applications. *ResearchGate*. DOI: 10.1002/978-0-470-97403-2
10. Papageorgiou, E.I. & Salmeron, J.L. (2013). A review of fuzzy cognitive maps research during the last decade. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 21(1), 66–79. DOI: 10.1109/TFUZZ.2012.2201727
11. Cordón, O. (2011). A historical review of evolutionary learning methods for Mamdani-type fuzzy rule-based systems: Designing interpretable genetic fuzzy systems. *International Journal of Approximate Reasoning*, 52(6), 894–913. DOI: 10.1016/j.ijar.2011.03.004
12. Jang, J.S. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23(3), 665–685. DOI: 10.1109/21.256541
13. Groumpos, P.P. (2010). Fuzzy cognitive maps: Basic theories and their application to complex systems. In *Fuzzy cognitive maps* (1–22). DOI: 10.1007/978-3-642-03220-2\_1 Berlin; Heidelberg: Springer.
14. Miao, Y., Liu, Z.Q., Siew, C.K. & Miao, C.Y. (2001). Dynamical cognitive network – an extension of fuzzy cognitive map. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 9(5), 760–770. DOI: 10.1109/91.963762
15. Guerrero-Ibáñez, J., Zeadally, S. & Contreras-Castillo, J. (2018). Sensor technologies for intelligent transportation systems. *Sensors*, 18(4), 1212. DOI: 10.3390/s18041212
16. Shi, Q. & Abdel-Aty, M. (2015). Big data applications in real-time traffic operation and safety monitoring and improvement on urban expressways. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*, (58), 380–394. DOI: 10.1016/j.trc.2015.02.022

Поступила 17.06.2024

## INTEGRATION OF COGNITIVE ANALYSIS METHODS INTO THE ROAD INFRASTRUCTURE SAFETY ASSESSMENT SYSTEM

**D. KAPSKI, S. BOGDANOVICH**  
(Belarusian National Technical University, Minsk)

*This article presents an innovative approach to assessing the hazard levels of rural road sections, based on the integration of cognitive modeling methods and fuzzy logic. The authors propose a comprehensive methodology that allows for the consideration of a wide range of both quantitative and qualitative characteristics of road conditions, as well as modeling complex non-linear relationships between various risk factors. The developed approach includes several key stages: construction of a detailed cognitive map reflecting the structure of relationships between safety factors, formalization of hazard factors using fuzzy set theory, and a risk analysis algorithm based on impulse modeling. The article also suggests promising directions for further research, including integration of the developed approach with geographic information systems, application of machine learning methods for automatic model parameter tuning, and development of dynamic cognitive maps capable of adapting to changing conditions in real-time.*

**Keywords:** road safety, cognitive modeling, fuzzy logic, risk assessment, highways, accident prediction.

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ДВИЖЕНИЯ МАРШРУТНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА В ГОРОДЕ ХУХ-ХОТО, КНР

ЛЮ ЮЙВЭЙ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Приведены результаты исследований условий движения безрельсовых маршрутных пассажирских транспортных средств, а также условий посадки/высадки пассажиров и типизация остановочных пунктов, расположенных на магистральной транспортной сети города Хух-Хото. Некоторые параметры характеризуют качество предоставляемых транспортных услуг (скорость, пассажиропоток, подача автобуса пассажирам вовремя и пр.). Даны рекомендации по повышению качества движения и условий движения маршрутного пассажирского транспорта, особенно в часы пик.

**Ключевые слова:** безрельсовый маршрутный пассажирский транспорт, транспортное средство, транспортная система, час пик, пассажиропоток.

**Введение.** Общая площадь Хух-Хото составляет 17 200 кв.км, из них городская площадь – 2 065 кв.км (рисунок 1)<sup>1</sup>. Постоянное население<sup>2</sup> – 3,6041 млн чел.<sup>3</sup> Общая протяженность дорог<sup>2</sup> города Хух-Хото – 8 635 км, в т.ч. 1519,278 км магистральных дорог республиканского и областного значений и 7007,521 км сельских дорог (рисунок 2). Плотность сети автомобильных дорог города – 50,2 км на 100 кв. км.<sup>4</sup>



Рисунок 1. – Административная карта города Хух-Хото

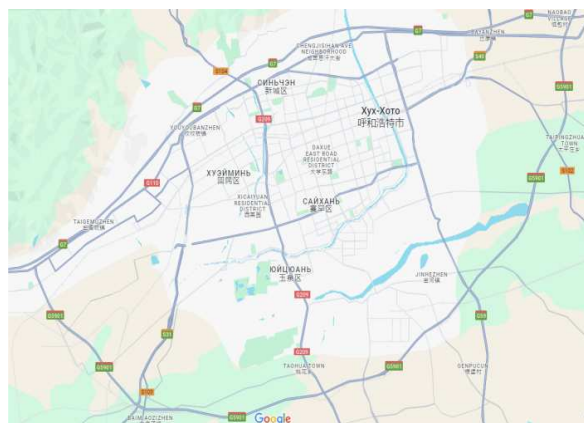


Рисунок 2. – Центр городского района Хух-Хото

<sup>1</sup> 行政区划\_呼和浩特市人民政府 (huhhot.gov.cn). – URL: <http://www.huhhot.gov.cn/>

<sup>2</sup> По состоянию на конец 2023 г.

<sup>3</sup> 2023年呼和浩特市常住人口主要数据公报\_呼和浩特市人民政府 (huhhot.gov.cn). – URL: [http://www.huhhot.gov.cn/2022\\_sj/f/2022\\_tjgb/202404/t20240415\\_1686041.html](http://www.huhhot.gov.cn/2022_sj/f/2022_tjgb/202404/t20240415_1686041.html)

<sup>4</sup> 呼和浩特市交通运输局 (huhhot.gov.cn). – URL: <http://jtsyj.huhhot.gov.cn/glgk/>

**Основная часть.** Пассажиропоток (рисунок 3), средняя скорость (рисунок 4), уровень пунктуальности прибытия (рисунок 5) маршрутного пассажирского транспортного средства (МПТС), включая автобусы, получены путем проведения исследований в утренние и вечерние часы пик в 2023 г.<sup>5</sup>

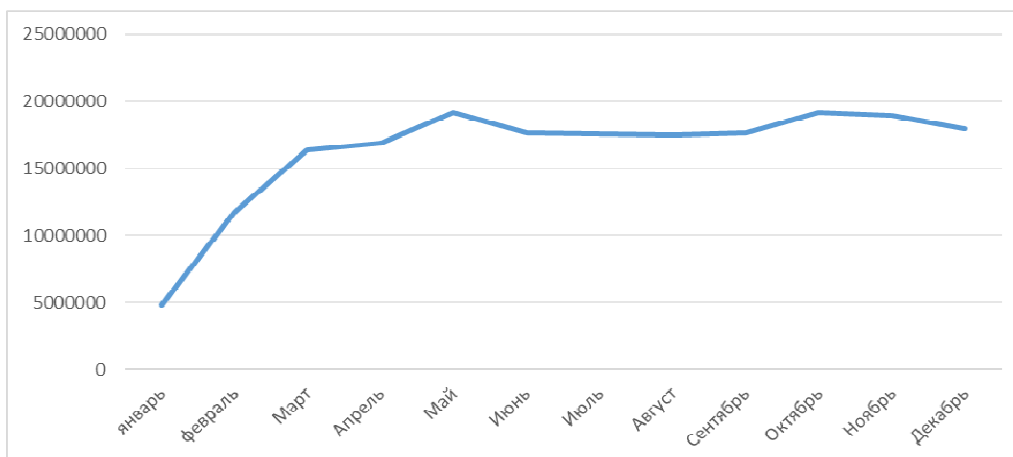


Рисунок 3. – Пассажиропоток (чел./ч)

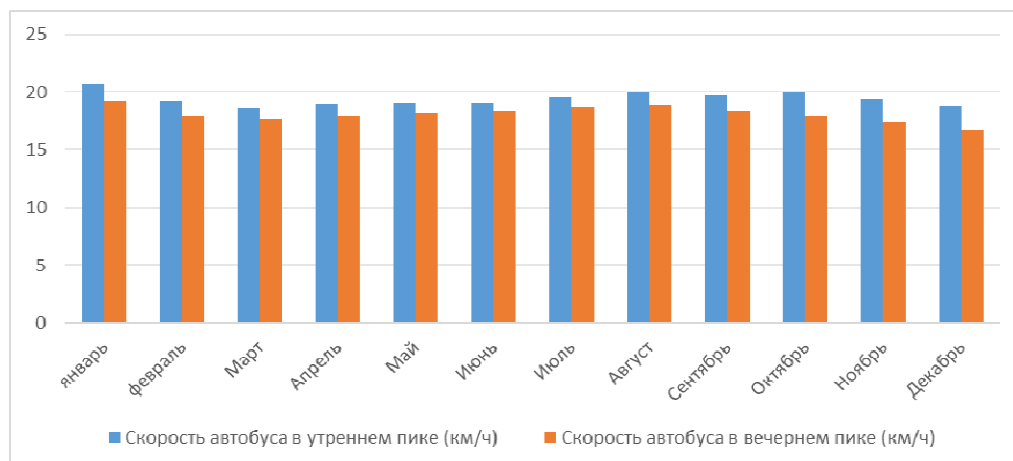


Рисунок 4. – Скорость МПТС в утреннем и вечернем пиках (км/ч)

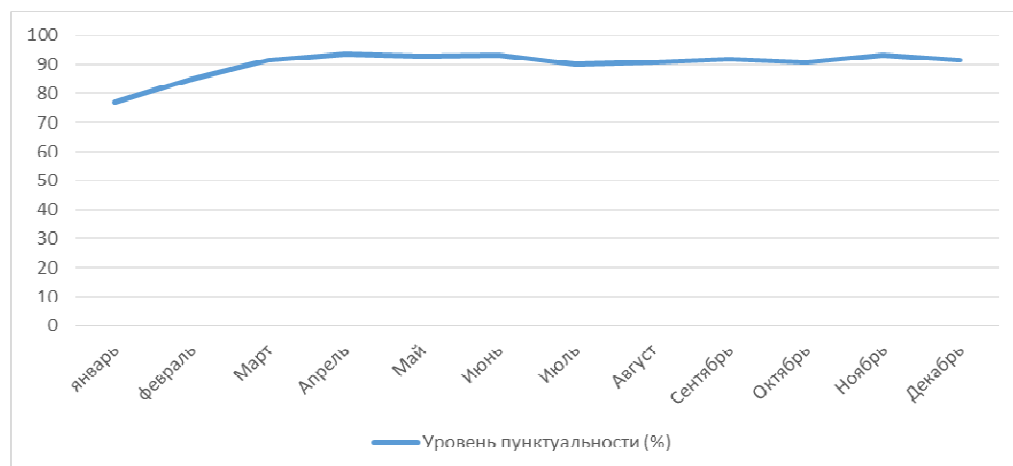


Рисунок 5. – Уровень пунктуальности прибытия МПТС

<sup>5</sup> URL: [http://jtysj.huhhot.gov.cn/ztzl/gjdsdtpg/202307/t20230714\\_1557326.html](http://jtysj.huhhot.gov.cn/ztzl/gjdsdtpg/202307/t20230714_1557326.html)

По итогам 2023 г. количество автомобилей в городе составило 1,456 млн, что на 71 тыс. автомобилей больше, чем в предыдущем году. Среди них легковых – 1,337 млн автомобилей (увеличилось на 73 000)<sup>6</sup>. В городе насчитывалось 2792 действующих транспортных средства, 224 действующих линии и 6 выделенных полос для автобусов (рисунок 6). Среди автобусных полос прямые остановки составляют 70%, карманные – 30%.

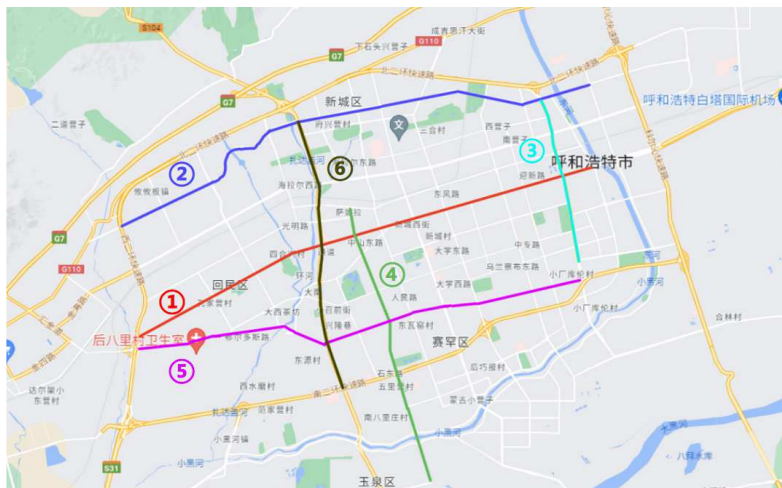


Рисунок 6. – Дислокация выделенных полос для МПТ

Некоторые параметры, характеризующие ситуацию с пробками в период вечернего пика в каждом административном районе, представлены в таблице и на рисунке 7.

Таблица. – Рейтинг пробок в вечерние часы наибольшей нагрузки

Рейтинг	Название административного района	Индекс пробок на дорогах	Средняя скорость, км/ч
01	Синьчэн район	2,791	20,98
02	Сайхан район	2,493	22,69
03	Юйцзоань район	1,972	28,92
04	Хуйминь район	1,806	31,85
05	Тумэд-цзоци	1,228	63,64
06	Учуань уезд	1,115	62,62
07	Хорингэр уезд	1,109	70,41
08	Тогто уезд	1,107	74,35
09	Уезд Циншуйхэ	0,985	76,73

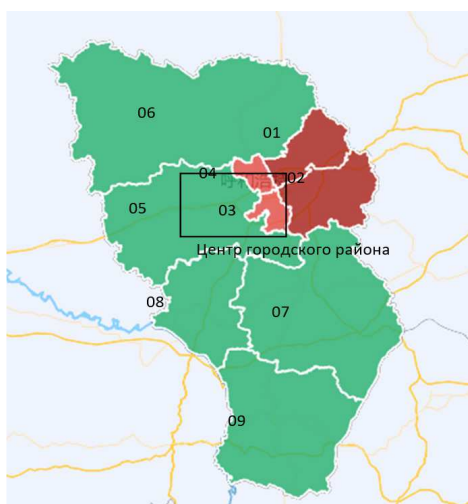


Рисунок 7. – Рейтинг пробок в вечерние часы наибольшей нагрузки

<sup>6</sup> 呼和浩特市2023年国民经济和社会发展统计公报\_呼和浩特市国防动员办公室 (huhhot.gov.cn). – URL: [http://gdb.huhhot.gov.cn/zwdt/rdxw/202404/t20240412\\_1685273.html](http://gdb.huhhot.gov.cn/zwdt/rdxw/202404/t20240412_1685273.html)

Типы расположения автобусных полос и остановок в зависимости от условий движения представлен на рисунках 8–12.

В случае примыкания автобусной полосы к велосипедной используется стандартная остановка и заездной карман соответственно, как показано на рисунках 8 и 9. Если автобусная полоса отделена от велосипедной, то используются как стандартные остановки, так и оснащенные заездным карманом (с уширением проезжей части) (рисунки 10–12).



Рисунок 8. – Остановочный пункт без уширения при наличии велосипедной полосы

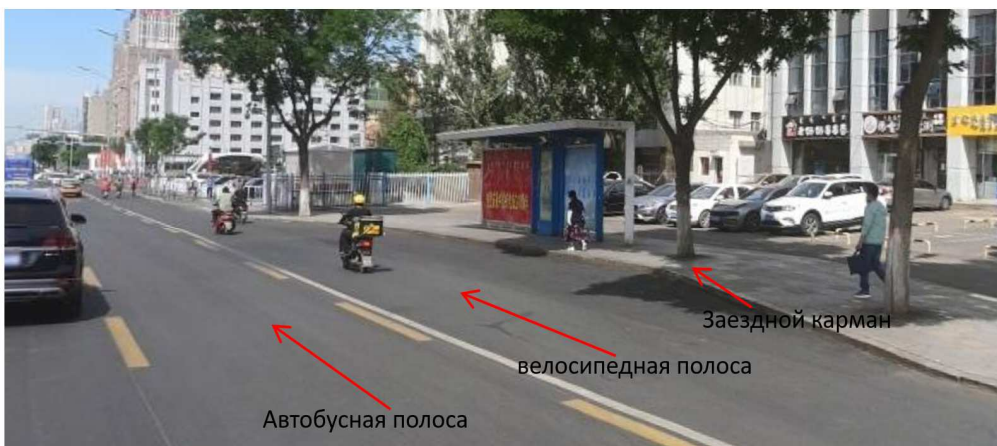


Рисунок 9. – Остановочный пункт с уширением при наличии велосипедной полосы



Рисунок 10. – Остановочный пункт без уширения (кармана)



Рисунок 11. – Остановочный пункт с уширением (заездным карманом)



Рисунок 12. – Остановочный пункт «закрытого» вида с уширением

Необходимо отметить, что выбор вида остановочного пункта зависит от условий движения и уровня объекта в транспортной сети, а правильный выбор повышает качество транспортного обслуживания [1–5].

Для сбора данных была выбрана автобусная остановка возле пересечения улицы Синьхуа и улицы Дворца культуры (рисунок 13). Через этот участок проходят 8 автобусных маршрутов. Автобусная остановка имеет длину 38 м и находится в 87 м от перекрестка. Форма остановки аналогична представленной на рисунке 12.



Рисунок 13. – Вид и расположение исследуемого остановочного пункта

Среди восьми линий пассажирская линия № 303 имеет длину 20,5 км и большой пролет. Это основная линия для въезда людей в город. Кроме того, на пути много пересадочных станций, поэтому количество пассажиров будет только увеличиваться. На этой линии 18 транспортных средств (28 автомобилей в пиковые праздничные дни) с интервалом отправления 8–10 мин, а весь путь по маршруту занимает около 90 мин. Характери-

стики используемого МПТС: электрический автобус длиной 12 м имеет 34 сиденья и может перевозить 82 человека (рисунок 14).



Рисунок 14. – Автобус № 303 и его маршрут

На рисунках 15–18 представлены диаграммы нахождения автобусов на остановочном пункте.

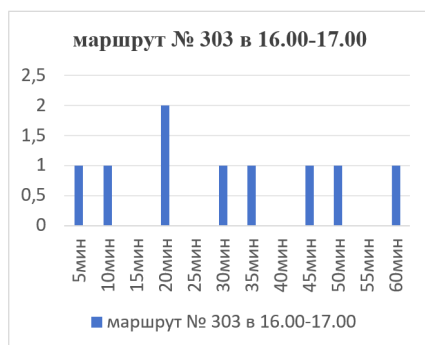


Рисунок 15

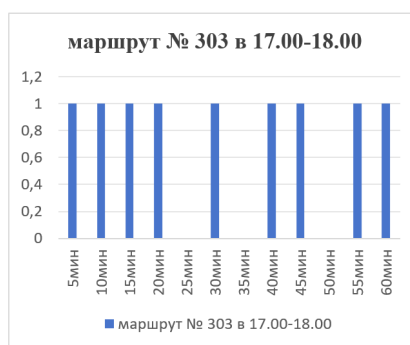


Рисунок 16

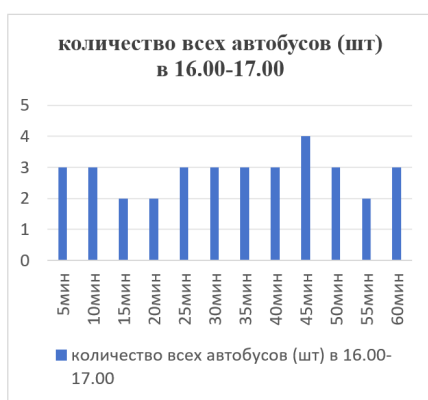


Рисунок 17



Рисунок 18

**Закключение.** Исследование условий дорожного движения в Хух-Хото и типов автобусных остановок на выделенных автобусных полосах позволило установить:

- часть из них примыкает к велосипедной полосе, а часть отделена от нее. При этом большинство остановочных пунктов обустроены с уширением (с заездными карманами), когда это позволяют параметры дороги (нестесненные условия устройства остановочных пунктов). При стесненных условиях автобусные остановки располагаются прямо на выделенной для движения МПТС полосе;

- во внепиковый период количество транспортных средств, въезжающих на остановку, относительно стабильно. В пиковый период автобусы заезжают на остановочный пункт вместе либо один за другим, и возникает ситуация ожидания. Установлено, что среднее время, необходимое пассажирам для посадки и выхода из автобуса, составляет 36 с в непиковые периоды и 65 с в пиковые;

– одновременно на заездном кармане находились (прибыло) максимум 6 автобусов;  
 – движение по велосипедной дорожке также оказывает определенное влияние на условия движения автобусов и условия посадки/высадки пассажиров. Водители на велосипедной полосе в зоне остановочного пункта при возможности ее объезда в случае занятости автобусом отказываются от маневра и предпочитают продолжать транзитное, прямое движение, что ухудшает условия движения МПТС и пассажиров (пассажиры при посадке/высадке конфликтуют с велосипедистами).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Юйвей Лю, Скирковский С.В., Капский Д.В. Проблемы размещения выделенных полос для маршрутного пассажирского транспорта // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа–БелГУТа / Гомель (16–17 нояб. 2023 г.) – Гомель: Белорус. гос. ун-т транспорта, 2023. – С. 251–252.
2. Капский Д.В., Скирковский С.В., Лю Юйвей. Анализ условий размещения остановочных пунктов на магистральной сети крупнейшего симбиотического города // Мир транспорта и технол машин. – 2023. – № 1-2(80). – С. 28–36. DOI 10.33979/2073-7432-2023-2(80)-1-28-36
3. Юйвей Лю, Капский Д.В. Обустройство остановочных пунктов маршрутного пассажирского транспорта в Китае // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. / Липецк (20–21 апр. 2022 г.). – Липецк: Липец. гос. техн. ун-т, 2022. – С. 163–170.
4. Юйвей Лю, Капский Д.В. Исследования нормативного обеспечения размещения остановочных пунктов для маршрутного пассажирского транспорта на магистральной сети в транспортной системе // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. / Минск (24 мая 2022 г.). – Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2022. – С. 40–44.
5. Капский Д.В., Юйвей Лю. Анализ принципов расположения остановочных пунктов безрельсового городского маршрутного пассажирского транспорта // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. Т. II / Тюмень (21 апр. 2022 г.). – Тюмень: Тюмен. индустр. ун-т, 2022. – С. 43–49.

## REFERENCES

1. Yuivei, L., Skirkovskii, S.V. & Kapskii, D.V. (2023). Problemy razmeshcheniya vydelennykh polos dlya marshrutnogo passazhirskogo transporta. *Innovatsionnoe razvitie transportnogo i stroitel'nogo kompleksov: Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 70-letiyu BelIIZhTa BelGUTa, Gomel', 16–17 noyabrya 2023 g.* (251–252). Gomel': Belorusskii gosudarstvennyi universitet transporta. (In Russ.)
2. Kapskii, D.V., Skirkovskii, S.V. & Lyu, Yuivei. (2023). Analiz uslovii razmeshcheniya ostanovochnykh punktov na magistral'noi seti krupneishego simbioticheskogo goroda [Analysis of the Conditions for the Placement of Stopping Points on the Backbone Network of the Largest Symbiotic City]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin [World of Transport and Technological Machines]*, 1-2(80), 28–36. DOI 10.33979/2073-7432-2023-2(80)-1-28-36 (In Russ., abstr. in Engl.)
3. Lyu, Yuivei. & Kapskii, D.V. (2022). Obustroistvo ostanovochnykh punktov marshrutnogo passazhirskogo transporta v Kitae. *Infokommunikatsionnye i intellektual'nye tekhnologii na transporte: sbornik statei mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Lipetsk, 20–21 aprelya 2022 g.* (163–170). Lipetsk: Lipetskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. (In Russ.)
4. Lyu, Yuivei. & Kapskii, D.V. (2022). Issledovaniya normativnogo obespecheniya razmeshcheniya ostanovochnykh punktov dlya marshrutnogo passazhirskogo transporta na magistral'noi seti v transportnoi sisteme. *Avtotektorostroenie i avtomobil'nyi transport: Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. V 2 t., Minsk, 24 maya 2022 g.* (40–44). Minsk: Belorusskii natsional'nyi tekhnicheskii universite. (In Russ.)
5. Kapskii, D.V. & Lyu, Yuivei. (2022). Analiz printsipov raspolozheniya ostanovochnykh punktov bezrel'sovogo gorodskogo marshrutnogo passazhirskogo transporta. *Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii: v 2 t., Tyumen', 21 aprelya 2022 goda. T. II* (43–49). Tyumen': Tyumenskii industrial'nyi universitet. (In Russ.)

Поступила 27.06.2024

## RESEARCH OF TRAFFIC CONDITIONS OF ROUTE PASSENGER TRANSPORT IN THE CITY OF HOHHOT, CHINA

LIU YUWEI

(Belarusian National Technical University, Minsk)

The article presents the results of studies of the traffic conditions of trackless route passenger vehicles, as well as studies of the conditions for boarding/disembarking passengers and typification of stopping points located on the main transport network of the city of Hohhot. Some parameters characterize the quality of transport services provided (speed, passenger flow, delivery of buses to passengers on time, etc.) Recommendations are given to improve the quality of traffic and traffic conditions of route passenger transport, especially during peak hours.

**Keywords:** trackless route passenger transport, vehicle, transport system, rush hour, passenger flow.



УДК 533.6.071

DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-57-61

**РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИЙ СПОСОБ ПРОВЕРКИ И ТАРИРОВКИ  
ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ВЕСОВ****канд. техн. наук В.В. МАЛЕРОНОК, канд. техн. наук В.А. ПОТАПОВ,  
С.Н. РОМАНЁНОК****(Белорусская государственная академия авиации, Минск)**

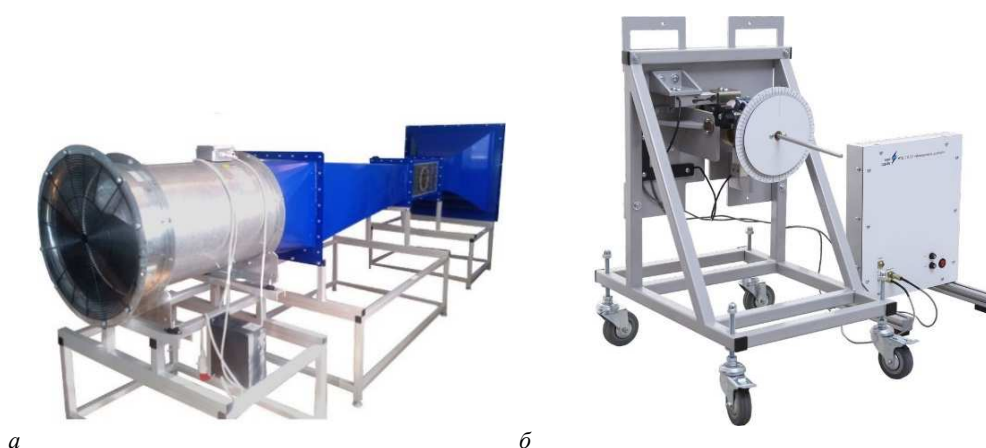
Предложен расчетно-графический способ проверки показаний тензометрических датчиков, используемых для измерения аэродинамических сил и моментов. В основу способа лег расчет статической составной конструкции весового механизма лабораторного стенда НТЦ-19.02 «Аэродинамическая труба». Определены основные силы и моменты, действующие на конструкцию, значения которых сравнивались с показаниями тензометрических датчиков. В случае несоответствия значений, полученных путем измерения и расчета, производились построение тарировочного графика и определение по нему линейного тарировочного уравнения с последующей корректировкой несоответствующих значений.

**Ключевые слова:** аэродинамическая труба, аэродинамические весы, тензометрический датчик, подъемная сила, сила лобового сопротивления, расчетно-графический способ, статическая конструкция.

**Введение.** При исследовании аэродинамических характеристик летательных аппаратов или других объектов, при проведении аэродинамических экспериментов используют промышленные исследовательские лабораторные комплексы (стенды) по типу аэродинамической трубы, соответствующие всем техническим требованиям, которые необходимо соблюдать для выполнения условия аэродинамического подобия между обдуваемой моделью и натурным полноразмерным объектом. Однако ряд узлов (например, аэродинамические весы) требуют проверки и тарировки измеряемых значений с целью их верификации и приведения в соответствие со значениями реальных физических величин (подъемной силы и силы лобового сопротивления).

Отличительной особенностью данного исследования является следующее: на точечный тензометрический датчик сила действует не по нормали, а через плечо, на которое устанавливается обдуваемый объект. Следовательно, для выполнения проверки необходимо применить расчетно-графический способ, учитывающий совокупность сил и моментов, возникающих в статически уравновешенной системе.

**Основная часть.** Исследования проводились на учебном лабораторном стенде НТЦ-19.02 «Аэродинамическая труба» (рисунок 1)<sup>1</sup>.



**а – компоновка стенда; б – тензометрические аэродинамические весы**

**Рисунок 1. – Лабораторный стенд НТЦ-19.02 «Аэродинамическая труба»**

Для интерпретации показаний тензометрических датчиков использовалось программное обеспечение (далее – ПО) лабораторного стенда НТЦ-19.02. В рабочем окне данного ПО величины сил, воздействующих на сам датчик (подъемная сила и сила лобового сопротивления), отображаются в размерности килограмм-сила (кгс) или ньютон (Н) без индикации их промежуточных преобразований в код или уровень напряжения (рисунок 2).

<sup>1</sup> URL: <https://ntpcentr.com/ru/catalog/aerodinamika/ntc-19-02-aerodinamicheskaya-truba>

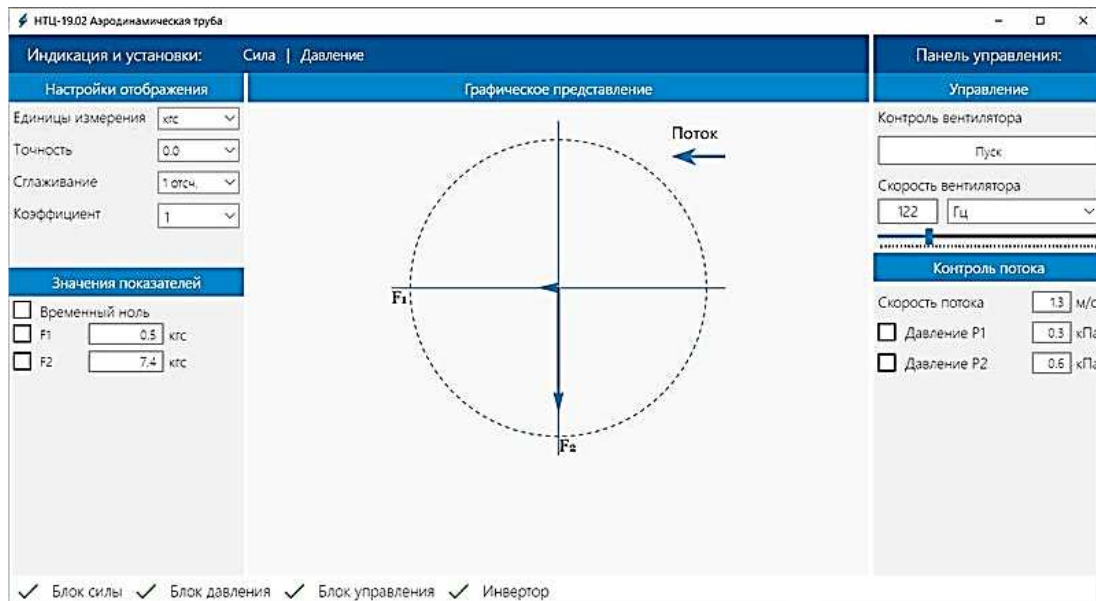


Рисунок 2. – Рабочее окно ПО лабораторного стенда  
НТЦ-19.02 «Аэродинамическая труба»

В лабораторном стенде НТЦ-19.02 «Аэродинамическая труба» аэродинамические весы представляют собой весовой механизм в виде духконсольной горизонтальной балки (прутка), шарнирно закрепленной в точке А, которая опирается на два катка, расположенных под 90° относительно друг друга, в точке D (катки установлены на тензометрические датчики для измерения подъемной силы  $F_Y$  и силы лобового сопротивления  $F_X$ ) (рисунок 3).

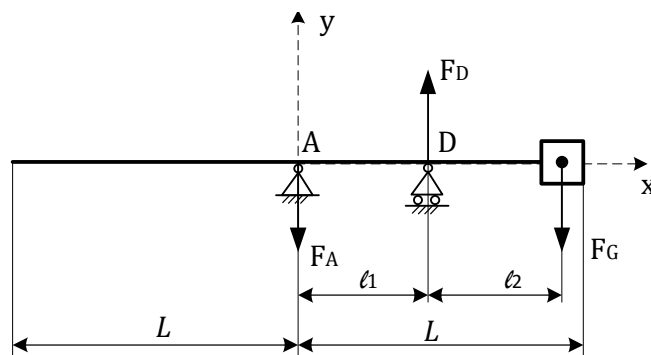


Рисунок 3. – Схема составной конструкции весового механизма  
лабораторного стенда НТЦ-19.02 «Аэродинамическая труба»<sup>2</sup>

До начала измерений балка (пруток) уравновешена своими равными плечами  $L$  относительно точки А, и, следовательно, на датчике в точке D показания отсутствуют. При установке обдуваемой модели в аэродинамическую трубу на одну консоль весов ее вес уравновешивается дополнительным грузом на второй консоли, и показания датчика остаются нулевыми (рисунок 4).

Измерения начинаются после появления подъемной силы  $F_Y$  и силы лобового сопротивления  $F_X$ , нарушающих равновесие системы.

Для выполнения проверки показаний тензометрических датчиков на одну из консолей балки (прутка) подвешивались грузы заведомо известной массы (поверенные гири), имитирующие появление подъемной силы  $F_Y$ , а при повороте механизма на 90° с вращением по оси балки (прутка) – силы лобового сопротивления  $F_X$ . Далее производились построения расчетной схемы конструкции и расчет сил, действующих на датчик, с последующим сравнением полученных значений со значениями, отображаемыми программным обеспечением.

<sup>2</sup> ГОСТ 2.770-68 Обозначения условные графические в схемах. Элементы кинематики. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1967. – 44 с.



Рисунок 4. – Обдуваемая модель, установленная на консоль аэродинамических весов лабораторного стенда НТЦ-19.02 «Аэродинамическая труба»

Подвешиваемый груз представляет собой распределенную нагрузку с приложением силы тяжести в его центре масс (геометрическом центре). Следовательно, по мере увеличения массы и геометрических размеров груза будет изменяться и плечо  $l_2$  (см. рисунок 3).

Составлены система уравнений моментов относительно точек А, D и уравнение проекций сил на ось Y. При этом, если сила относительно точки стремится повернуть балку (пруток) против часовой стрелки, знак момента положительный, по часовой стрелке – знак момента отрицательный [1].

$$\begin{cases} \Sigma M_A = -F_G(l_1 + l_2) + F_D l_1 = 0; \\ \Sigma M_D = -F_G l_2 + F_A l_1 = 0; \\ \Sigma F_y = -F_A + F_D - F_G = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $F_G = mg$  – сила тяжести груза массой  $m$  (Н);

$g$  – ускорение свободного падения ( $m/c^2$ );

$F_A$  – сила реакции опоры в точке А (Н);

$F_D$  – сила реакции опоры в точке D, действующая на датчик (Н);

$l_1, l_2$  – расстояния между точками приложения сил (м).

Из первого и второго уравнений выразим силы, действующие в опорах А, D, а третье используем для выполнения проверки проведенного расчета:

$$\begin{aligned} F_D &= \frac{F_G(l_1 + l_2)}{l_1} = \frac{mg(l_1 + l_2)}{l_1}, \\ F_A &= \frac{F_G l_2}{l_1} = \frac{mgl_2}{l_1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Произведем расчет сил реакций опор по (2), подставив известные значения  $m, g, l_1, l_2$ , пренебрегая весом балки (прутка), и выполним проверку полученных результатов (сумма сил должна быть равна нулю) (таблица 1).

Таблица 1. – Результаты расчета сил реакций опор

$m$ , кг	$g$ , $m/c^2$	$l_1$ , м	$l_2$ , м	$F_G$ , Н	$F_A$ , Н	$F_D$ , Н	$\Sigma F_y$
0	9,8	0,06	0	0	0	0	0
0,33	9,8	0,06	0,15	3,234	8,085	11,319	0
0,49	9,8	0,06	0,15	4,802	12,005	16,807	0
0,82	9,8	0,06	0,13	8,036	17,41133	25,44733	0
0,986	9,8	0,06	0,14	9,6628	22,54653	32,20933	0

Проверка полученных результатов показала, что расчет выполнен верно – сумма найденных сил  $F_G, F_A, F_D$  равна нулю. Следовательно, полученное значение силы  $F_D$  можно использовать для проверки показаний тензометрических датчиков, также установленных в точке D.

Выполнено измерение веса грузов массами  $m$  (см. таблицу 1) с помощью тензометрических аэродинамических весов лабораторного стенда НТЦ-19.02 «Аэродинамическая труба». Получены значения с тензометра, измеряющего подъемную силу  $F_y$ , и с тензометра, измеряющего силу лобового сопротивления  $F_x$  путем поворота механизма на  $90^\circ$  с вращением по оси балки (прутка) (таблица 2).

Таблица 2. – Результаты измерения сил, созданных грузами различной массы

$F_D$ , Н (расчетное)	$F_Y$ , Н (измеренное)	$F_X$ , Н (измеренное)	$\varepsilon(Y)$ , %	$\varepsilon(X)$ , %
0	0	0	0	0
11,319	10,78	9,8	4,761905	13,41991
16,807	14,7	12,74	12,53644	24,19825
25,44733	25,48	21,56	0,12837	15,27599
32,20933	31,36	29,4	2,636917	8,72211
		среднее	5,015909	15,40407

Для оценки полученных значений сил найдены относительные погрешности по формулам [2]:

$$\varepsilon(Y) = \frac{|F_Y - F_D|}{F_D} \cdot 100\% ,$$

$$\varepsilon(X) = \frac{|F_X - F_D|}{F_D} \cdot 100\% , \quad (3)$$

где  $F_Y$ – сила, измеренная датчиком по оси  $Y$  (Н);

$F_X$ – сила, измеренная датчиком по оси  $X$  (Н);

$F_D$ – сила реакции опоры в точке  $D$ , значения которой рассчитаны и приняты за достоверные (Н).

Как видно из результата расчета относительной погрешности по (3) (см. таблицу 2), тензометрический датчик, измеряющий величину подъемной силы  $F_Y$ , имеет среднюю погрешность в 5%, что близко к средней максимальной погрешности тензометрических датчиков такого класса точности<sup>3</sup>. Следовательно, получаемые с этого датчика значения можно использовать без тарировочного графика (уравнения) и подгонных коэффициентов.

Однако относительная погрешность тензометрического датчика, измеряющего величину силы лобового сопротивления  $F_X$ , имеет погрешность в 15% (см. таблицу 2), что ведет к искажению реальных значений измеряемой силы. ПО лабораторного стенда НТЦ-19.02 «Аэродинамическая труба» не представлено в открытом исходном коде и нет возможности для внесения калибровок в само ПО, поэтому для измеряемых значений тензометрического датчика, установленного по оси  $X$ , необходимо построить тарировочный график и получить уравнение зависимости для пересчета измеряемых значений [3].

На основании построенного тарировочного графика (рисунок 5) получена линейная зависимость для пересчета измеряемых значений:

$$F_{X(\text{тар})} = 1,1036F_x + 0,9332 , \quad (4)$$

где  $F_{X(\text{тар})}$ – сила по оси  $X$ , значения которой скорректированы тарировочным уравнением (Н).

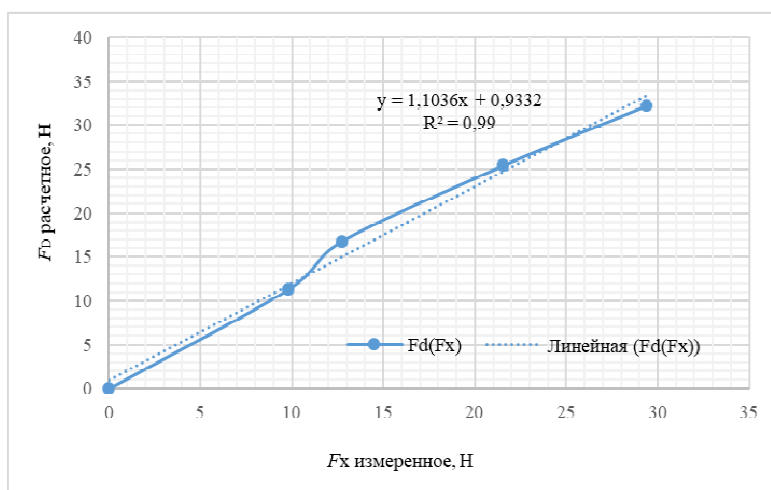


Рисунок 5. – Тарировочный график и линейное уравнение

<sup>3</sup> ГОСТ 8.631-2013 (OIML R 60:2000) Датчики весовые. Общие технические требования. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2014. – 82 с.

Измеренные ранее датчиком по оси  $X$  значения силы  $F_X$  подставили в уравнение (4) и произвели их тарировку (таблица 3).

Таблица 3. – Результаты тарировки показаний датчика по оси  $X$

$F_D$ , Н (расчетное)	$F_X$ , Н (измеренное)	$F_{X(\text{тар})}$ , Н	$\varepsilon(F_{X(\text{тар})})$ , %
0	0	0	0
11,319	9,8	11,74848	3,794328
16,807	12,74	14,99306	10,79274
25,44733	21,56	24,72682	2,831393
32,20933	29,4	33,37904	3,631587
		среднее	5,262513

При этом расчет погрешности относительно силы  $F_D$ , значения которой рассчитаны и приняты за достоверные, показал, что скорректированные значения имеют среднюю относительную погрешность в 5%, что допустимо для тензометрических датчиков такого класса точности.

**Заключение.** Проведена проверка и тарировка показаний тензометрических датчиков аэродинамических весов. Построен тарировочный график и по нему определено линейное уравнение зависимости (тарировочное уравнение), которое удобно использовать для корректировки значений, снимаемых с датчика.

Таким образом, подобную методику проверки и тарировки датчиков можно применять для любого вида измерений и получать тарировочные графики, таблицы и уравнения, которые можно использовать как для корректировки однородных физических величин (например, сил), так и для перехода между разнородными (например, сила–код, сила–напряжение и т.п.).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Денисов Ю.В., Клиньских Н.А. Теоретическая механика: учеб. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 474 с.
2. Метрология и электрические измерения: учеб. пособие / Е.Д. Шабалдин, Г.К. Смолин, В.И. Уткин и др.; под ред. Е.Д. Шабалдина. – Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф. пед. ун-т», 2006. – 282 с.
3. Бирюля И.И. Экспериментальные методы определения линейных деформаций: учеб. пособие по лаб. работе. – Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1980. – 22 с.

#### REFERENCES

1. Denisov, Yu.V. & Klinskikh, N.A. (2013). *Teoreticheskaya mekhanika*. Ekaterinburg: UrFU. (In Russ.)
2. Shabaldin, E.D., Smolin, G.K., Utkin, V.I. & Zarubin, A.P. (2006). *Metrologiya i elektricheskie izmereniya*. Ekaterinburg: Izd-vo GOU VPO «Rossiiskii gosudarstvennyi professional'no-pedagogicheskii institut». (In Russ.)
3. Biryulya, I.I. (1980). *Eksperimental'nye metody opredeleniya lineinykh deformatsii*. Khar'kov: Khar'kovskii aviatsionnyi institut. (In Russ.)

Поступила 25.06.2024

#### CALCULATIONAL GRAPHICAL METHOD FOR CHECKING AND CALIBRATING TENSOMETRIC SENSORS OF AERODYNAMIC SCALES

V. MALERONOK, V. POTAPOV, S. ROMANIONOK  
(Belarusian State Aviation Academy, Minsk)

*Calculational graphical method for checking the readings of tensometric sensors, which are used to measure aerodynamic forces and moments, is proposed. The method is based on the calculation of the static composite structure of the weight mechanism of the laboratory stand NTC-19.02 "Wind Tunnel". The main forces and moments acting on the structure were determined, the values of which were compared with the readings of strain gauges. In case of discrepancy between the values obtained by measurement and calculation, a calibration graph was constructed and a linear calibration equation was determined from it, followed by correction of the discrepant values.*

**Keywords:** wind tunnel, aerodynamic balance, strain gauge, lift force, drag force, calculation graphical method, static design.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

канд. техн. наук, доц. **Н.В. ВОЛОДАРЕЦ**  
(Донецкая академия транспорта)

Усовершенствована методика определения технического уровня транспортного средства, имеющего любой тип привода. Разработан алгоритм методики оценки технического уровня транспортного средства. Приведена номенклатура показателей, характеризующих гибридное транспортное средство при выполнении определенного вида работы. Методика опробована на гибридном транспортном средстве. Подтверждена эффективность ее использования в процессе принятия решения об обновлении подвижного состава.

**Ключевые слова:** технический уровень, транспортное средство, экспертные оценки, качество продукции, метод весовых коэффициентов.

**Введение.** Сегодня на всех видах транспорта в большей или меньшей степени требуется обновление подвижного состава. Для определения необходимости его обновления требуется оценить эффективность и целесообразность такого решения. На первом этапе необходимо определить технический уровень транспортного средства.

**Цель работы:** совершенствование методики определения технического уровня транспортного средства.

**Основная часть.** Обзор существующих методик определения технического уровня объекта. Технический уровень объекта представляет собой количественную характеристику степени его технического совершенства и представляет собой составную часть технической оценки при общей оценке качества транспортных средств (рисунок 1) [1].



Рисунок 1. – Структура оценки качества транспортных средств

Понятие «технический уровень» продукции определяется ГОСТ 15467-79<sup>1</sup> и трактуется как часть общего качества продукции: это относительная характеристика качества продукции, основанная на сопоставлении значений показателей, характеризующих техническое совершенство оцениваемой продукции, с соответствующими базовыми значениями. Под оценкой технического уровня понимается «... совокупность операций, включающая выбор номенклатуры показателей, характеризующих техническое совершенство оцениваемой продукции, определение значений этих показателей и сопоставление их с базовыми»<sup>1</sup>.

Одними из основных способов определения технического уровня являются [1]: определение на основе нормативно-технической документации; определение по аналогу; математические методы определения. При этом технический уровень транспортных средств имеет определенную размерность, которая может выражаться

<sup>1</sup> ГОСТ 15467-79 Управление качеством продукции. главные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 24 с.

в различных технических и информационных единицах измерения. Следовательно, методы определения технического уровня транспортных средств в зависимости от размерности коэффициента технического уровня можно разделить на методы определения: с безразмерным коэффициентом технического уровня; с коэффициентом технического уровня, имеющие определенную размерность; со смешанной размерностью коэффициента технического уровня (рисунок 2).



Рисунок 2. – Классификация методов определения технического уровня транспортного средства в зависимости от размерности коэффициента технического уровня

При сравнении фактических значений характеристик свойства продукции с базовыми значениями удобно воспользоваться относительными значениями. Уровень качества при этом будет определяться совокупностью относительных значений или их функциями. Приведенные стандартные определения имеют четкую направленность на то, чтобы получать безразмерные числа, не имеющие физического содержания, но удобные для расчетных работ. Чтобы сгладить этот недостаток, важность каждого числа определяется его коэффициентом значимости<sup>2</sup> [1–3]. В проектно-конструкторских и проектно-технологических разработках приводятся, как правило, большое количество расчетных параметров. Поэтому, чтобы оценить перспективность новых разработок транспортных средств по сравнению с существующими в серийном производстве, необходимо найти алгоритм, позволяющий свести большое количество параметров к оптимальному количеству критериев. В методе информационного прогнозирования преобразование информации осуществляется по критерию технического уровня.

Критерий технического уровня методом весовых коэффициентов характеризует новую проектно-конструкторскую разработку в отношении существующих объектов техники того же производственного назначения и рассчитывается по формуле, приведенной в работах<sup>2</sup> [2; 3]:

$$K_{TP} = \frac{\sum_{i=1}^{i=qr} k_n \varphi(i)}{\sum_{i=1}^{i=qr} \varphi(i)}, \quad (1)$$

где  $K_{TP}$  – критерий технического уровня;

$k_n$  – параметр, представляющий собой отношение числовых параметров новой разработки к параметрам существующих объектов для рациональных категорий (рост параметра соответствует техническому прогрессу) и нерациональных категорий (рост параметра не соответствует техническому прогрессу);

$\varphi(i)$  – функция, нормирующая вес параметров в ранжированной последовательности,  $i = 1 \dots qr$ .

Лучшему из сравниваемых транспортных средств соответствует большее значение коэффициента  $K_{TP}$ .

Усовершенствование существующих методов определения технического уровня транспортного средства. Был усовершенствован метод определения технического уровня транспортного средства за счет следую-

<sup>2</sup> Фалендыш А.П. Оценка технического уровня маневровых тепловозов для железных дорог Украины: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. – Харків: ХарГАЖТ, 1997. – 186 л.

щего. В части определения веса параметров в ранжированной последовательности вместо использования экспертного метода внедрена функция  $\varphi(i)$ , согласно которой этот показатель определяется по формуле

$$\varphi(i) = \frac{i}{2^{i-1}}, \quad i \geq 2, \quad (2)$$

где  $i$  – номер технического параметра в ранжированной последовательности (причем по определению  $\varphi(1) = 2$  – особая точка).

В части номенклатуры параметров был введен вместо эффективной мощности параметр общей мощности силовых установок транспортного средства, включающий в себя мощность всех силовых установок, установленных на транспортном средстве. Это позволяет учесть, например, использование гибридного привода на транспортном средстве.

Алгоритм определения оценки технического уровня транспортного средства представлен на рисунке 3.

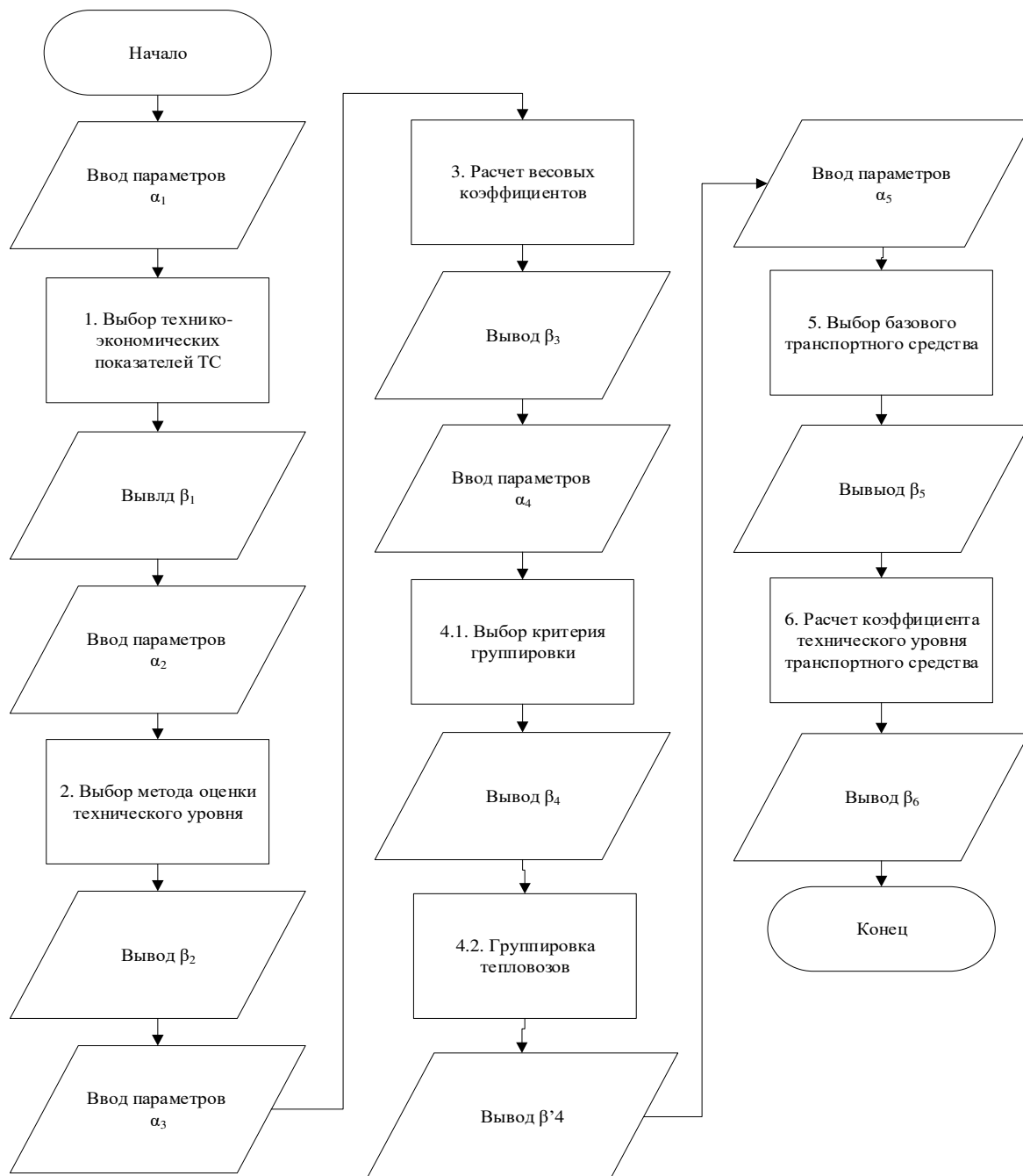


Рисунок 3. – Алгоритм методики оценки технического уровня транспортного средства



*Определение технического уровня транспортного средства.* На первом этапе осуществляется выбор технико-экономических показателей транспортного средства по разработанной процедуре (блок 1, см. рисунок 3).

Одним из основных вопросов при определении технического уровня транспортного средства является выбор рациональной номенклатуры показателей, наиболее полно характеризующих рассматриваемый вид транспорта.

Определим технический уровень транспортного средства на примере маневрового тепловоза (МТ).

Для выбора технических характеристик транспортного средства можно использовать один из способов: выбор характеристик на базе научно-технической документации; выбор показателей на основе сравнения с транспортным средством образца; выбор характеристик по аналогу с другими видами транспортного средства; выбор характеристик математическими способами; выбор характеристик экспертным способом.

Использование первого способа осложнено слаборазвитыми стандартами на гибридные маневровые локомотивы. Второй и третий способы не подходят, т.к. на каждое из транспортных средств в технической документации приводятся данные по более ста показателям, относящимся и к нему в целом, и к отдельным узлам. Поэтому выбрать оптимальную номенклатуру показателей практически невозможно.

Одним из способов выбора номенклатуры параметров МТ, входящих в группу экспертных, является метод уточняющей гипотезы. Согласно этому методу, первоначально в список параметров включают все параметры, характеризующие новый тепловоз с точки зрения его качества и эффективности. Затем они уточняются, сокращается их количество. При этом должны выполняться следующие основные правила. Ограничение количества рассматриваемых параметров обусловлено невозможностью определения технического уровня с достаточной точностью с точки зрения экономичности. В список параметров необходимо включать незаурядные, т.е. не зависящие друг от друга, параметры. Иными словами, из комбинации двух параметров не должен вытекать третий. Учитывая нормирование весов параметров, некорректно насыщать список малозначимыми параметрами, что подтверждается исследованиями и теорией метода группового учета аргументов. В то же время оценка уровня МТ по нескольким или одному параметру представляется достаточно приближительной.

Математические способы определения номенклатуры параметров являются хотя и более трудоемкими, но и более надежными. Выбор показателей МТ можно выполнять по методикам, основанным на теории множеств, более точно на теории бинарных отношений, как было рассмотрено выше.

В результате анализа существующих методик определения параметров подвижного состава для оценки его технического уровня экспертным методом была выбрана методика определения номенклатуры показателей МТ с использованием теории множеств.

Выбор номенклатуры технических показателей выполняем по критерию полезного экономического эффекта от использования транспортного средства, руб.,

$$\Delta E_{\Sigma} = \Delta E_{\text{экс.вит}} + \Delta E_{\text{иск.}} + \Delta E_{\text{небл.ум}}, \quad (3)$$

где  $\Delta E_{\Sigma}$  – суммарный экономический эффект от использования МТ, руб.;

$\Delta E_{\text{экс.вит}}$  – экономический эффект, получаемый от уменьшения эксплуатационных расходов, руб.;

$\Delta E_{\text{иск.}}$  – экономический эффект, получаемый от увеличения объемов выполняемой работы, руб.;

$\Delta E_{\text{небл.ум}}$  – экономический эффект, получаемый от уменьшения затрат при применении в неблагоприятных условиях (эксплуатация в непредвиденных технических заданием условиях), руб.

Массивом входных данных  $\alpha_1$  для расчета служат технико-экономические показатели МТ  $\alpha_1 = \{P_i\}$ , где  $P_i$  –  $i$ -е множество технико-экономических показателей локомотива,  $i = 1 \dots n$ .

Гибридный МТ в целом по критерию полезного эффекта можно охарактеризовать множеством показателей:

$$P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\}. \quad (4)$$

Показатели, характеризующие экономический эффект от уменьшения эксплуатационных расходов, представляют множество  $P_1$ . Полезный эффект, получаемый от увеличения объемов выполняемой работы, – множество показателей  $P_2$ . Экономический эффект от уменьшения затрат при применении в неблагоприятных условиях – множество показателей  $P_3$ . При этом  $P_1 \subseteq P$ ;  $P_2 \subseteq P$ ;  $P_3 \subseteq P$ .

Экономический эффект от снижения эксплуатационных расходов можно получить за счет следующих мер: уменьшение затрат на ГП (множественное число  $P_{1.1}$ ); уменьшение затрат на экипировку МТ (множественное число  $P_{1.2}$ ); уменьшение затрат на экологию (множественное число  $P_{1.3}$ ); увеличение надежности МТ (множественное число  $P_{1.4}$ ); рациональный подбор локомотива для работы (множественное число  $P_{1.5}$ ).

В результате объединения этих множеств

$$P_1 \supseteq \cup P_{1.1} \cup P_{1.2} \cup P_{1.3} \cup P_{1.4} \cup P_{1.5} = \{g_e, C_m, B_z, T_{св}, R_{ед}, R_{ене}, P_i(L), Q_m, Q_n, Q_b, Q_{нec}, k_{НеМР}\}. \quad (5)$$

где  $g_e$  – удельный расход топлива, г/кВт·ч;  $C_m$  – цена топлива, грн/т;  $B_z$  – среднее эксплуатационный расход топлива МТ за 1 ч, кг/ч;  $T_{cl}$  – срок службы МТ, лет;  $R_{ed}$  – ресурс ДГУ;  $R_{ene}$  – ресурс НЕ;  $P_i(L)$  – вероятность безотказной работы МТ к ремонтам и за весь срок службы;  $Q_m$  – запас топлива МТ, т;  $Q_{\omega}$  – запас масла МТ, т;  $Q_e$  – запас воды МТ, т;  $Q_{nes}$  – запас песка МТ, т;  $k_{НеМР}$  – коэффициент использования мощности тепловоза для маневровых работ.

Рассмотрим меры, направленные на получение экономического эффекта от увеличения объемов эксплуатационных работ. Маневровые локомотивы можно использовать при выполнении и маневровой работы, и вывозной. Но большую часть времени они выполняют маневровую работу. Потому в дальнейшем будем рассматривать работу МТ только как маневровую. К мерам, направленным на увеличение объемов эксплуатационных работ, можно отнести мероприятия, ориентированные на наращивание: касательной мощности МТ; конструкционной скорости МТ; продолжительности работы МТ; касательной силы тяги МТ; эффективной мощности МТ; службы МТ; а также на рациональный подбор состава МТ для работы. К техническим параметрам МТ, характеризующим данные меры, можно отнести:  $F_{\infty}$  – силу тяги длительного режима, кН;  $v_{\infty}$  – скорость длительного режима, км/ч;  $v_k$  – конструкционную скорость, км/ч;  $N_{\infty}$  – мощность длительного режима, кВт;  $N_o$  – общую мощность гибридного МТ, кВт, состоящую из мощностей дизеля и накопителя энергии;  $P_l$  – вес МТ, т;  $P_{oc}$  – нагрузку на ось МТ, кН;  $T_{cl}$  – срок службы МТ, год. Эти параметры представляют множество

$$P_2 = \{F_{\infty}, v_{\infty}, N_{\infty}, N_o, P_l, P_{oc}, v_k, T_{cl}\}. \tag{6}$$

Экономический эффект от уменьшения затрат в неблагоприятных условиях: использование на плохих путях и на ограниченной территории. К техническим параметрам МТ, которые характеризуют меры, направленные на уменьшение затрат на его ремонт, можно отнести:  $P_{oc}$  – нагрузку на ось МТ, кН;  $L_l$  – длину МТ, м;  $V_l$  – объем локомотива, м.куб.;  $R_{min}$  – минимальный радиус кривых, проходящих МТ, м.кв.

Все эти параметры представляют множество  $P_3$ :

$$P_3 = \{P_{oc}, L_l, V_l, R_{min}\}. \tag{7}$$

Тогда множество показателей  $P$ , характеризующее экономический эффект от использования гибридного МТ (рисунок 4), имеет вид

$$P \supseteq P_1 \cup P_2 \cup P_3 = \{g_e, C_m, B_z, T_{cl}, R_{ed}, R_{ene}, P_i(L), Q_m, Q_{\omega}, Q_e, Q_{nes}, k_{НеМР}, F_{\infty}, v_{\infty}, N_{\infty}, N_o, P_l, P_{oc}, v_k, L_l, V_l\}. \tag{8}$$

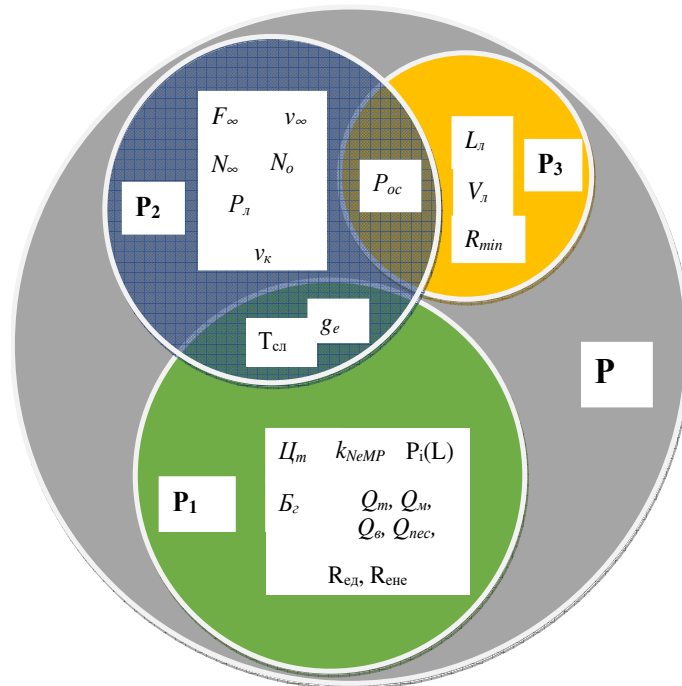


Рисунок 4. – Номенклатура показателей, характеризующих гибридный маневровый тепловоз при выполнении маневровой работы

Задача выбора параметров сводится к тому, чтобы среди всех параметров множества  $\alpha_1$  отобрать номенклатуру параметров  $\beta_1$ , для которой выполнялось условие толерантности. При этом выбранные параметры должны находиться в таком отношении, что с изменением одного из них будет изменяться и другой. В то же время любую единицу транспортного средства можно охарактеризовать 8–12 показателями. При этом точность оценки будет не ниже 0,95.

В результате расчетов по подпрограмме (блок 1, см. рисунок 3) и их анализу был получен исходный массив

$$\beta_1 = \{P_j\} = \{g_e, T_{cl}, k_{NeMP}, F_\infty, v_\infty, N_o, P_\lambda, P_{oc}, L_\lambda, R_{min}\}, \tag{9}$$

где  $P_j$  –  $j$ -й выбранный технико-экономический показатель гибридного МТ.  
Избранные характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Номенклатура технико-экономических показателей, характеризующих маневровую работу гибридного тепловоза

Составляющие полезного эффекта	Меры, изменяющие экономический эффект	Выбранные технические показатели	Размерность параметров
1. Уменьшение затрат на эксплуатацию	уменьшение расхода топлива	$g_e$	г/кВт ч
	увеличение надежности	$T_{cl}$	год
	социально-экологический эффект	$g_e$	г/кВт·ч
	уменьшение затрат на экипировку	–	–
	рациональный подбор локомотива для работы	$k_{NeMP}$	–
2. Увеличение объема эксплуатационных работ	касательной мощности, $N_k$	$F_\infty$	кН
		$v_\infty$	км/ч
		$N_o$	кВт
		$P_\lambda$	т
	времени работы	$T_{cl}$	год
3. Использование в неблагоприятных условиях	на плохих путях	$P_{oc}$	кН
	на ограниченной территории	$L_\lambda$ $R_{min}$	м м

На втором этапе (блок 2, см. рисунок 3) выполняется выбор метода расчета технического уровня. Входной информацией является массив  $\alpha_2 = \{M\}$ , где  $M_i$  –  $i$ -я методика расчета технического уровня МТ,  $i = 1, \dots, n$ . В результате был получен исходный массив  $\beta_2 = \{M\}$ , где  $M_j$  –  $j$ -й выбранный метод расчета технического уровня МТ,  $j = 1, \dots, m$ . Для расчетов экспертным методом был выбран метод весовых коэффициентов как наиболее простой и достаточно удобный.

На третьем этапе выполняется ранжирование параметров МТ и рассчитывается значение весовых коэффициентов (блок 3, см. рисунок 3). Входная информация при этом – массив  $\alpha_3 = \{\beta_1, \beta_2\}$ . Ранжирование проведено экспертным методом, а результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Значение основных технико-экономических показателей, характеризующих тепловоз при выполнении маневровой работы

Номер и технический параметр	Выбранные параметры	Размерность технических параметров	Рациональность параметра	Вес параметра в ранжируемой последовательности $\varphi_i$
1	Сила тяги длительного режима	кН	рац.	2
2	Общая мощность	кВт	рац.	1
3	Удельный расход топлива	г/кВт·ч	иррац.	0,75
4	Масса локомотива	т	рац.	0,5
5	Нагрузка на ось колесной пары	кН	рац.	0,31
6	Коэффициент использования мощности		рац.	0,19
7	Длительная скорость движения	км/ч	иррац.	0,11
8	Минимальный радиус прохождения кривой	м	иррац.	0,06
9	Срок службы	лет	рац.	0,04
10	Длина локомотива	м	иррац.	0,02

В результате расчетов получен массив весовых коэффициентов  $\beta_3 = \{\varphi_i\}$ , где  $\varphi_i$  – значение весового коэффициента  $i$ -го параметра ранжируемой последовательности выбранных характеристик МТ,  $i = 1, \dots, q_r$ .

Итак,

$$\beta_3 = \{2, 1, 0,75, 0,5, 0,31, 0,19, 0,11, 0,06, 0,04, 0,02\}. \quad (10)$$

Прежде чем приступить к определению технического уровня МТ на четвертом этапе, выбирается критерий их группировки. На основе разработанной программы (блок 4, см. рисунок 3), входными данными для которой является массив  $\alpha_4 = \{K_{pi}\}$ , где  $K_{pi}$  –  $i$ -й критерий группировки МТ,  $i = 1, \dots, n$ , был получен массив  $\beta_4$  критериев группировки  $\beta_4 = \{K_{pj}\}$ . В этом случае  $K_{pj}$  –  $j$ -й выбранный критерий группировки МТ,  $j = 1 \dots m$ .

Для нашего случая критерием группировки выбран вид передачи и тяги, представляющий собой массив  $\beta^{*4}$ :

$$\beta_4^* = \left\{ \begin{array}{l} \text{механическая передача} \\ \text{гидромеханическая передача} \\ \text{гидравлическая передача} \\ \text{электрическая передача} \\ \text{гибридная передача} \end{array} \right\} \quad (11)$$

Последующие расчеты проведены для локомотивов с гибридной передачей мощности, сформированных в виде массива  $\beta^{**4}$ :

$$\beta_4^{**} = \left\{ \begin{array}{l} \text{СКД (Прага) TA436.05 (718)} \\ \text{ЧМЭЗгибр.} \\ \text{Railpower GG20B GreenGoat} \\ \text{Railpower GG10K GreenKid} \end{array} \right\} \quad (12)$$

На пятом этапе этой группы был выбран МТ ЧМЭЗ, являющийся базовым для модернизации гибридной передачи мощности и наиболее используемым тепловозом на Укрзализныце для выполнения маневровых операций.

Выбранный локомотив представляет собой массив из одного элемента  $\beta_5$ :

$$\beta_5 = \{\text{ЧМЭЗ}\}. \quad (13)$$

На шестом этапе для выбранной группы локомотивов по формуле (1) рассчитывается коэффициент технического уровня гибридных тепловозов. Результаты расчетов представлены в массиве  $\beta_6$  и сведены в таблицу 3.

$$\beta_6 = \{0,68; 1,1; 1,02; 1,32\}. \quad (14)$$

Таблица 3. – Технический уровень маневровых тепловозов

Серия локомотива	Коэффициент технического уровня $K_t$
ТА 436.05 (718)	0,68
ЧМЭЗгибр.	1,1
GG10K Greengid	1,02
GG20B Greengoat	1,32

Проведенные расчеты доказывают эффективность технической эксплуатации гибридного локомотива, т.к. коэффициент технического уровня больше 1 для большинства локомотивов, кроме ТА 436.05(718) (из-за его слишком низкой мощности по сравнению с ЧМЭЗ).

**Заключение.** Усовершенствована методика определения технического уровня транспортного средства. Методика опробована на гибридном транспортном средстве и подтвердила свою эффективность. Ее применение позволит эффективно оценивать необходимость и целесообразность обновления парка транспортных средств для разных видов транспорта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бурдаков В.Д. Квалиметрия транспортных средств. Методика оценки эффективности использования. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 160 с.
2. Фалендыш А.П., Володарец Н.В. Использование гибридных передач на маневровых тепловозах // Локомотив-информ. – 2010. – Декабрь. – С. 4–7.
3. Calculation of the Parameters of Hybrid Shunting Locomotive / A. Falendysh, P. Kharlamov, O. Kletska et al. // Transportation Research Procedia. – 2016. – Vol. 14. – P. 665–671. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.325

## REFERENCES

1. Burdakov, V.D. (1990). *Kvalimetriya transportnykh sredstv. Metodika otsenki effektivnosti ispol'zovaniya*. Moscow: Izd-vo standartov. (In Russ.)
2. Falendysh, A.P. & Volodarets, N.V. (2010). Ispol'zovanie gibridnykh peredach na manevrovykh teplovozhakh. *Lokomotiv-inform*, (Dekabr'), 4–7. (In Russ.)
3. Falendysh, A., Kharlamov, P., Kletska, O. & Volodarets, N. (2016). Calculation of the Parameters of Hybrid Shunting Locomotive. *Transportation Research Procedia*, (14), 665–671. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.325

Поступила 28.06.2024

**IMPROVEMENT OF THE METHODOLOGY FOR DETERMINING THE TECHNICAL LEVEL  
OF THE VEHICLE**

**N. VOLODARETS**  
(*Donetsk Academy of Transport*)

*The paper improves the methodology for determining the technical level of a vehicle having any type of drive. The algorithm of the methodology for assessing the technical level of the vehicle has been developed. The nomenclature of indicators characterizing a hybrid vehicle when performing a certain type of work is given. The technique has been tested on a hybrid vehicle. The effectiveness of its use in the decision-making process on the renewal of rolling stock was confirmed.*

**Keywords:** *technical level, vehicle, expert assessments, product quality, method of weighting coefficients.*

УДК 629.113

DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-70-77

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАНЕВРНОСТИ И АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ МОДЕЛИ СЕДЕЛЬНОГО АВТОПОЕЗДА С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

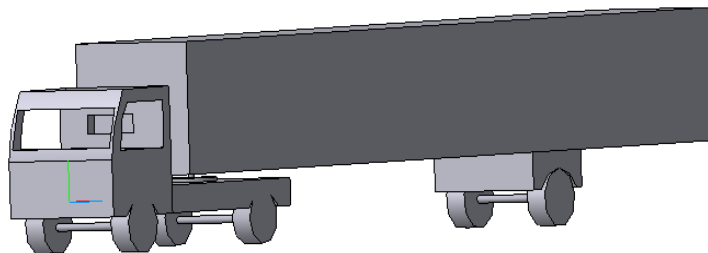
*канд. техн. наук, доц. Д.Л. МОЙСЯ  
(Донецкая академия транспорта)*

*Решена задача маневренности седельного длиннобазного автопоезда, состоящего из двухосного тягача и одноосного полуприцепа. Построены фазовые портреты системы при различных скоростях, которые позволяют оценить область притяжения прямолинейного движения. Рассмотрены вопросы устойчивости, в частности, влияние параметров управления ( $\theta, v$ ) на устойчивость (неустойчивость).*

**Ключевые слова:** *седельный длиннобазный автопоезд, маневренность, устойчивость, математическая модель, стационарный режим движения, дивергентная неустойчивость, флаттерная неустойчивость, критическая скорость.*

**Введение.** Во многих отраслях промышленности все большее значение приобретает быстрая и экономичная доставка неделимых крупногабаритных грузов. Обеспечение необходимой для этого грузоподъемности подвижного состава и мощности его двигателя в одном неделимом транспортном агрегате достаточно затруднительно. Главную роль в решении этой проблемы играют длинномерные автомобильные поезда, эксплуатация которых может быть осложнена их конструктивными особенностями, в первую очередь, ограниченной маневренностью в стесненных городских условиях.

В данном случае рассматривается двухзвенный автопоезд, состоящий из ведущего звена (тягача) и ведомого звена (полуприцепа) (рисунок 1).



**Рисунок 1. – Пространственная модель автопоезда  
(выполнена в программном комплексе «КОМПАС 3D»)**

Математическая модель канонического автопоезда являлась объектом исследований отечественных и зарубежных, в основном, авторов, однако результаты анализа касались линеаризованных моделей [2–6].

Одной из особенностей данной работы является попытка исследовать нелинейную математическую модель двухзвенного автопоезда – вскрыть картину возможных перестроек конфигурации автопоезда при различных начальных возмущениях фазовых переменных, что требует нестандартных методов анализа (построение фазового портрета и оценка области притяжения устойчивых стационарных режимов).

**Цель работы:** исследование маневренности и устойчивости модели седельного автопоезда; определение множества стационарных режимов движений, обеспечивающих необходимую маневренность при прохождении круговой габаритной полосы; оценка области притяжения устойчивого стационарного режима; проверка характера потери устойчивости прямолинейного движения (дивергентная, флаттерная).

**Основная часть. Постановка задачи.** Для наиболее полного описания и исследования возможных стационарных состояний седельного автопоезда с жестким рулевым управлением необходимо выбрать подходящую математическую модель и соответствующие переменные состояния (рисунок 2).

Передняя ось тягача может поворачиваться на угол  $\theta$ . Связь между звеньями осуществляется цилиндрическим шарниром, который допускает свободное относительное поворачивание звеньев в плоскости их движения.

Положение каждого звена задается координатами  $x_i, y_i$  его центра масс  $C_i$  и курсовым углом  $\psi_i$  (который заключен между продольной осью соответствующего звена и осью абсцисс  $x$  неподвижной системы координат).

Параметры системы:  $v$  – продольная составляющая скорости центра масс тягача;  $a, b$  – расстояние от центра масс тягача до точек крепления передней и задней осей тягача;  $c$  – расстояние от центра масс тягача до точки сцепки с задним звеном;  $d_1$  – расстояние от центра масс полуприцепа до точки сцепки;  $2K$  – габаритная

ширина автопоезда;  $k_f$  – коэффициент трения;  $k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты увода на осях;  $\chi_1, \chi_2, \chi_3$  – коэффициенты сцепления при определении боковых сил увода;  $\theta$  – устанавливаемый угол поворота колес управляемого модуля;  $Y_1, Y_2, Y_3$  – приведенная боковая реакция полотна дороги на опорных осях тягача и полуприцепа.

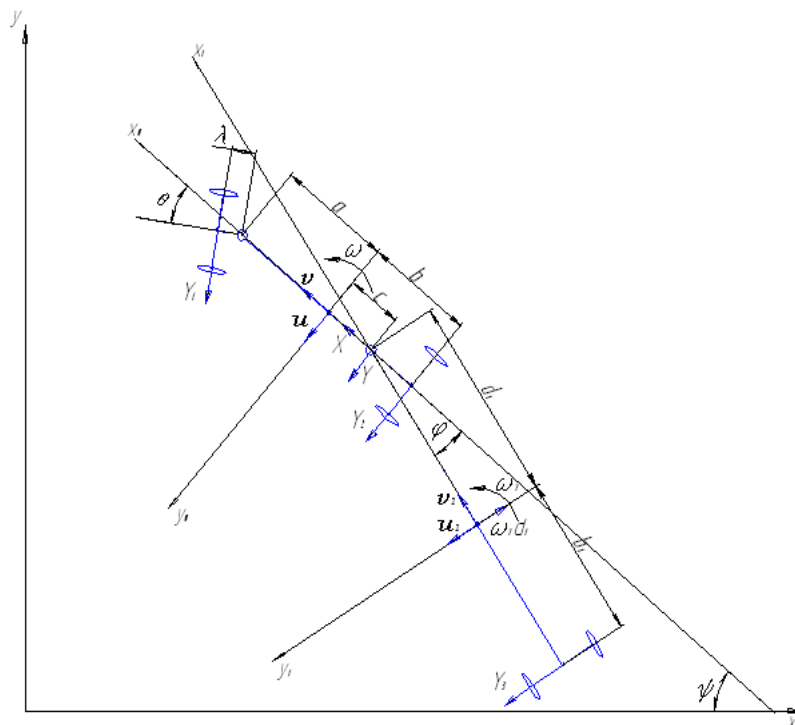


Рисунок 2. – Схема движения автопоезда

Обозначим через  $C, C_1, m, m_1, I, I_1, \omega = \dot{\psi}, \omega_1 = \dot{\psi}_1, \phi$  – центры масс, массы, центральные моменты инерции относительно соответствующих вертикальных осей, абсолютные угловые скорости ведущего и ведомого звеньев и угол складывания (заключен между продольными осями тягача и полуприцепа). Тогда

$$\omega_1 = \omega - \dot{\phi}.$$

Зададим абсолютные скорости точек  $C, C_1$  разложениями по ортам соответствующих базисов:

$$\begin{aligned} v_c &= i_0 v + j_0 u, & v_{c1} &= i_1 v_1 + j_1 u_1, \\ v &= \dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi, & u &= -\dot{x} \sin \psi + \dot{y} \cos \psi, \\ v_1 &= v \cdot \cos \phi - (u - \omega \cdot c) \cdot \sin \phi, & u_1 &= v \cdot \sin \phi + (u - \omega \cdot c) \cdot \cos \phi - \omega_1 \cdot d_1. \end{aligned} \tag{1}$$

Система дифференциальных уравнений движения автопоезда описывает изменение фазовых переменных ( $u, \omega, \phi, \Phi$ ):  $u$  – поперечная составляющая скорости центра масс тягача (квазискорость),  $U$  – ее производная в подвижной системе координат;  $\Omega$  – угловое ускорение относительно вертикальной оси;  $\Phi$  – скорость складывания угла  $\phi$ ;  $\rho\rho$  – угловое ускорение ведомого звена относительно вертикальной оси.

Среди различных теорий качения упругодеформируемых колес наибольшее распространение получила аксиоматика, согласно которой боковая реакция  $Y_i$  полотна дороги, приложенная в центре пятна контакта катящегося упругого колеса, является функцией лишь так называемого угла увода  $\delta_i$ .

Приведенные углы бокового увода колесных осей определяются выражениями

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \theta - \arctg \frac{(u + a\omega)}{v}, \\ \delta_2 &= \arctg \frac{-u + b\omega}{v}, \\ \delta_3 &= \arctg \frac{-u_1 + b_1\omega_1}{v_1}. \end{aligned} \tag{2}$$

Зависимости сил бокового увода, имеющие эмпирическое происхождение [1], можно аппроксимировать выражениями (монотонно возрастающая функция, имеющая характер кривой насыщения):

$$Y_i = k_i \delta_i / \sqrt{1 + (k_i \delta_i / \chi_i Z_i)^2}, \quad (3)$$

где  $Z_i$  – реакции опорной поверхности на осях.

Пренебрегая перераспределением нормальных реакций между боковыми колесами, будем считать боковые колеса каждой оси замененными одним приведенным колесом с центром в середине оси. Тогда

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{1}{l} [mgb - m_2 g \frac{b_1}{L_1} (c-b)], \\ Z_2 &= \frac{1}{l} [mga + m_2 g \frac{b_1}{L_1} (c+a)], \\ Z_3 &= m_2 g \frac{d_1}{L_1}; \quad l = a+b; \quad L_1 = d_1 + b_1. \end{aligned} \quad (4)$$

*Вывод дифференциальных уравнений плоскопараллельного движения седельного автопоезда методом сечений* [3]. Применяя метод сечений, получим следующие уравнения плоскопараллельного движения, в проекциях на оси неизменно связанные со звеньями, для тягача и полуприцепа соответственно.

1. Уравнения движения тягача.

$$\begin{aligned} m(V - u\omega) - X + Y_1 \sin(\theta) &= 0, \\ m(U + v\omega) - Y - Y_1 \cos(\theta) - Y_2 &= 0, \\ J\Omega + Yc - Y_1 a \cos(\theta) + Y_2 b &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

2. Уравнения движения прицепа.

$$\begin{aligned} m_1(V_1 - u_1\omega_1) + X \cos(\phi) - Y \sin(\phi) &= 0, \\ m_1(U_1 + v_1\omega_1) + X \sin(\phi) + Y \cos(\phi) - Y_3 &= 0, \\ J_1\Omega_1 + X d_1 \sin(\phi) + Y d_1 \cos(\phi) + Y_3 b_1 &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Исключая из (5) и (6) внутренние силы  $X, Y$  взаимодействия подсистем, получим систему нелинейных дифференциальных уравнений (7):

– по переменной  $v$ :

$$\begin{aligned} m(V - u\omega) - Y_3 \sin(\phi) + m_1 d_1 PP \sin(\phi) - m_1 d_1 \Omega \sin(\phi) + m_1 d_1 \Phi^2 \cos(\phi) - \\ - 2 m_1 d_1 \Phi \omega \cos(\phi) + m_1 d_1 \omega^2 \cos(\phi) - \omega u m_1 + V m_1 + \omega^2 m_1 c + Y_1 \sin(\theta) &= 0; \end{aligned}$$

– по переменной  $u$ :

$$\begin{aligned} m(U + v\omega) - Y_3 \cos(\phi) + m_1 d_1 PP \cos(\phi) - m_1 d_1 \Omega \cos(\phi) - m_1 d_1 \Phi^2 \sin(\phi) + \\ + 2 m_1 d_1 \Phi \omega \sin(\phi) - m_1 d_1 \omega^2 \sin(\phi) + \omega v m_1 + U m_1 - \Omega m_1 c - Y_1 \cos(\theta) - Y_2 &= 0; \end{aligned} \quad (7)$$

– по переменной  $\omega$ :

$$\begin{aligned} J\Omega - (2 m_1 d_1 \Phi \omega \sin(\phi) - m_1 d_1 \Phi^2 \sin(\phi) - m_1 d_1 \omega^2 \sin(\phi) - m_1 d_1 \Omega \cos(\phi) + \\ + m_1 d_1 PP \cos(\phi) + U m_1 - Y_3 \cos(\phi) - \Omega m_1 c + \omega v m_1) c - Y_1 a \cos(\theta) + Y_2 b &= 0; \end{aligned}$$

– по углу складывания:

$$\begin{aligned} J_1(\Omega - PP) + (Y_3 \sin(\phi) - m_1 d_1 PP \sin(\phi) + m_1 d_1 \Omega \sin(\phi) - m_1 d_1 \Phi^2 \cos(\phi) + \\ + 2 m_1 d_1 \Phi \omega \cos(\phi) - m_1 d_1 \omega^2 \cos(\phi) + \omega u m_1 - V m_1 - \omega^2 m_1 c) d_1 \sin(\phi) - \\ - (2 m_1 d_1 \Phi \omega \sin(\phi) - m_1 d_1 \Phi^2 \sin(\phi) - m_1 d_1 \omega^2 \sin(\phi) - m_1 d_1 \Omega \cos(\phi) + \\ + m_1 d_1 PP \cos(\phi) + U m_1 - Y_3 \cos(\phi) - \Omega m_1 c + \omega v m_1) d_1 \cos(\phi) + Y_3 b_1 &= 0. \end{aligned}$$



Допустим, рассматривается равномерное движение, тогда  $v = \text{const}$ , а значит,  $V = 0$ . Подставив в систему уравнений (7) значение  $V = 0$ , разрешим ее относительно старших производных ( $U, PP, \Omega$ ). Получим систему уравнений в нормальной форме Коши:

$$\begin{aligned} U &= U(u, \omega, \phi, \Phi), \\ \Omega &= \Omega(u, \omega, \phi, \Phi), \\ PP &= PP(u, \omega, \phi, \Phi). \end{aligned} \tag{8}$$

Результаты численного анализа математической модели автопоезда. При выводе уравнений движения и численном интегрировании использовался пакет Maple.

1. Нахождение круговых стационарных режимов движения.

Стационарным решениям (состояниям равновесия, особым точкам, точкам покоя)  $\omega = \text{const}$ ,  $u = \text{const}$ ,  $\phi = \text{const}$  системы (реализуются при  $v = \text{const}$  и  $\theta = \text{const}$ ) отвечают круговые траектории всех точек двухзвенника в плоскости дороги.

Задание параметров системы:

$$\begin{aligned} m &= 6500 \text{ кг}, m_2 = 36500 \text{ кг}, a = 0,4 \text{ м}, b = 3,2 \text{ м}, c = 2,7 \text{ м}, b_1 = 2,8 \text{ м}, d_1 = 5,4 \text{ м}, v = 4,5 \text{ м/с}, \theta = 0,38, \\ k_1 &= 160\,000 \text{ Н}, k_2 = 326\,000 \text{ Н}, k_3 = 365\,000 \text{ Н}, J = 0,35 * m * a * b \text{ кг м}^2, J_2 = 0,8 * m_1 * d_1 * b_1 \text{ кг м}^2, \\ \chi_i &= 0,8, K = 1,5 \text{ м}. \end{aligned}$$

Ниже представлены результаты численного интегрирования модели при значениях управляющих параметров  $v$  и  $\theta$ .

Так, значениям ( $v = 4,8 \text{ м/с}$ ,  $\theta = 0,42 \text{ рад}$ ) и ( $v = 5 \text{ м/с}$ ,  $\theta = 0,38 \text{ рад}$ ) соответствуют круговые стационарные режимы соответственно

$$\{ u^* = 1,141 \text{ м/с}, \omega^* = 0,553 \text{ рад/с}, f^* = 1,178 \text{ рад} \} \text{ и } \{ u^* = 1,062 \text{ м/с}, \omega^* = 0,511 \text{ рад/с}, \phi^* = 0,874 \text{ рад} \},$$

траектория движения центра тяжести тягача в плоскости дороги и конфигурация автопоезда представлены на рисунке 3.

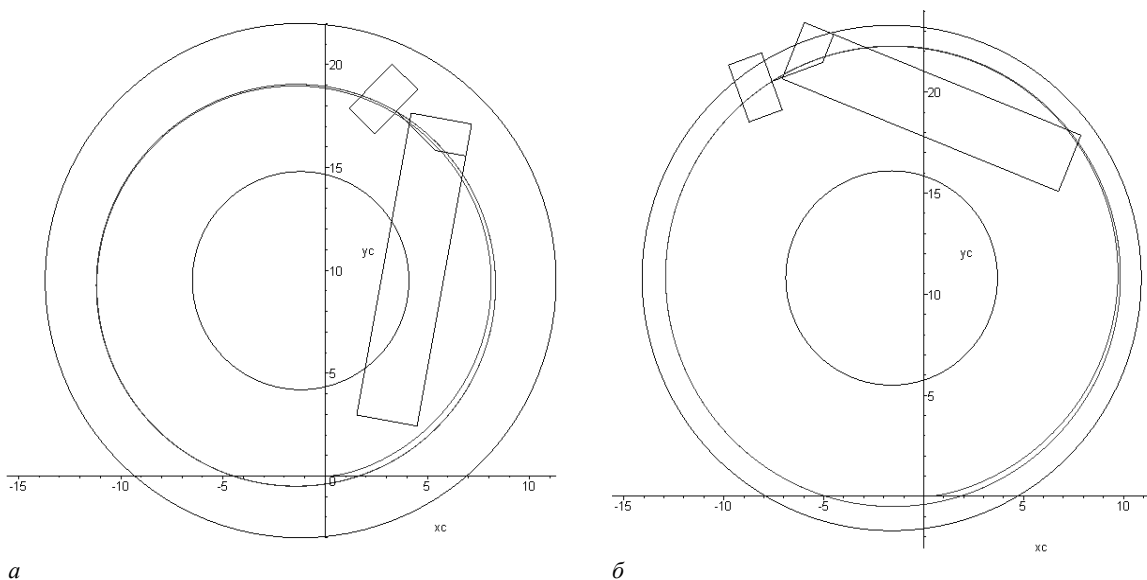
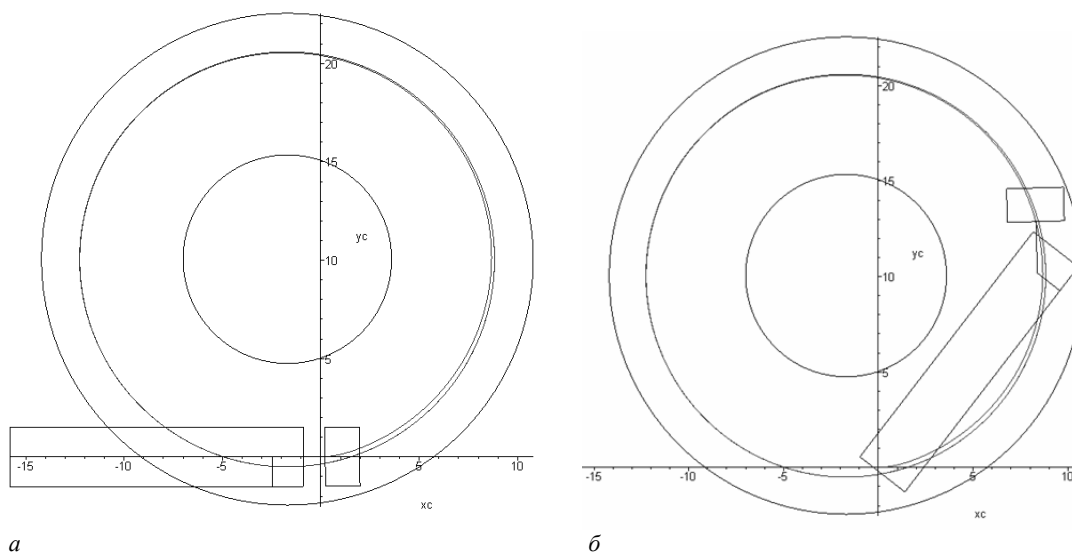


Рисунок 3. – Траектория центра тяжести тягача в плоскости дороги при ( $v = 4,8 \text{ м/с}$ ,  $\theta = 0,42 \text{ рад}$ ) (а), при ( $v = 5 \text{ м/с}$ ,  $\theta = 0,38 \text{ рад}$ ) (б)

На рисунке 3 показаны положения автопоезда при движении по круговому коридору, габариты которого соответствуют стандартам ЕС. Видно, что при заданных управляющих параметрах в первом случае полуприцеп, а во втором случае тягач и полуприцеп выходят за габариты коридора.

Необходимо найти значения параметров  $v$  и  $\theta$ , при которых автопоезд будет проходить круговой коридор, вписываясь в его габариты. Методом последовательных приближений были получены такие значения управляющих параметров:  $v = 4,5 \text{ м/с}$ ,  $\theta = 0,38 \text{ рад}$ .

Рисунок 4 иллюстрирует процесс прохождения автопоездом кругового коридора, габариты которого соответствуют стандартам ЕС.



**а – вхождение в коридор; б – прохождение коридора**

**Рисунок 4. – Прохождение автопоездом кругового коридора  
(габариты коридора соответствуют стандартам ЕС)**

2. Определение области устойчивости прямолинейного режима в пространстве параметров (аналитическое и численное определение критической скорости прямолинейного движения).

Для численного определения критической скорости используется линейное приближение исходной системы и определяется спектр собственных значений при различных значениях скорости. Этот подход дает возможность установить факт устойчивости (неустойчивости) для конкретного набора конструктивных параметров. Метод деления интервала пополам дает возможность определить момент потери устойчивости ( $v_{kr}$ ) [2].

Так, набору параметров

$$\chi_i = 0,8, K = 1,5 \text{ м}, k_1 = 160\,000 \text{ Н}, k_2 = 226\,000 \text{ Н}, k_3 = 270\,000 \text{ Н},$$

$$m = 6500 \text{ кг}, m_2 = 36\,500 \text{ кг}, a = 0,4 \text{ м}, b = 3,2 \text{ м}, c = 2,7 \text{ м}, b_1 = 2,8 \text{ м}, d_1 = 5,4 \text{ м}, v = 4,5 \text{ м/с}, \theta = 0,$$

$$J = 0,35 * m * a * b \text{ кг м}^2, J_2 = 0,8 * m_1 * d_1 * b_1 \text{ кг м}^2$$

при значении  $v = 20 \text{ м/с}$  соответствует спектр собственных значений:

$$\begin{aligned} eigv := & -0.6241640318 + 1.342794302 \quad I, -0.4253230590, -1.932232332, \\ & -0.6241640318 - 1.342794302 \quad I \end{aligned}$$

Корни характеристического уравнения системы в вариациях имеют отрицательные действительные части, поэтому, согласно теореме Ляпунова, прямолинейный режим движения устойчивый.

При  $v = 35 \text{ м/с}$  имеем:

$$\begin{aligned} eigv := & 0.08371808044, -0.3860627656 + 1.512924892 \quad I, -1.372097383, \\ & -0.3860627656 - 1.512924892 \quad I \end{aligned}$$

Один действительный корень положителен – режим неустойчивый.

Следовательно, в интервале скоростей  $20 \text{ м/с} < v < 35 \text{ м/с}$  происходит потеря устойчивости прямолинейного движения; значению  $v_{kr}$ , при котором это происходит, отвечает нулевое собственное значение (так называемый критический случай одного нулевого корня – дивергентная устойчивость). При этом начальные возмущения фазовых переменных растут аperiодически. Случаю пары комплексных собственных значений с нулевой действительной частью соответствует периодический рост начальных возмущений фазовых переменных – флаттерная неустойчивость.

При  $v = 31 \text{ м/с}$ :

$$\begin{aligned} eigv := & 0.0007759302256, -0.4319365867 + 1.490179879 \quad I, -1.463279177, \\ & -0.4319365867 - 1.490179879 \quad I \end{aligned}$$

Один из действительных корней с некоторой степенью точности равен нулю, это означает, что при значении скорости  $v_{kr} = 31 \text{ м/с}$  произошла дивергентная потеря устойчивости.

Аналитическое выражение для определения критической скорости (дивергентная потеря устойчивости) имеет вид:

$$v_{kr} = \sqrt{\frac{k_1 \cdot k_2 \cdot L_1 \cdot l^2}{(m \cdot L_1 + m_1 \cdot b_1)(k_1 \cdot a - k_2 \cdot b) + c \cdot m_1 \cdot b_1 (k_1 + k_2)}} \quad (9)$$

Численное значение критической скорости при выбранных параметрах системы  $v_{kr} = 30,97$  м/с, что подтверждает результаты метода последовательных приближений.

Из выражения (9) следует, что  $v_{kr}$  зависит от некоторых конструктивных параметров. Проанализируем, как изменяется  $v_{kr}$  при варьировании  $L_1$  и  $m_1$ .

Меняя лишь массу полуприцепа, получим следующую зависимость критической скорости (рисунок 5, а).

Приняв  $m_1 = 33\ 000$  кг, определяем, что дивергентная потеря устойчивости наступает при значении  $v_{kr} = 123$  м/с. При некоторых условиях флаттерная потеря устойчивости может произойти раньше, чем дивергентная. Проверим это предположение, определив спектр собственных значений системы при  $v = 120$  м/с:

$$eigv := -0.1835379687 + 1.848346011 I, -0.1439906210 + 0.5802589752 I, \\ -0.1439906210 - 0.5802589752 I, -0.1835379687 - 1.848346011 I$$

Действительные части корней отрицательны, поэтому можно утверждать, что флаттерная потеря устойчивости не наступает, т.е. режим устойчивый.

Спектр собственных значений системы при  $v_{kr} = 123$  м/с:

$$eigv := -0.1431151996 + 1.740754727 I, -0.2982020032 \cdot 10^{-6}, -0.3338362204, \\ -0.1431151996 - 1.740754727 I$$

Один из корней с большой точностью равен нулю.

Изменяя положение центра тяжести полуприцепа, т.е. варьируя отношением  $d_1 / b_1$ , получим следующую зависимость критической скорости (рисунок 5, б).

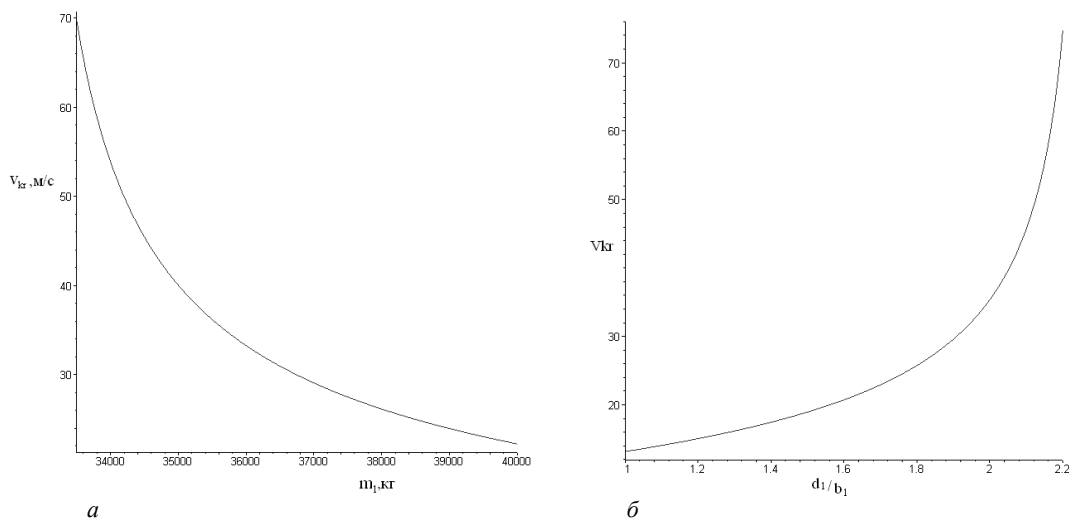


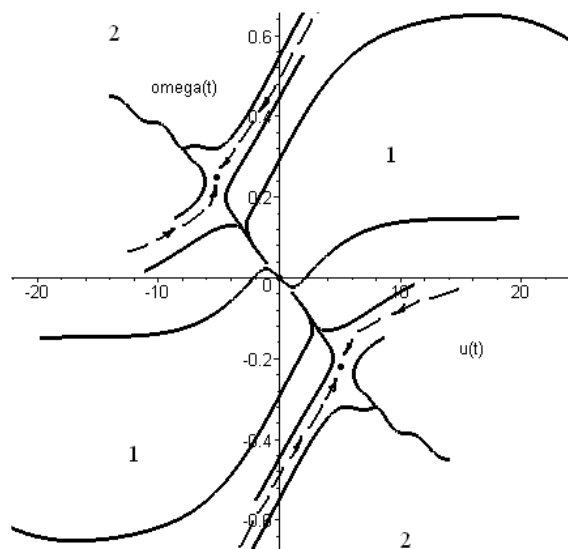
Рисунок 5. – График зависимости  $v_{kr} = f(m_1)$  (а), график зависимости  $v_{kr} = f(d_1 / b_1)$  (б)

Из графика следует, что при приближении центра тяжести полуприцепа к точке сцепки значение критической скорости будет уменьшаться.

Построение фазовых портретов модели (анализ области устойчивости прямолинейного режима). Система (7) при уравновешенных продольных силах ( $X_1 = 0, X_2 = 0, X_3 = 0$ ) допускает очевидное решение  $\{v = \text{const}, u = 0, \omega = 0, \theta = 0, \phi = 0, \Phi = 0\}$ , которое соответствует равномерному прямолинейному движению автопоезда (стационарный прямолинейный режим). Очевидно, все множество стационарных режимов определяется системой (7), в которой нужно положить  $U = 0, \Omega = 0, \Phi = 0, PP = 0$ .

Приняв управляющий параметр системы  $v = 20$  м/с,  $\theta = 0$ , построим фазовый портрет в пространстве переменных  $(u, \omega)$ . Система имеет три стационарных режима, на фазовой плоскости им соответствуют три особые точки: в начале координат устойчивый узел (отвечает прямолинейному режиму) и симметрично расположенные две седловые точки (соответствуют неустойчивым круговым режимам). При увеличении параметра  $v$  седловые особые точки приближаются к началу координат, разрушая устойчивость прямолинейного режима при  $v = v_{kr}$ . Область устойчивости прямолинейного режима ограничивают входящие сепаратрисы седловых особых точек (рисунок 6) [4]. Координаты седловых точек найдены численно с использованием пакета Maple:

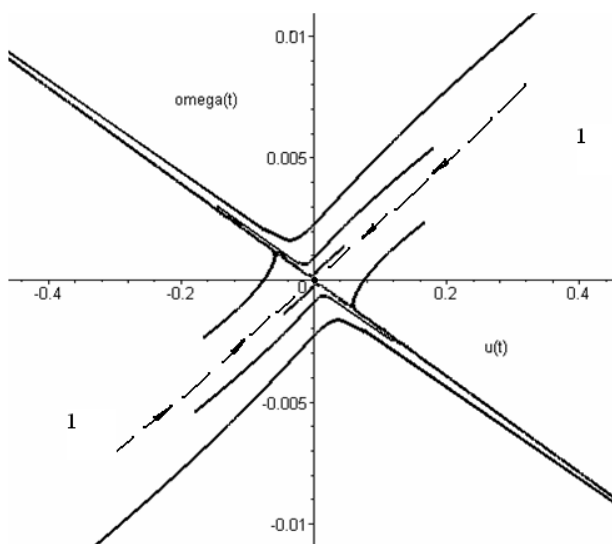
$$(u = -5,279, \phi = -0,0653, \omega = 0,2198), (u = 5,279, \phi = 0,0653, \omega = -0,2198).$$



1 – область устойчивости, 2 – область неустойчивости

Рисунок 6. – Фазовый портрет системы при докритической скорости

Фазовый портрет системы при  $v > v_{kr}$  представлен на рисунке 7. Координаты седловой особой точки  $(u = 0, \phi = 0, \omega = 0)$ .



1 – область неустойчивости

Рисунок 7. – Фазовый портрет системы при закритической скорости

Система имеет один неустойчивый прямолинейный режим движения, ему соответствует седловая особая точка в начале координат; начальные возмущения растут аperiodически, что соответствовало бы явлению заноса. Фазовые переменные в этом случае приближаются к устойчивым сепаратрисам седла.

**Заключение.** Определены условия устойчивости, в частности прямолинейного движения седельного автопоезда, влияние на критическую скорость конструктивных параметров (случай дивергентной неустойчивости). Построены графики зависимости критической скорости от массы полуприцепа и его геометрических параметров. Флаттерная потеря устойчивости при рассматриваемых значениях параметров не обнаружена.

Построены фазовые портреты системы при различных скоростях, позволяющие оценить область притяжения прямолинейного движения. Область ограничена сепаратрисами. С помощью фазовых портретов могут быть оценены начальные значения фазовых переменных, которые приведут к выводу системы из области устойчивости. Реализация начальных возмущений может быть вызвана внешними воздействиями (боковой ветер, удар о бровку проезжей части и т.д.). Для выбранных конструктивных параметров модели определены значения скорости ( $v$ ) и угла поворота управляемых колес ( $\theta$ ), которые обеспечивают прохождение кольцевого габаритного коридора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рокар И. Неустойчивость в механике. – М.: Изд-во иностр. лит., 1959. – 288 с.
2. Лобас Л.Г., Вербицкий В.Г. Качественные и аналитические методы в динамике колесных машин. – Киев: Наук. думка, 1990. – 232 с.
3. Эллис Д.Р. Управляемость автомобиля. – М.: Машиностроение, 1975. – 216 с.
4. Вербицкий В.Г., Лобас Л.Г. Бифуркации и устойчивость стационарных состояний связки катящихся упругодеформированных тел // Приклад. механика. – 1987. – 23, № 8. – С. 101–106.
5. Вербицкий В.Г., Лобас Л.Г. Вещественные бифуркации двухзвенных систем с качением // Приклад. математика и механика. – 1996. – 60, № 3. – С. 418–425.
6. Вербицкий В.Г., Загороднов М.И. Определение и анализ устойчивости круговых стационарных режимов движения модели седельного автопоезда // Вісн. Донец. акад. автомобіль. транспорту: сб. наук. пр. – 2007. – Вып. 1. – С. 10–19.

## REFERENCES

1. Rokar, I. (1959). *Neustoiichivost' v mekhanike*. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoi literatury. (In Russ.)
2. Lobas, L.G. & Verbitskii, V.G. (1990). *Kachestvennye i analiticheskie metody v dinamike kolesnykh mashin*. Kiev: Naukova dumka. (In Russ.)
3. Ellis, D.R. (1975). *Upravlyaemost' avtomobilya*. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.)
4. Verbitskii, V.G. & Lobas, L.G. (1987). Bifurkatsii i ustoichivost' statsionarnykh sostoyanii svyazki katyashchikhsya uprugodeformirovannykh tel. *Prikladnaya mekhanika*, 23(8), 101–106. (In Russ.)
5. Verbitskii, V.G. & Lobas, L.G. (1996). Veshchestvennye bifurkatsii dvukhzvennykh sistem s kacheniem [Journal of Applied Mathematics and Mechanics]. *Prikladnaya matematika i mekhanika [Real bifurcations of two-link rolling systems]*, 60(3), 418–425.
6. Verbitskii, V.G. & Zagorodnov, M.I. (2007). Opredelenie i analiz ustoichivosti krugovykh statsionarnykh rezhimov dvizheniya modeli sedel'nogo avtopoezda [Визначення та аналіз стійкості кругових стаціонарних режимів руху моделі сидельного автопоїзда. = Definition and analysis of stability of circular stationary modes of motion of a model of a road train]. *Vestnik Donetskoi akademii transporta [Вісник донецької академії транспорту. = Bulletin of Donetsk Transport Academy]*, (1), 10–19. (In Russ., abstr. in Ukrainian, abstr. in Engl.)

Поступила 28.06.2024

**DETERMINATION OF MANEUVERABILITY AND ANALYSIS OF STABILITY OF MOVEMENT  
OF A MODEL OF A SADDLE TRUCK TRAIN  
USING MATHEMATICAL MODELING**

**D. MOISYA**  
(Donetsk Academy of Transport)

*The problem of maneuverability of a long-wheelbase truck train consisting of a two-axle tractor and a single-axle semi-trailer has been solved. Phase portraits of the system are constructed at different speeds, which allow us to estimate the area of attraction of rectilinear motion. The issues of stability are considered, in particular, the influence of control parameters ( $\theta, v$ ) on stability (instability).*

**Keywords:** long-wheelbase road train, maneuverability, stability, mathematical model, stationary motion mode, divergent instability, flutter instability, critical speed.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕТИ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

*ДУ СИЧЖОУ, д-р техн. наук, проф. А.О. ЛОБАШОВ,  
д-р техн. наук, проф. Д.В. КАПСКИЙ  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Исследуется проблема определения рациональных параметров сети зарядных станций электромобилей. Проанализированы основные факторы, влияющие на размещение зарядных станций электромобилей. Разработана многоцелевая модель выбора места размещения зарядных станций. Предложена алгоритмическая модель для совершенствования метода «поиска по воробьям», который используется в качестве основы решения задачи определения рациональных параметров сети зарядных станций электромобилей.*

**Ключевые слова:** транспортные системы, электромобили, зарядные станции, алгоритм «поиска по воробьям».

**Введение.** Сегодня в Китае количество автомобилей с электродвигателями стремительно увеличивается, завоевывая все большую популярность у населения. Они являются экологически чистыми и экономичными, т.к. не требуют расхода топлива и не выделяют вредных выбросов. Однако по техническим причинам запас хода электромобиля не очень велик, и для обеспечения непрерывной работы его надлежит своевременно заряжать. В связи с этим возникает потребность в развитии инфраструктуры для зарядки электромобилей. И важной тенденцией ее развития является повышение их эффективности и удобства для пользователей.

Между тем при строительстве современных зарядных станций существует проблема их нерационального расположения, заключающаяся в том, что одна часть зарядных станций используется интенсивно, другая простаивает. Это не только влияет на экономические результаты использования зарядных станций, но и не способствует непрерывной работе электромобилей.

*Цель исследования* – определение рациональных параметров размещения сети зарядных станций электромобилей.

**Основная часть.** *Факторы, влияющие на выбор места установки зарядных станций для электромобилей.* На выбор места для зарядной станции электромобиля влияет множество факторов. Только комплексное рассмотрение всех аспектов может повысить рациональность выбора места для зарядной станции. На опыте многолетней практической работы можно утверждать, что при выборе места для зарядной станции электромобиля в основном учитываются:

1) затраты на строительство. Строительство зарядных станций требует больших затрат: на рабочую силу, оборудование, снос существующих зданий, последующие затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание и т.д. [1]. Только при полном учете всех статей издержек можно добиться того, чтобы зарядная станция удовлетворяла потребностям пользователей и обеспечивала экономическую эффективность использования. Если входная стоимость высока, то это приведет к длительному циклу восстановления инвестированного капитала и, соответственно, повлияет на экономические преимущества зарядной станции. Если низкая – это повлечет уменьшение размера зарядной станции или ее нерациональное расположение, что вызовет понижение уровня сервиса для пользователей [1]. Таким образом, стоимость строительства – один из основных факторов размещения зарядной станции;

2) расстояние зарядки. Современные электромобили имеют небольшой запас хода, поэтому их требуется своевременно заряжать после движения в течение определенного времени. Для достижения этой цели при строительстве зарядных станций следует учитывать расстояние между двумя соседними зарядными станциями, т.е. расстояние зарядки. Если расстояние слишком велико, то снижается возможность вовремя пополнить запасы электроэнергии в автомобиле, что, в свою очередь, влияет на готовность потенциальных клиентов пользоваться зарядной станцией. Если мало – это приведет к растрате зарядных ресурсов, увеличению стоимости строительства зарядных станций и снижению экономической выгоды от использования зарядных станций [2]. Таким образом, при выборе места расположения зарядной станции необходимо учитывать фактор расстояния до нее;

3) удовлетворенность пользователей. Если пользователь зарядной станции, управляющий электромобилем, имеет высокую степень удовлетворенности, это может мотивировать его снова воспользоваться этой станцией для зарядки своего электромобиля, что повысит коэффициент ее использования. Напротив, если пользователь не удовлетворен зарядной станцией, это приведет к снижению эффективности ее использования [3]. Поэтому при строительстве зарядной станции следует обращать внимание на удовлетворенность пользователей, среди которых в основном рассматриваются два аспекта:

– удовлетворенность расстоянием до зарядной станции, т.е. расстояние между пользователем и зарядной станцией соответствует потребностям пользователя. Чем дальше расстояние между ними, тем сложнее пользователю добраться до зарядки [4];

– удовлетворенность временем ожидания зарядки. Если время ожидания из-за очереди затягивается, это с большой вероятностью вызовет недовольство пользователя.

Следует отметить, большое количество зарядных станций в одном районе приведет к дополнительным материальным потерям. Поэтому необходимо обеспечить рациональный баланс между всеми факторами, влияющими на параметры сети зарядных станций [6–11].

*Построение оптимизационной модели для выбора места расположения зарядных станций для электромобилей.* Для решения этой проблемы предлагается принять следующие положения и допущения:

1. Принцип близости. С точки зрения пользователя, чем меньше расстояние между зарядной станцией и точкой спроса пользователя, тем большее предпочтение он будет отдавать ближайшей зарядной станции, т.е. каждая точка спроса определяет выбор ближайшей зарядной станции для зарядки электромобилей [11].

2. Город разделен на небольшие микрорайоны, каждый из которых можно рассматривать как точку спроса, который определяется общим количеством электромобилей в этом микрорайоне.

3. Игнорирование размера и уровня зарядных станций. Все зарядные станции следует рассматривать, как если бы они были одной модели и оснащены постами для быстрой зарядки, с одинаковой мощностью обслуживания на каждой станции и т.д.

4. Расстояние между точкой спроса и зарядной станцией рассматривается как прямая линия без учета фактической конфигурации транспортной сети.

5. В процессе зарядки электромобиля соблюдается принцип «один пост – одна машина», т.е. один пост зарядки может одновременно заряжать только один электромобиль.

6. Строительство и использование зарядных станций не будет мешать окружающей транспортной системе, т.е. не вызовет проблем с пробками.

На основе вышеуказанных факторов и анализа описания проблемы можно построить модель выбора места и компоновки зарядных станций для электромобилей, включающую:

– модель удовлетворенности расстоянием и временем. Из приведенного выше анализа видно, что расстояние зарядки является одним из основных факторов, влияющих на спрос пользователей [13]. Между тем, когда уровень удовлетворенности достигнет предела, спрос на зарядную станцию не будет продолжать расти. Исходя из этого, можно построить модель удовлетворенности пользователей расстоянием и временем:

$$f_i(d_{ij}) = \begin{cases} 0 & d_{ij} > d_{\max} \\ \frac{1}{2} + \cos \left[ \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{d_{\max} - d_{\min}} \left( d_{ij} - \frac{d_{\max} + d_{\min}}{2} \right) \right] & d_{\min} \leq d_{ij} \leq d_{\max} \\ 1 & 0 < d_{ij} \leq d_{\min} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $f_i(d_{ij})$  – модель удовлетворенности расстоянием и временем,  $d_{ij}$  – расстояние между точкой спроса  $i$  и зарядной станцией  $j$ ;  $d_{\min}$  – минимальная удовлетворенность;  $d_{\max}$  – максимальная удовлетворенность;

– модель удовлетворенности временем ожидания. На зарядной станции установлено несколько постов для зарядки. Каждый пост может одновременно заряжать только один автомобиль. Когда на станции нет простаивающих зарядных постов, другим пользователям приходится ожидать их освобождения. Когда время ожидания превысит определенное значение, пользователи будут искать другие зарядные станции. Исходя из этого, можно построить соответствующую модель и получить выражение [13]

$$f(t_j) = \begin{cases} 0 & t_j > t_{\max} \\ \frac{t_{\max} - t_j}{t_{\max} - t_{\min}} & t_{\min} \leq t_j \leq t_{\max} \\ 1 & t_j < t_{\min} \end{cases}, \quad (2)$$

где  $f(t_j)$  – модель удовлетворенности временем ожидания пользователя;  $t_j$  – время ожидания пользователя при выборе зарядной станции  $k$ ;  $t_{\max}$  – максимальное значение времени ожидания;  $t_{\min}$  – минимальное значение времени ожидания.

После объединения двух моделей удовлетворенности можно получить комплексную модель удовлетворенности в виде выражения

$$\max F_1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_i f_i(d_{ij}) Y_{ij} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_i f_i(t_j) Y_{ij}, \quad (3)$$

где  $\max F_1$  – комплексная модель удовлетворенности;  $i$  – порядковый номер точки спроса;  $I$  – обозначает количество всех точек спроса в определенном диапазоне;  $j$  – порядковый номер зарядной станции кандидата;  $J$  – количество всех зарядных станций кандидата;  $q_i$  – количество заявок на зарядку для точки спроса  $i$ ;  $Y_{ij}$  – переменная решения 0–1, например, если точка спроса  $i$  обращается к зарядной станции кандидата  $j$  для получения услуги зарядки, она принимает значение 1, и наоборот, она принимает значение 0;

– модель минимизации затрат. Строительство зарядной станции и последующее управление эксплуатацией и техническим обслуживанием требуют больших затрат. В то же время, снижая эксплуатационные расходы, можно обеспечить более высокую экономическую эффективность зарядной станции [14]. В результате модель минимизации затрат может быть построена после интеграции различных затрат:

$$\min F_2 = \sum_{j=1}^J (O + \beta N_j + \mu N_j^2) \frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} + \alpha \sum_{j=1}^J (O + \beta N_j + \mu N_j^2), \quad (4)$$

где  $\min F_2$  – модель минимизации затрат;  $r_0$  – ставка дисконтирования;  $\mu$  – коэффициент инвестиций в зарядную станцию за весь ее жизненный цикл;  $\alpha$  – коэффициент отношения стоимости эксплуатации и обслуживания к стоимости строительства;  $\beta$  – цена каждой зарядной сваи;  $O$  – постоянные инвестиционные затраты;  $N_j$  – общее количество зарядных свай на станции.

Для того чтобы оптимизационная модель размещения зарядных станций давала точные результаты, необходимо установить разумные ограничения на их использование. К основным аспектам относятся следующие:

1. Зарядная станция должна удовлетворять потребности пользователей электромобилей в зарядке, т.е.

$$Y_{ij} \leq y_j \forall i \in I \forall j \in J, \quad (5)$$

где  $Y_{ij}$  – переменная принятия решения 0–1, которая принимает значение 1, если станция построена в точке  $j$  кандидата на строительство зарядной станции, и 0 в противном случае.

2. Все точки спроса могут быть назначены на соответствующую зарядную станцию, т.е.

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} y_j \geq 1 \forall i \in I, \quad (6)$$

3. Количество постов зарядки зарядной станции находится между максимальным и минимальным количеством постов зарядки, необходимых пользователю, т.е. [15]

$$N_{j \max \min}, \quad (7)$$

где  $N_{\min}$  – обозначает минимальное значение количество постов зарядки, требуемых пользователем;  $N_{\max}$  – максимальное значение количества постов зарядки, требуемых пользователем.

4. Из каждой точки спроса можно посетить только одну зарядную станцию, т.е.

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1 \forall i \in I, \quad (8)$$

5. Общее количество зарядных станций в регионе должно соответствовать фактическим потребностям региона, т.е.

$$\sum_{j \in J} y_j = H, \quad (9)$$

где  $H$  – спрос на зарядные станции в регионе.

*Совершенствование алгоритма «поиска по воробьям» (ISSA) на основе выбора местоположения зарядных станций электромобилей.* Традиционный алгоритм «поиска по воробьям» (SSA) – это алгоритм оптимизации на основе роевого интеллекта, предложенный в 2020 г. [16; 25], обладающий такими характеристиками, как простота структуры, легкость реализации, высокая способность к локальному поиску. Алгоритм «поиска по воробьям» обладает универсальностью и широко используется в различных областях: оптимизация нейронных сетей BP [17]; планирование траектории [17]; обработка изображений [19]; калибровка камер [20]; покрытие беспроводных датчиков [21]; распределение источников питания [22]; оптимальное планирование работы электросетей [23] и другие практические оптимизационные задачи.

Алгоритм «поиска по воробьям» обусловлен кормовой деятельностью воробьев в природе и имитирует групповую кормовую деятельность популяций воробьев, раннее предупреждение и защиту от хищников [24].



Основные правила алгоритма поиска воробья таковы:

1. Воробьи делятся на первооткрывателей и последователей в зависимости от их кормовой позиции. Роли отдельных воробьев постоянно меняются во время кормежки, но пропорция первооткрывателей и последователей в группе фиксирована [25]. Они кормятся рядом с первооткрывателями. Группа воробьев в процессе кормежки наблюдает за безопасностью кормовой среды. Если она небезопасна, то воробей направляется в группу воробьев, чтобы сделать раннее предупреждение для детектора.

2. Направление кормежки популяции воробьев определяется воробьем-находчиком. Воробей, нашедший лучший источник пищи, определяется как находчик, и он выбирает, продолжать ли кормежку в текущем месте или покинуть его, основываясь на состоянии раннего предупреждения популяции.

3. Воробьи, кроме воробья-находчика, являются последователями. Последователи приближаются к находчику, чтобы покормиться, а когда окрестности находчика оказываются переполненными, он улетает кормиться.

4. Во время кормежки часть группы всегда выступает в роли детектора, и воробей-детектор отвечает за раннее предупреждение и сигнализацию всей популяции воробьев в случае опасности [26; 28].

5. Воробьи-разведчики на краю группы будут перемещаться ближе к центру, а воробьи-разведчики в центре – бродить наугад.

Алгоритм «поиска по воробьям», как и другие алгоритмы, имеет недостатки, такие как зависимость от начального решения, уменьшение разнообразия популяций во время итерационного процесса, стагнация и попадание в ловушку локального оптимального решения [28; 30]. Поэтому в данном исследовании для расчета оптимизационной модели размещения зарядных станций электромобилей используется усовершенствованный алгоритм «поиска по воробьям» (ISSA).

В основе алгоритма лежит вычислительный поток [30]:

1. Инициализировать систему, чтобы вернуть параметры, такие как размер популяции  $n$  и количество итераций  $a$ , в исходное состояние.

2. На основе данных о местонахождении и численности воробьев вывести значения адаптации воробьев и путем сравнительного анализа адаптаций определить их оптимальное количество.

3. Среди полученной оптимальной популяции воробьев некоторые воробьи выбраны в качестве первооткрывателей. И на основании этого обновляются позиции.

4. Другие воробьи в оптимальной группе теперь рассматриваются как последователи. И позиции вновь обновляются.

5. Определенное количество воробьев случайным образом выбирается в качестве «бдительных» (воробьи-детекторы) для всей популяции воробьев. Их позиции обновляются.

6. Имеющееся оптимальное решение подвергается вычислительной обработке с помощью стратегии обратного обучения с вариационным возмущением Коши на основе вероятности  $PS$  для получения нового оптимального решения.

7. Необходимо определить, нужно ли обновлять позицию воробья, проанализировав правило жадности.

8. Оценить, соответствует ли информация о положении воробья конечным требованиям. Если нет, вернуться ко второму шагу, чтобы продолжить анализ и расчеты, и, наоборот, завершить весь процесс расчета, чтобы получить окончательный результат.

Весь алгоритм показан на рисунке.

На модели размещения зарядной станции электромобилей в сочетании с алгоритмом «поиска по воробьям» (ISSA) можно определить оптимальное местоположение зарядной станции:

1. В алгоритмической модели добавляются такие параметры, как точки спроса и количество зарядных станций.

2. Инициализация системы для восстановления параметров: пикового числа точек-кандидатов  $H$ , числа популяций  $n$  и числа итерационных вычислений  $a$  до начального состояния.

3. Случайным образом генерировать места расположения популяций воробьев в существующих точках спроса.

4. Путем итерационных вычислений определить значения адаптации воробьев, которые ранжируются в порядке убывания. Воробьи, находящиеся в верхней части списка, выбираются в качестве первооткрывателей, остальные – в качестве последователей.

5. Поиск пищи и постоянное наблюдение за тем, где находится пища.

6. Когда положение первооткрывателя меняется, последователь начинает добывать корм и автоматически обновляет информацию о положении.

7. Выбрать соответствующее количество воробьев, которые будут выступать в роли наблюдателей, и начать собирать информацию об окрестностях.

8. Новое оптимальное решение получается путем возмущения вокруг оптимального решения с помощью обратного обучения с возмущением по варианту Коши.

9. Проанализировать, соответствует ли количество итерационных вычислений требованиям заданного значения. Если нет – вернуться к четвертому шагу для продолжения вычислений, если соответствует – завершить вычисления. Полученный результат будет оптимальным расположением зарядной станции.

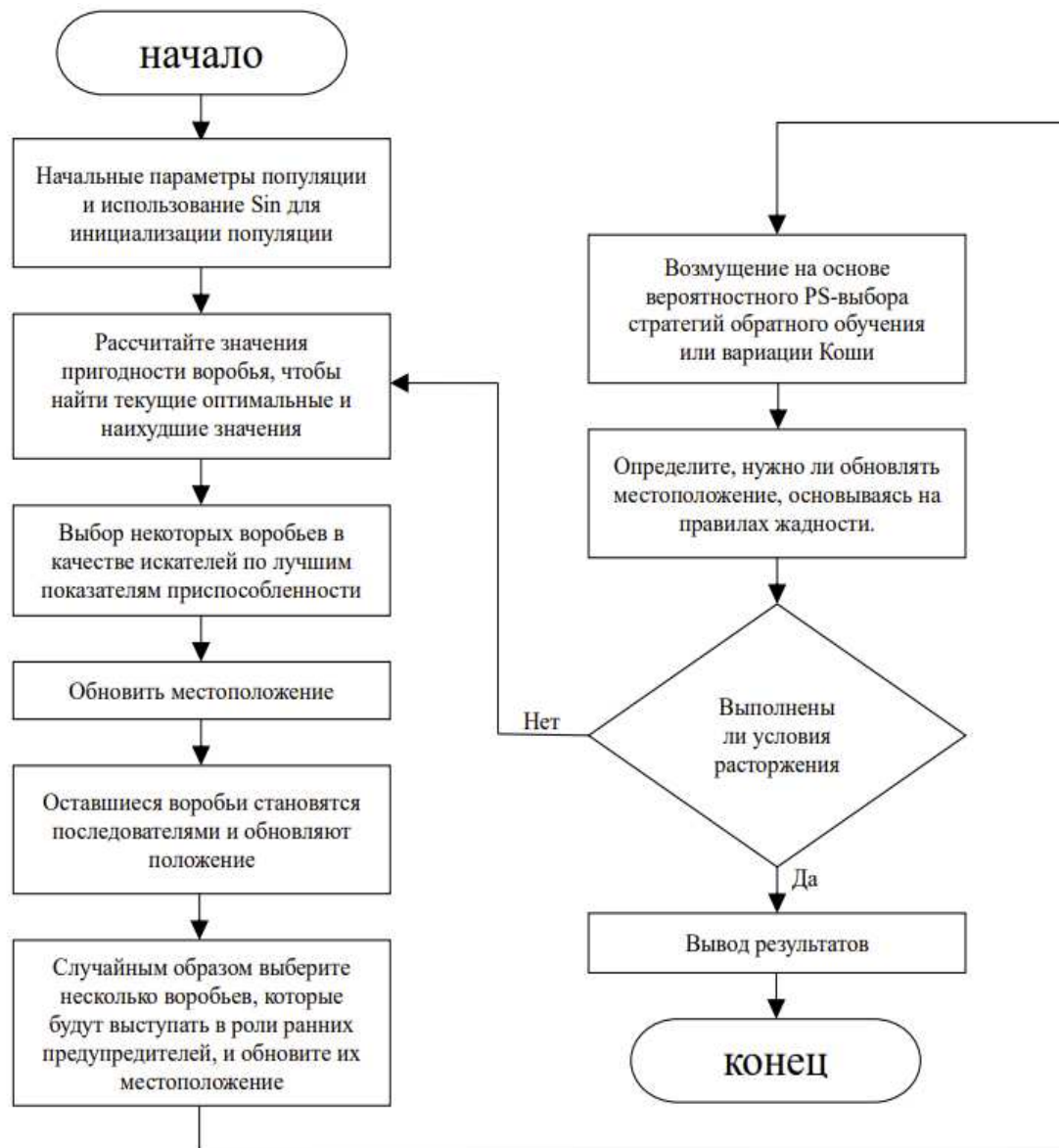


Рисунок. – Блок-схема усовершенствованного алгоритма ISSA

Усовершенствованный алгоритм «поиска по воробьям» (ISSA) вводит рефракционное обратное обучение при инициализации популяции для повышения качества начальной популяции воробьев [31], сохраняет скорость сходимости традиционного алгоритма «поиска по воробьям» и вводит вариационную стратегию Коши для повышения способности алгоритма выходить из локальных экстремумов. Он эффективно улучшает число решений регрессионной модели и точно регулирует количество необходимых станций зарядки чистых электромобилей в числе решений с простым алгоритмическим процессом и быстрой скоростью сходимости.

**Заключение.** Таким образом, предложена модель усовершенствованного алгоритма «поиска по воробьям» (ISSA), которая обеспечивает повышение точности прогнозирования расположения зарядных станций электромобилей. Усовершенствованный алгоритм «поиска по воробьям» (ISSA) позволяет избавиться от ограничений, связанных с локальными экстремумами, и обладает большей практичностью, высокой точностью оптимизации и скоростью сходимости по сравнению с традиционным алгоритмом «поиска по воробьям».

Автомобильные зарядные станции – важная составляющая развития электромобильности и перехода к низкоуглеродной экономике. В ближайшие годы ожидается рост их количества, эффективности, удобства, экологичности и интеграции с возобновляемыми источниками энергии, что будет способствовать расширению рынка электромобилей, а также улучшению качества жизни и окружающей среды.

Благодаря применению этой модели алгоритма можно достаточно быстро определить места рационального расположения зарядных станций.

Дальнейшие исследования представляется целесообразным посвятить практической проверке разработанного усовершенствованного алгоритма «поиска по воробьям» (ISSA) для решения задач определения радио-

нальной сети зарядных станций электромобилей. Необходимо также произвести сравнительный анализ точности и эффективности разработанной модели с другими традиционными моделями решения аналогичных задач.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Automobile Industry under China's Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals: Challenges, Opportunities, and Coping Strategies / F. Zhao, X. Liu, H. Zhang et al. // *Journal of Advanced Transportation*. – 2022. – № 2022(1). – P. 1–13. DOI: 10.1155/2022/5834707
2. Electric Car Battery: An Overview on Global Demand, Recycling and Future Approaches Towards Sustainability / L.S. Martins, L.F. Guimarães, A.B.B. Junior et al. // *Journal of Environmental Management*. – 2021. – № 295. – P. 113091. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113091
3. Cao L. Research on the Development and Application of Charging Piles Based on the Development of New Energy Vehicles // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – № 565(1). – P. 012001. DOI: 10.1088/1755-1315/565/1/012001
4. Pal A, Bhattacharya A, Chakraborty A K. Allocation of Electric Vehicle Charging Station Considering Uncertainties // *Sustainable Energy, Grids and Networks*. – 2021. – № 25. – P. 100422. DOI: 10.1016/j.segan.2020.100422
5. Bae S., Kwasinski A. Spatial and Temporal Model of Electric Vehicle Charging Demand // *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 2012. – № 3(1). – P. 394–403. DOI: 10.1109/TSG.2011.2159278
6. Xu H., Huang X. A Multi-Objective Coordinated Charging and Discharging Strategy for Electric Vehicles Based on Stackelberg Game // *Energy and Power Engineering*. – 2020. – № 12(04). – P. 63. DOI: 10.4236/epe.2020.124B007
7. Mehrjerdi H., Hemmati R. Stochastic model for electric vehicle charging station integrated with wind energy // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. – 2020. – № 37. – P. 157–177. DOI: 10.1016/j.seta.2019.100577
8. Integrated optimal dispatching strategy considering power generation and consumption interaction / Z. Liu, Z. Xiao, Y. Wu et al. // *IEEE Access*. – 2020. – № 9. – P. 1338–1349.
9. Wu W., Lin Y., Liu R. Online EV charge scheduling based on time-of-use pricing and peak load minimization: Properties and efficient algorithms // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2020. – № 23(1). – P. 572–586. DOI: 10.1109/TITS.2020.3014088
10. Optimal EV charging scheduling by considering the limited number of chargers / J. Liu, G. Lin, S. Huang et al. // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. – 2020. – № 7(3). – P. 1112–1122. DOI: 10.1109/TTE.2020.3033995
11. Optimal dynamic scheduling of electric vehicles in a parking lot using particle swarm optimization and shuffled frog leaping algorithm / G.S. Fernandez, V. Krishnasamy, S. Kuppasamy et al. // *Energies*. – 2020. – № 13(23). – P. 6384. DOI: 10.3390/en13236384
12. A novel consumer-friendly electric vehicle charging scheme with vehicle to grid provision supported by genetic algorithm based optimization / S. Abdullah-Al-Nahid, T.A. Khan, M.A. Taseen et al. // *Journal of Energy Storage*. – 2022. – № 50. – P. 104655. DOI:10.1016/j.est.2022.104655
13. Rahmani-Andebili M., Bonamente M., Miller J.A. Mobility Analysis of Plug-in Electric Vehicles in San Francisco Applying Monte Carlo Markov Chain // *2020 IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC) / Manhattan, KS, USA (13–14 July 2020)*. – IEEE, 2020. – P. 1–6. DOI: 10.1109/KPEC47870.2020.9167668
14. Methodology to evaluate the impact of electric vehicles on electrical networks using Monte Carlo / D. Betancur, L.F. Duarte, J. Revollo et al. // *Energies*. – 2021. – № 14(5). – P. 1300. DOI: 10.3390/en14051300
15. Anand M.P., Bagen B., Rajapakse A. Probabilistic reliability evaluation of distribution systems considering the spatial and temporal distribution of electric vehicles // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2020. – № 117. – P. 105609. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105609
16. Meng Z., Pan J.S. QUasi-Affine TRansformation Evolution with External ARchive (QUATRE-EAR): an enhanced structure for differential evolution // *Knowledge-Based Systems*. – 2018. – № 155. – P. 35–53. DOI: 10.1016/j.knsys.2018.04.034
17. Mirjalili S., Lewis A. The whale optimization algorithm // *Advances in engineering software*. – 2016. – № 95. – P. 51–67. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2016.01.008
18. Integration of Computer Vision and IOT Into an Automatic Driving Assistance System for “Electric Vehicles” / S. Du, J. Zhang, Y. Wang et al. // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2024. – Vol. 20, No. 3. – P. 4765–4772.
19. Kathirolu P, Selvadurai K. Energy efficient cluster head selection using improved Sparrow Search Algorithm in Wireless Sensor Networks[J]. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2022, 34(10): 8564-8575. DOI: 10.1016/j.jksuci.2021.08.031
20. Zhang G., Zhang E. A random opposition-based sparrow search algorithm for Path Planning Problem // *Artificial Intelligence: First CAAI International Conference, CICA 2021 / Hangzhou, China (June 5–6, 2021). Part II 1*. – Springer International Publishing, 2021. – P. 408–418. DOI: 10.1007/978-3-030-93049-3\_34
21. Yang X.S., Deb S. Engineering optimisation by cuckoo search // *J. Math. Modell. Numer. Optim.* – 2010. – Vol. 1, No. 4. – P. 330–343. DOI: 10.48550/arXiv.1005.2908
22. Ghamami M., Nie Y., Zockaie A. Planning charging infrastructure for plug-in electric vehicles in city centers // *International Journal of Sustainable Transport*. – 2016. – № 10. – P. 343–353.
23. Mirjalili S. SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems // *Knowledge-Based Syst.* – 2016. – Vol. 96. – P. 120–133.
24. Harris hawks optimization: Algorithm and applications / A.A. Heidari, S. Mirjalili, H. Faris et al. // *Future Generat. Comput. Syst.* – 2019. – Vol. 97. – P. 849–872. DOI: 10.1016/j.future.2019.02.028
25. Jain M., Singh V., Rani A. A novel nature-inspired algorithm for optimization: Squirrel search algorithm // *Swarm Evoluti. Comput.* – 2019. – Vol. 44. – P. 148–175. DOI: 10.1016/j.swevo.2018.02.013
26. Fathollahi-Fard A.M., Hajiaghahi-Keshteli M., Tavakkoli-Moghaddam R. Red deer algorithm (RDA): a new nature-inspired meta-heuristic // *Soft Comput.* – 2020. – Vol. 24. – P. 14637–14665. DOI: 10.1007/s00500-020-04812-z

27. Optimal location of battery electric vehicle charging stations in urban areas: A new approach / D.A. Gimenez-Gaydou, A.N. Ribeiro, J. Gutierrez et al. // *International Journal of Sustainable Transport*. – 2016. – № 10. – P. 393–405. DOI: 10.1080/15568318.2014.961620
28. Braik M., Sheta A., Al-Hiary H. A novel meta-heuristic search algorithm for solving optimization problems: capuchin search algorithm // *Neural Comput. Appl.* – 2021. – Vol. 33. – P. 2515–2547. DOI: 10.1007/s00521-020-05145-6
29. Aquila optimizer: a novel metaheuristic optimization algorithm / L. Abualigah, D. Yousefi, M. Abd Elaziz et al. // *Comput. Indust. Engin.* – 2021. – Vol. 157. – P. 107250. DOI:10.1016/j.cie.2021.107250
30. Braik M.S. Chameleon Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for solving engineering design problems // *Expert Syst. Appl.* – 2021. – Vol. 174. – P. 114685. DOI:10.1016/j.eswa.2021.114685
31. Aptenodytes forsteri optimization: Algorithm and applications / Z. Yang, L. Deng, Y. Wang et al. // *Knowledge-Based Syst.* – 2021. – Vol. 232. – P. 107483. DOI:10.1016/j.knsys.2021.107483
32. Optimal Location of Charging Stations for Electric Vehicles in a Neighborhood in Lisbon, Portugal / I. Frade, A. Ribeiro, G. Goncalves et al. // *Transportation Research Record*. – 2011. – № 2. – P. 91–98. DOI:10.3141/2252-12
33. Ду Сячжоу, Капский Д.В., Лобашов А.О. Анализ преимуществ и недостатков методов восполнения энергии для зарядных станций электромобилей // *Современные технологии в транспортной отрасли: электрон. сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. / Новополоцк (25–26 апр. 2024 г.) / Полоц. гос. ун-т имени Евфросинии Полоцкой*. – Новополоцк, 2024. – С. 122–124.

## REFERENCES

1. Zhao, F., Liu, X., Zhang, H. & Liu, Z. (2022). Automobile Industry under China's Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals: Challenges, Opportunities, and Coping Strategies. *Journal of Advanced Transportation*, 2022(1), 1–13. DOI: 10.1155/2022/5834707
2. Martins, L.S., Guimarães, L.F., Junior, A.B.B., Tenório, J.A.S. & Espinosa, D.C.R. (2021). Electric Car Battery: An Overview on Global Demand, Recycling and Future Approaches Towards Sustainability. *Journal of Environmental Management*, (295), 113091. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113091
3. Cao, L. (2020). Research on the Development and Application of Charging Piles Based on the Development of New Energy Vehicles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 565(1), 012001. DOI: 10.1088/1755-1315/565/1/012001
4. Pal, A., Bhattacharya, A. & Chakraborty, AK. (2021). Allocation of Electric Vehicle Charging Station Considering Uncertainties. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, (25), 100422. DOI: 10.1016/j.segan.2020.100422
5. Bae, S. & Kwasinski, A. (2012). Spatial and Temporal Model of Electric Vehicle Charging Demand. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1), 394–403. DOI: 10.1109/TSG.2011.2159278
6. Xu, H. & Huang, X. (2020). A Multi-Objective Coordinated Charging and Discharging Strategy for Electric Vehicles Based on Stackelberg Game. *Energy and Power Engineering*, 12(04), 63. DOI:10.4236/epe.2020.124B007
7. Mehrjerdi, H. & Hemmati, R. (2020). Stochastic model for electric vehicle charging station integrated with wind energy. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, (37), 157–177. DOI: 10.1016/j.seta.2019.100577
8. Liu, Z., Xiao, Z., Wu, Y., Hui, H., Tao, X., Qingyong, Z. & Changjun, X. (2020). Integrated optimal dispatching strategy considering power generation and consumption interaction. *IEEE Access*, (9), 1338–1349.
9. Wu, W., Lin, Y. & Liu, R. (2020). Online EV charge scheduling based on time-of-use pricing and peak load minimization: Properties and efficient algorithms. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(1), 572–586. DOI: 10.1109/TITS.2020.3014088
10. Liu, J., Lin, G., Huang, S. & Zhou, Ya. (2020). Optimal EV charging scheduling by considering the limited number of chargers. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7(3), 1112–1122. DOI: 10.1109/TTE.2020.3033995
11. Fernandez, G.S., Krishnasamy, V., Kuppusamy, S., Jagabar, S. Ali, Ziad, M. Ali, El-Shahat, A. & Abdel Aleem, Shady H.E. (2020). Optimal dynamic scheduling of electric vehicles in a parking lot using particle swarm optimization and shuffled frog leaping algorithm. *Energies*, 13(23), 6384. DOI: 10.3390/en13236384
12. Abdullah-Al-Nahid, S., Khan, T.A., Taseen, M.A. & Taskin, J. (2022). A novel consumer-friendly electric vehicle charging scheme with vehicle to grid provision supported by genetic algorithm based optimization. *Journal of Energy Storage*, (50), 104655. DOI:10.1016/j.est.2022.104655
13. Rahmani-Andebili, M., Bonamente, M. & Miller, J.A. (2020). Mobility Analysis of Plug-in Electric Vehicles in San Francisco Applying Monte Carlo Markov Chain. *IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC)* [Manhattan, KS, USA (13–14 July 2020)], 1–6. DOI: 10.1109/KPEC47870.2020.9167668
14. Betancur, D., Duarte, L.F., Revollo, J., Restrepo, C., Diez, A.E., Isaac, I.A. ... Gonzalez, J.W. (2021). Methodology to evaluate the impact of electric vehicles on electrical networks using Monte Carlo. *Energies*, 14(5), 1300. DOI: 10.3390/en14051300
15. Anand, M.P., Bagen, B. & Rajapakse, A. (2020). Probabilistic reliability evaluation of distribution systems considering the spatial and temporal distribution of electric vehicles. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, (117), 105609. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105609
16. Meng, Z. & Pan, J.S. (2018). QUasi-Affine TRansformation Evolution with External ARchive (QUATRE-EAR): an enhanced structure for differential evolution. *Knowledge-Based Systems*, (155), 35–53. DOI: 10.1016/j.knsys.2018.04.034
17. Mirjalili, S. & Lewis, A. (2016). The whale optimization algorithm. *Advances in engineering software*, (95), 51–67. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2016.01.008
18. Du, S., Zhang, J., Wang, Y. & Li, Z. (2024). Integration of Computer Vision and IOT Into an Automatic Driving Assistance System for "Electric Vehicles". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 20(3), 4765–4772.
19. Kathirolu, P. & Selvadurai, K. (2022). Energy efficient cluster head selection using improved Sparrow Search Algorithm

- in Wireless Sensor Networks. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 34(10), 8564–8575. DOI: 10.1016/j.jksuci.2021.08.031
20. Zhang, G. & Zhang, E. (2021). A random opposition-based sparrow search algorithm for Path Planning Problem. *Artificial Intelligence: First CAAI International Conference [CICAI 2021, Hangzhou, China, June 5–6, 2021]*, Part II 1, 408–418. DOI: 10.1007/978-3-030-93049-3\_34
  21. Yang, X.S. & Deb, S. (2010). Engineering optimization by cuckoo search. *J. Math. Modell. Numer. Optim.*, 1(4), 330–343. DOI: 10.48550/arXiv.1005.2908
  22. Ghamami, M., Nie, Y. & Zockaie, A. (2016). Planning charging infrastructure for plug-in electric vehicles in city centers. *International Journal of Sustainable Transport*, (10), 343–353. DOI: 10.1080/15568318.2014.937840
  23. Mirjalili, S. (2016). SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems. *Knowledge-Based Syst.*, (96), 120–133.
  24. Heidari, A.A., Mirjalili, S., Faris, H. & Mafarja, M. (2019). Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Future Generat. Comput. Syst.*, (97), 849–872. DOI: 10.1016/j.future.2019.02.028
  25. Jain, M., Singh, V. & Rani, A. (2019). A novel nature-inspired algorithm for optimization: Squirrel search algorithm. *Swarm Evoluti. Comput.*, (44), 148–175. DOI: 10.1016/j.swevo.2018.02.013
  26. Fathollahi-Fard, A.M., Hajiaghayi-Keshmeli, M. & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2020). Red deer algorithm (RDA): a new nature-inspired meta-heuristic. *Soft Comput.*, (24), 14637–14665. DOI: 10.1007/s00500-020-04812-z
  27. Gimenez-Gaydou, D.A., Ribeiro, A.N., Gutierrez, J. & Antunes, A.P. (2016). Optimal location of battery electric vehicle charging stations in urban areas: A new approach. *International Journal of Sustainable Transport*, (10), 393–405. DOI: 10.1080/15568318.2014.961620
  28. Braik, M., Sheta, A. & Al-Hiary, H. (2021). A novel meta-heuristic search algorithm for solving optimization problems: capuchin search algorithm. *Neural Comput. Appl.*, (33), 2515–2547. DOI: 10.1007/s00521-020-05145-6
  29. Abualigah, L., Yousri, D., Abd, Elaziz M., Ewees, A.A., Al-qaness, Mohamed A.A. & Gandomi, Amir H. (2021). Aquila optimizer: a novel metaheuristic optimization algorithm. *Comput. Indust. Engin.*, (157), 107250. DOI:10.1016/j.cie.2021.107250
  30. Braik, M.S. (2021). Chameleon Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for solving engineering design problems. *Expert Syst. Appl.*, (174), 114685. DOI:10.1016/j.eswa.2021.114685
  31. Yang, Z., Deng, L., Wang, Y. & Liu, J. (2021). Aptenodytes forsteri optimization: Algorithm and applications. *Knowledge-Based Syst.*, (232), 107483. DOI:10.1016/j.knosys.2021.107483
  32. Frade, I., Ribeiro, A., Goncalves, G. & Antunes, A. (2011). Optimal Location of Charging Stations for Electric Vehicles in a Neighborhood in Lisbon, Portugal. *Transportation Research Record*, (2), 91–98. DOI:10.3141/2252-12
  33. Du, Sizhuo, Kapski, D.V. & Lobashov, A.O. (2024). Analiz preimuchestv i nedostatkov vospolneniya energii dlya zaryadnykh stanciy elctromobiley. *Sovremenyte tehnologii v transportnoy otrasly: electron. sb. st. Mezhdunar. nauch.-techn. konf.* [Novopolotsk, 25-26 apr. 2024 g.], 122–124. (In Russ.)

Поступила 26.06.2024

## DETERMINATION OF RATIONAL PARAMETERS FOR A NETWORK OF CHARGING STATIONS FOR ELECTRIC VEHICLES

*DU SIZHUO, A. LOBASHOV, D. KAPSKI*  
(Belarusian National Technical University, Minsk)

*This article examines the problem of determining rational parameters for a network of electric vehicle charging stations. The main factors influencing the placement of electric vehicle charging stations are analyzed. A multi-purpose model for choosing the location of charging stations has been developed. An algorithmic model is proposed to improve the sparrow search method, which is used as the basis for solving the problem of determining the rational parameters of a network of electric vehicle charging stations.*

**Keywords:** transport systems, electric vehicles, charging stations, sparrow search algorithm.

## ТЕРМИН «КОНФЛИКТ» В СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

*канд. техн. наук А.А. СУШКО*  
(Академия МВД Республики Беларусь, Минск)  
*д-р техн. наук, доц. А.Г. БАХАНОВИЧ*  
(Министерство образования Республики Беларусь, Минск)

*Дано определение термина «конфликт» как социального взаимодействия в форме конкурентной борьбы на проезжей части в проблемной дорожно-транспортной ситуации между участниками дорожного движения. Установлены фазы возникновения и развития конфликта. Конфликтный участок на дороге начинается от точки возникновения проблемной ситуации до конфликтной точки, в которой происходит ДТП. На участке дороги между этими точками имеет место конкурентная борьба между участниками дорожного движения за одновременное нахождение на одном и том же участке проезжей части. На этом же участке между участниками конфликта последовательно происходит инцидент, а затем эскалация конфликта. На конфликтном участке имеет место межличностный конфликт между участниками дорожного движения как субъектами. Предложено понятие конфликта применительно к системе обеспечения безопасности дорожного движения закрепить в правовом поле.*

**Ключевые слова:** *безопасность дорожного движения, конфликт, участник дорожного движения, правила дорожного движения.*

**Введение.** В дорожном движении вопрос единства терминологии особенно актуален по причине тесного переплетения правовых и технических аспектов.

Термин «конфликт» и словосочетания с ним применительно к дорожному движению требуют системного подхода, толкования и ранжирования в перечне применяемых понятий, поскольку удачные термины могут способствовать развитию науки, а неудачные – тормозить развитие научных знаний [1, с. 82].

Так, например, в постановлении<sup>1</sup> конфликтный участок определяется как «участок проезжей части, в пределах которого транспортный поток может разделяться на несколько направлений, пересекать пути движения других участников (дорожного) движения или в пределах которого изменяется ширина проезжей части». Подчеркнем, что здесь и далее под участниками дорожного движения понимаются только водители и пешеходы.

Иными словами, конфликтный участок – это:

- перекресток (поток транспортных средств (далее – ТС, может разделяться на несколько направлений);
- перекресток, пешеходный переход, велосипедный проезд (поток ТС может пересекать пути движения других участников дорожного движения);
- линейный участок дороги (Д), на котором изменяется ширина проезжей части (увеличение или уменьшение числа полос движения), что ведет к перестроению ТС из одной полосы в другую и слиянию (наложению) или пересечению их траекторий движения.

Отметим, что далее слияние (наложение) будем рассматривать как частный случай пересечения, когда угол между траекториями движения объектов стремится к нулю.

Поскольку «понятие – это элемент мышления, представляющий черты (признаки), общие ряду объектов» [2, с. 34], необходимо обратить внимание на отсутствие в понятии «конфликтный участок» в постановлении<sup>1</sup> такого объекта, как перекресток. В пределах перекрестка поток ТС может не только разделяться на несколько направлений<sup>1</sup>, но и собираться из нескольких направлений.

Учитывая, что поток ТС, как и поток пешеходов, не может быть удовлетворительно описан математической моделью движения жидкости, следует очень избирательно применять к дорожному движению терминологию из гидравлики.

До конфликтного участка ТС и пешеходы движутся каждый по своей траектории как объекты, однако на ограниченном участке проезжей части (конфликтном участке) их траектории движения могут пересечься (траектории ТС пересекаются как между собой, так и с траекторией движения пешехода). Точка пересечения траекторий движения объектов в учебной дисциплине «Организация дорожного движения» (далее – ОДД) получила название «конфликтной». Точки конфликта в ОДД рассматриваются в рекомендациях<sup>2</sup> и [3].

<sup>1</sup> Постановление Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь от 05.12.2022 г. № 100 «Об утверждении и введении в действие строительных правил и признании утратившим силу технического кодекса установившейся практики». – URL: <https://e.expert.by/test/doc/336338?links=202906>

<sup>2</sup> Методические рекомендации по созданию организаций, уполномоченных в сфере ОДД от 13.11.2020 г. Распоряжение Минтранса РФ от 21.03.2022 № АК-74р.

**Основная часть.** Общепризнанным считается подход, в котором обеспечение безопасности дорожного движения (далее – БДД) анализируется в системе водитель–автомобиль–дорога–среда движения (ВАДС) [4]. Здесь необходимо указать, что водитель (далее – Чв) управляет не только автомобилем (А), воздействуя на его органы управления при движении по Д в определенной среде движения (далее – Сд), но и любым другим ТС, перечисленным и допущенным<sup>3</sup> к участию в дорожном движении.

В общем случае система БДД может быть обозначена Чв–ТС–Д–Сд. Следует добавить, что автором под Д понимается термин<sup>3</sup> [пп. 2.15, 2.55], в частности, геометрические параметры и конструкция ее проезжей части.

Под Сд понимается:

– погода, которую характеризуют такие метеорологические элементы, как состояния атмосферы и атмосферных процессов: температура, давление, влажность воздуха, ветер, облачность и осадки, туманы, грозы, продолжительность солнечного сияния, температура и состояние почвы, высота и состояние снежного покрова и другие аналогичные факторы;

– технические средства организации дорожного движения (далее – ТСОДД<sup>3</sup> [п. 2.65]).

Модель Чв–ТС–Д–Сд адекватно описывает дорожно-транспортную ситуацию (далее – ДТС), в которой один водитель управляет ТС и движется по Д в определенной Сд. Больше на проезжей части Д водителей и пешеходов нет. Водитель, воспринимая изменяющуюся в ходе движения ДТС (Д, Сд и положение ТС относительно границ проезжей части), воздействует соответствующим образом на органы управления ТС. В свою очередь ТС воздействует колесами на Д, а Д – на колеса ТС и на водителя через подвеску и кузов ТС. Также через ТС (через ветровое стекло ТС) водитель визуально воспринимает Сд.

Для обеспечения БДД водитель может изменить положение ТС относительно границ проезжей части Д, но не может изменить положение ТС относительно Сд, в которой он движется.

Применительно к дорожному движению источником конфликта Чв–Сд является противоречие между требованиями к результату, который показывает водитель по результатам решения задач в определенной ДТС, и его психофизиологическими возможностями при восприятии Сд через ТС и Д. Особенно часто такие конфликты возникают при решении водителем задач в сложных ДТС: темное время суток; недостаточная видимость в направлении движения; осадки; ограниченная обзорность Д и иные аналогичные факторы. Фактически имеет место конфликт «человек–машина». Конфликты такого рода изучает инженерная психология.

При решении задач инженерной психологии ставится цель максимально возможного приближения машины, т.е. ТС, к водителю, т.е. Чв, путем учета его возможностей и в его приспособлении к ТС при реализации следующих сценариев: профессиональный отбор; обучение; тренировка. При этом речь идет о взаимной адаптации человека и техники. Многочисленная армия конструкторов работает над приспособлением ТС к водителю, у которого имеет место минимальный профессиональный уровень компетенций для управления им и участия в дорожном движении. В среде инженерных психологов существует обоснованное мнение, что только приспособление техники к человеку или, наоборот, человека к технике проблему конфликта «человек–машина» не решает [5; 6].

Отметим, что в конфликте Чв–ТС водитель при решении задачи обеспечения БДД в определенной ДТС может изменять последнюю путем воздействия на органы управления ТС. В ДТС ТС – это всего лишь инструмент, с помощью которого можно влиять на складывающуюся ситуацию, т.е. изменить положение ТС относительно границ проезжей части. Конфликт отсутствует, если в ДТС водитель может своевременно изменить положение ТС относительно границ проезжей части и расположить его вне точки конфликта. Конфликт заканчивается дорожно-транспортным происшествием (далее – ДТП<sup>3</sup> [п. 2.18]), если в ДТС водитель не может своевременно изменить положение ТС и оно оказывается в точке конфликта.

В конфликте Чв–ТС имеет место конфликт «человек–машина (инструмент)»: сложный, энергонасыщенный, в меру эргономичный, но инструмент, как средство для перевозки пассажиров и грузов. Для обеспечения БДД в рассматриваемой ДТС водитель должен своевременно и определенным образом (вне точки конфликта) расположить ТС на ограниченном во времени участке проезжей части.

Модель Чв–ТС–Д–Сд удовлетворительно описывает механизм ДТП с участием одного ТС: опрокидывание на проезжей части Д; выезд за пределы проезжей части; столкновение с дорожным окружением с опрокидыванием или без такового.

При появлении на проезжей части второго человека, например, пешехода (Чп), его движение, по аналогии, может рассматриваться в системе Чп–Д–Сд. Но в какой-то момент времени Чп и Чв на ТС окажутся на ограниченном участке проезжей части, где их траектории движения могут пересечься. С этого момента система для обеспечения БДД будет включать в себя две подсистемы Чв–ТС–Д–Сд и Чп–Д–Сд, которые неминуемо

---

<sup>3</sup> Указ Президента Респ. Беларусь, 28 нояб. 2005 г. № 551 «О мерах по повышению безопасности дорожного движения» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. Беларусь. – Минск, 2024.

должны вступить во взаимодействие. Такое взаимодействие возможно при движении пешехода навстречу, попутно или в пересекаемом направлении относительно движущегося ТС на ограниченном участке проезжей части. С этого момента обеспечение БДД уже необходимо будет рассматривать в системе Чв–Чп–ТС–Д–Сд.

Аналогичная ДТС возникает при появлении на проезжей части второго ТС2 под управлением водителя Чв2. При этом ТС2 может двигаться навстречу, попутно или в пересекаемом направлении относительно движущегося первого ТС. Обеспечение БДД в этом случае следует рассматривать уже в системе Чв–ТС–(Чв2–ТС2)–Д–Сд.

Если на участке проезжей части одновременно будет  $n$  ТС, то система обеспечения БДД будет иметь вид: Чв–ТС–(Чви–ТСi)–Д–Сд, где  $n \leq i \leq 2$ .

Инженерный подход при обеспечении БДД сосредоточен на анализе точек конфликта, в которых пересекаются траектории движения объектов и в этих точках происходит столкновение, например, столкновение ТС между собой или столкновение ТС и пешехода. Субъекты, которые управляют ТС, и психология их поведения в ДТС не учитываются. Не принимается во внимание, что появление объектов в точке конфликта предопределено действиями субъектов конфликта – водителей ТС или водителя ТС и пешехода. При этом пешеход одновременно выступает и как объект, и как субъект конфликта.

Инженерный подход, в котором рассматривается метод конфликтных зон, согласно [7, с. 107–113; 8], позволяет учитывать некоторые психологические аспекты взаимодействия конфликтующих водителей.

В то же время, по мнению психологов<sup>4</sup> [с. 5–6], дорожный конфликт – это динамический коммуникативный акт, являющийся конфронтационно взаимосвязанным поведением участников дорожного движения, который несет при этом угрозу их физического столкновения.

В психологии конфликт между субъектами рассматривается как активные взаимонаправленные действия каждой из сторон для реализации своих целей, окрашенные сильными эмоциональными переживаниями [9, с. 17]. В общем случае в психологии конфликт (лат. *conflictus* – столкнувшийся) рассматривается как наиболее острый способ разрешения противоречий в интересах, целях, взглядах, происходящих в процессе социального взаимодействия, заключающийся в противодействии участников этого взаимодействия и обычно сопровождающийся негативными эмоциями, выходящий за рамки правил и норм.

В конфликтологии – науке о конфликтах – изучаются социальные, внутриличностные, межличностные, внутригрупповые, межгрупповые, межклассовые, внутриорганизационные, межэтнические, педагогические и другие виды конфликтов. Так, например, межличностный конфликт – это ситуация, возникающая между разными людьми из-за противоречий их интересов, целей, способов поведения и др. Социальный конфликт – это открытое противоборство, столкновение двух и более субъектов и участников социального взаимодействия, причинами которого являются осознанные несовместимые потребности, интересы и ценности [9].

Объективные противоречивые ДТС, возникающие в дорожном движении, создают потенциальную возможность возникновения конфликтов, при этом она переходит в реальность только в сочетании с субъективными факторами участников дорожного движения. Одно из условий такого перехода – осознание объективной проблемной ситуации. В проблемной ДТС противоречие еще не осознано и нет конфликтных действий между участниками дорожного движения, однако ситуация содержит элементы будущего конфликта. К таким элементам следует отнести: проектное (конструктивное) исполнение Д; ТСОДД; действия или бездействие участников дорожного движения.

Для того чтобы конфликтная ситуация переросла в конфликт и началось конфликтное взаимодействие, необходимо наличие инцидента. Под инцидентом (лат. *incidens* – случающийся) в общем случае понимается стечение обстоятельств (совокупность нежелательных событий), являющихся поводом для конфликта. Инцидент – это действие или совокупность действий участников дорожного движения, провоцирующие резкое обострение противоречия и начало борьбы между ними. Инцидент демонстрирует участникам дорожного движения наличие проблемы в ДТС, которая осознается, но суть проблемы может быть им и неясна. В большинстве случаев один из участников дорожного движения занимает пассивную позицию, и конфликт, начавшийся с инцидента, им и заканчивается. Если имеет место нарастание остроты конфликтного взаимодействия между участниками дорожного движения, иными словами, имеет место эскалация, то такое развитие событий ведет к ДТП. Конфликт всегда развивается во времени и имеет свои динамические показатели. Нет эскалации – нет ДТП, хотя инцидент имел место.

В дорожном движении, под которым понимается<sup>5</sup> [п. 2.17] движение пешеходов и (или) ТС по Д, в т.ч. стоянка и остановка в пределах Д, и связанные с ним общественные отношения, вопрос единства терминологии особенно актуален по причине тесного переплетения социальных и инженерно-технических аспектов.

<sup>4</sup> Утлик В.Э. Социально-психологические условия предупреждения конфликтов в дорожном движении: дис. ... канд. психол. наук: 19.00.05. – М., 2006. – С. 5–6.

<sup>5</sup> Указ Президента Респ. Беларусь, 28 нояб. 2005 г. № 551 «О мерах по повышению безопасности дорожного движения» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. Беларусь. – Минск, 2024.



По этой же причине нельзя поставить знак равенства между словосочетаниями «дорожный конфликт» и «конфликт в дорожном движении».

За термином всегда стоит предмет мысли, но не мысли вообще, а специальной мысли, ограниченной определенным полем [2, с. 34]. Это предопределяет необходимость четко разделить такие понятия, как «конфликт между ТС и ТС2» (конфликт между объектами), а также «конфликт между ТС и пешеходом» (конфликт между объектами, один из которых одновременно и субъект) как объектами, и понятия «конфликт между водителями ТС и ТС2» и «водителем ТС и пешеходом» как субъектами конфликта, участниками дорожного движения.

На правовом уровне в законодательстве термины «конфликт», «конфликтная точка» и «конфликтная зона» применительно к дорожному движению не определены.

Наличие общественных отношений в понятии «дорожное движение» требует закрепления термина «конфликт в дорожном движении» в правовом поле.

В терминологическом словаре отечественной правовой базы «Консультант плюс» нет термина «конфликт в дорожном движении», однако содержатся определения терминов, в которых используется слово «конфликт»: конфликтная ситуация (конфликт) в пункте пропуска<sup>6</sup>; конфликт интересов<sup>7</sup> и др.

В правовом поле Российской Федерации содержатся определения ряда терминов, в состав которых также входит слово «конфликт»: межэтнический конфликт<sup>8</sup>; пограничный конфликт<sup>6</sup>; межнациональный конфликт<sup>9</sup>; межличностный конфликт<sup>10</sup> и др.

Анализ перечисленных терминов, а также изложенное выше показывают совокупность признаков, которые вместе достаточны, а каждый необходим для того, чтобы выделить данный класс предметов, т.е. отличить эти предметы от других, применительно к термину «конфликт», который возникает в дорожном движении. Содержание понятия «конфликт» должно включать:

- социальное взаимодействие людей (участников дорожного движения) в определенной ДТС;
- наиболее острую фазу взаимодействия (инцидент), которая должна заканчиваться событием с негативными последствиями (ДТП) как минимум для одной из сторон конфликта;
- выход за рамки правил и норм (в сфере БДД, в частности<sup>11</sup>) в период времени от возникновения конфликтной ситуации до события с негативными последствиями (ДТП).

Требование к содержанию понятия «конфликт в дорожном движении» будет неполным, если мы не рассмотрим еще одну точку зрения<sup>12</sup>, согласно которой основа социального конфликта между людьми заложена на биологическом уровне. Суть биологической природы конфликта предопределена базовым генетическим программированием по воспроизводству потомства и заключается в необходимости вести для этого постоянную конкурентную борьбу за ограниченные ресурсы [7; 10]. Эта борьба является движущей силой всех видов конфликтов: социальных, внутриличностных, межличностных, внутригрупповых, межгрупповых, межклассовых, внутриорганизационных, межэтнических, педагогических.

Не является исключением и дорожное движение, в котором присутствуют в той или иной форме отдельные из перечисленных конфликтов, а конкурентная борьба ведется за ограниченные ресурсы. Очевидно, что ограниченным ресурсом в дорожном движении является участок проезжей части, а также ресурс времени на прибытие и нахождения на этом участке. Что касается конкурентной борьбы, то она должна вестись между участниками дорожного движения.

<sup>6</sup> Постановление Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств от 13 апр. 2018 г. № 47-13 «О Глоссарии терминов и понятий, используемых государствами-участниками СНГ в пограничной сфере» [Электронный ресурс] // Эталон Online. – URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=n21800044>

<sup>7</sup> Постановление Правления Национального банка Республики Беларусь от 30.10.2012 № 557 (ред. от 29.06.2022) «Об утверждении Инструкции об организации корпоративного управления банком, открытым акционерным обществом “Банк развития Республики Беларусь”, небанковской кредитно-финансовой организацией» [Электронный ресурс] // Законодательство стран СНГ. – URL: [https://base.spinform.ru/show\\_doc.fwx?rgn=56001](https://base.spinform.ru/show_doc.fwx?rgn=56001)

<sup>8</sup> Инструкция по составлению «Сведений о деятельности учреждения здравоохранения (медицинского формирования), принимавшего участие в ликвидации чрезвычайных ситуаций» (отчетная форма № 55 утв. Приказом М-ва здравоохранения Рос. Федерации от 31.12.98 № 393 «Об утверждении отчетной документации всероссийской службы медицины катастроф Минздрава России»).

<sup>9</sup> Приказ ФАДН России от 28.02.2019 № 20 «Об утверждении методических рекомендаций о порядке реагирования на выявленные системой мониторинга конфликтные и предконфликтные ситуации в сфере межнациональных и межконфессиональных отношений в субъектах Российской Федерации и муниципальных образованиях и заполнения электронных форм системы мониторинга».

<sup>10</sup> ГОСТ Р 52495-2005 «Национальный стандарт Российской Федерации. Социальное обслуживание населения. Термины и определения» (утв. Приказом Ростехрегулирования от 30.12.2005 № 532-ст) [Электронный ресурс] // Консультант-Плюс. Россия. – М., 2024.

<sup>11</sup> Указ Президента Респ. Беларусь, 28 нояб. 2005 г. № 551 «О мерах по повышению безопасности дорожного движения» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. Беларусь. – Минск, 2024.

<sup>12</sup> Сеновский В. Биологическая природа человеческих конфликтов [Электронный ресурс] // Проза.ру. – 2020. – URL: <https://proza.ru/2020/07/27/75>

С учетом биологической природы социального конфликта содержание понятия «конфликт в дорожном движении» должно в себя включать:

- наличие проблемной ДТС;
- социальное взаимодействие в форме конкурентной борьбы между участниками дорожного движения в проблемной ДТС на проезжей части Д;
- инцидент (наиболее острая фаза конкурентной борьбы участников дорожного движения в проблемной ДТС за участок проезжей части);
- в случае эскалации конкурентная борьба, как правило, заканчивается ДТП;
- выход за рамки правил и норм (в сфере обеспечения БДД), в частности<sup>13</sup>).

Таким образом, в первом приближении под конфликтом в дорожном движении будем понимать социальное взаимодействие в форме конкурентной борьбы, содержащей инцидент и эскалацию в проблемной ДТС на проезжей части между участниками дорожного движения. При этом после инцидента эскалация конкурентной борьбы ведется с нарушением Правил дорожного движения и иных правил и норм в сфере обеспечения БДД за одновременное нахождение на одном и том же участке проезжей части, завершаясь ДТП.

**Заключение.** Под конфликтом в дорожном движении будем понимать социальное взаимодействие в форме конкурентной борьбы на проезжей части в проблемной ДТС между участниками дорожного движения, при этом после инцидента эскалация конкурентной борьбы ведется за одновременное нахождение на одном и том же участке проезжей части, с нарушением Правил дорожного движения и иных правил и норм в сфере обеспечения БДД, завершаясь ДТП.

Конфликтная зона – поле конфликтных точек на участке Д.

Конфликтный участок на Д начинается от точки возникновения проблемной ДТС до конфликтной точки, где происходит пересечение траекторий движения (столкновение) объектов – ДТП. На участке Д между этими точками имеет место конкурентная борьба между участниками дорожного движения за одновременное нахождение на одном и том же участке проезжей части. На этом же участке между участниками конфликта последовательно происходит инцидент, а затем эскалация конфликта. На конфликтном участке имеет место межличностный конфликт между участниками дорожного движения как субъектами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гринев-Гриневиц С.В., Сорокина Э.А., Скопюк Т.Г. Основы антропологической лингвистики (к лингвистическим основаниям эволюции мышления): учеб. пособие. – М.: Компания Спутник+, 2005. – 114 с.
2. Суперанская А.В., Подольская Н.В., Васильева Н.В. Общая терминология: Вопросы теории. – М.: Наука, 1989. – 246 с.
3. Клиновштейн Г.И., Афанасьев М.Б. Организация дорожного движения: учеб. для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 2001. – 247 с.
4. Лукьянов В.В. Безопасность дорожного движения. – М.: Транспорт, 1983. – 250 с.
5. Покровский А.Н., Ивахненко А.М., Неретин А.А. Управление системами «человек-машина»: учеб. пособие. – М.: МАДИ, 2013. – 192 с.
6. Душков Б.А. Основы инженерной психологии: учеб. пособие. – Омск: Ом. гос. техн. ун-т, 2015. – 83 с.
7. Капский Д.В., Рябчинский А.И. Метод конфликтных зон прогнозирования аварийности: разработка и совершенствование // Вестн. МАДИ. – 2016. – Вып. 1(44). – С. 107–113.
8. Капский Д.В., Шуть В.Н., Пегин П.А. Графовая модель конфликтного взаимодействия ТС на различных перекрестках // Наука и техника. – 2018. – Т. 17, № 3. – С. 246–254. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-3-246-254
9. Зеленков М.Ю. Социальная конфликтология (базовый курс). – М.: Юрид. ин-т МИИТа, 2011. – С. 17.
10. Капский Д.В., Рябчинский А.И. Совершенствование метода прогнозирования аварийности по конфликтным ситуациям // Вестн. Моск. автомобил.-дорож. гос. техн. ун-та (МАДИ). – 2016. – № 2(45). – С. 94–103.

#### REFERENCES

1. Grinev-Grinevich, S.V., Sorokina, E.A. & Skopyuk, T.G. (2005). *Osnovy antropolingvistiki (k lingvisticheskim osnovaniyam evolyutsii myshleniya): ucheb. posobie*. Moscow: Kompaniya Sputnik+. (In Russ.)
2. Superanskaya, A.V., Podol'skaya, N.V. & Vasil'eva, N.V. (1989). *Obshchaya terminologiya: Voprosy teorii*. Moscow: Nauka. (In Russ.)
3. Klinkovshtein, G.I. & Afanas'ev, M.B. (2001). *Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya: uchebnyk dlya vuzov*. Moscow: Transport. (In Russ.)
4. Luk'yanov, V.V. (1983). *Bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya*. Moscow: Transport. (In Russ.)
5. Pokrovskii, A.N., Ivakhnenko, A.M. & Neretin, A.A. (2013). *Upravlenie sistemami «chelovek-mashina»: uchebnoe posobie*. Moscow: MADI. (In Russ.)
6. Dushkov, B.A. (2015). *Osnovy inzhenernoi psikhologii: uchebnoe posobie*. Omsk: Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet.

<sup>13</sup> Указ Президента Респ. Беларусь, 28 нояб. 2005 г. № 551 «О мерах по повышению безопасности дорожного движения» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. Беларусь. – Минск, 2024.

7. Kapskii, D.V. & Ryabchinskii, A.I. (2016). Metod konfliktnykh zon prognozirovaniya avariinosti: razrabotka i sovershenstvovanie [Forecasting Method Conflict Zones Road Accident: Development and Improvement]. *Vestnik MADI*, 1(44), 107–113. (In Russ., abstr. in Engl.)
8. Kapskii, D.V., Shut', V.N. & Pegin, P.A. Grafovaya model' konfliktnogo vzaimodeistviya TS na razlichnykh perekrestkakh [Graph Model of Vehicle Conflict Interaction at Various Crossroads]. *Nauka i tekhnika [Science and Technique]*, 17(3), 246–254. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-3-246-254 (In Russ., abstr. in Engl.)
9. Zelenkov, M.Yu. (2011). *Sotsial'naya konfliktologiya (bazovyi kurs)*. Moscow: Yuridicheskii institut MIITa. (In Russ.)
10. Kapskii, D.V. & Ryabchinskii, A.I. (2016). Sovershenstvovanie metoda prognozirovaniya avariinosti po konfliktnym situatsiyam. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*, 2(45), 94–103. (In Russ.)

Поступила 01.07.2024

## THE TERM “CONFLICT” IN THE ROAD SAFETY SYSTEM

**A. SUSHKO**

*(Academy of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Belarus, Minsk)*

**A. BAKHANOVICH**

*(Ministry of Education of the Republic of Belarus, Minsk)*

*The term “conflict” is defined as social interaction in the form of competitive struggle on the roadway in a problematic road traffic situation between road users. The phases of the emergence and development of the conflict are established. The conflict section on the road begins from the point of emergence of the problematic situation to the conflict point at which the accident occurs. On the road section between these points, there is a competitive struggle between road users for simultaneous presence on the same section of the roadway. On the same section, an incident occurs between the conflict participants, and then the conflict escalates. In the conflict area there is an interpersonal conflict between road users as subjects. It is proposed to enshrine the concept of conflict in the legal field in relation to the road safety system.*

**Keywords:** road safety, conflict, road user, traffic rules.

УДК 656.1

DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-92-96

**СРЕДСТВА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПЕШЕХОДА,  
УЧАСТВУЮЩЕГО В ДОРОЖНОМ ДВИЖЕНИИ**

*канд. техн. наук А.А. СУШКО*  
*(Академия МВД Республики Беларусь, Минск)*  
*д-р техн. наук, доц. А.Г. БАХАНОВИЧ*  
*(Министерство образования Республики Беларусь, Минск)*

*Рассмотрена терминология и классификация средств мобильности пешехода, участвующего в дорожном движении. Предложено и обосновано рассматривать в правовом поле средство индивидуальной мобильности – средство персональной мобильности как управляемый самодвижущийся объект (в случае оборудования электродвигателем с мощностью не более 250 Вт), используемый для перемещения пешехода, участвующего в дорожном движении со скоростью не более 12 км/ч, при этом он создает повышенную вероятность причинения травмирования из-за невозможности полного контроля за ним со стороны пешехода.*

*Ключевые слова:* Правила дорожного движения, средство индивидуальной (персональной) мобильности, импульс силы, средство повышенной опасности.

**Введение.** Человек с момента осознания себя как пешехода стремился перемещаться по поверхности земли быстрее, чем в пешем порядке. Это заложено в природе человека: скорость перемещения сильно влияла на его выживаемость как вида. По этой причине он оседлал животное, создал колесо, повозку, автомобиль. В сказках с помощью волшебной силы – без напряжения человеческих усилий – движутся печь, сани и другие объекты, например, сапоги-скороходы.

Потребность в компактном мобильном устройстве, с помощью которого пешеход, обладающий им, при затрате практически тех же физических сил может перемещаться быстрее других пешеходов, участвующих в дорожном движении, привело к появлению лыж и коньков, в т.ч. и роликовых, самокатов и другого спортивного инвентаря. Скорость перемещения определялась удачностью конструкции и физическими данными пешехода, который на них передвигался. Вполне логичным продолжением развития конструкции средств, на которых перемещались пешеходы, стало встраивание в их колесные и другие движители маленьких двигателей как внутреннего сгорания, так и электродвигателей. Двигатель внутреннего сгорания, используемый на отдельных конструкциях движителей для перемещения пешехода, не получил широкого распространения и уступил электродвигателю, который питается от компактного источника энергии. Можно сказать, что прогресс в конструкции аккумулятора как источника электроэнергии предопределил широкое распространение электросамокатов и других средств перемещения пешехода.

Рост числа пешеходов на механических средствах передвижения (далее – МСПП) – «полуфабрикатах» (по скорости передвижения уже не пешеход, а по средству передвижения еще не транспортное средство), вполне закономерно привел их к конфликту с другими участниками дорожного движения: на проезжей части дороги – с водителями транспортных средств, а на тротуаре – с пешеходами.

Не останавливаясь подробно на конструкциях МСПП, следует отметить, что, например, электросамокат может перевозить физическое лицо весом до 100 кг и развивать скорость до 40 км/ч. Закономерен вопрос: насколько это опасно для физического лица, которое на нем передвигается как в потоке пешеходов, так и в потоке транспортных средств?

**Основная часть.** Движущийся объект удобно характеризовать импульсом силы, модуль которой равен произведению массы тела на его скорость или произведению силы на время ее действия. Если тело покоится, импульс равен нулю. Ненулевым импульсом обладает любое движущееся тело, в т.ч. и МСПП под управлением пешехода. Импульс силы служит мерой того, насколько велика должна быть сила, действующая в течение определенного времени, чтобы остановить или разогнать пешехода с места до данной скорости. Нас интересует импульс силы в момент столкновения. Так, пешеход весом 60 кг при движении со скоростью:

- 5 км/ч (движение шагом) при столкновении с неподвижным объектом подвергается воздействию импульса силы 83,3 кг\*м/с;
- 12 км/ч (движение бегом) – воздействию импульса силы 200,0 кг\*м/с;
- 25 км/ч (движение на МСПП) – воздействию импульса силы 416,0 кг\*м/с.

Воздействие импульса на организм при скорости более 12 км/ч приведет к возникновению сочетанной травмы, при которой человек получает многочисленные повреждения разных частей тела: головы, грудной клетки, живота, растяжения и разрывы связок конечностей, гематомы, вывихи суставов, повреждения коленных суставов<sup>1, 2</sup>.

<sup>1</sup> URL: <https://temryuk.ru/presscenter/news/padenie-s-giroskutera-mozhet-privesti-k-sereznoy-travme%F1%FC%FB%E2%E6%E4%E3%E0%EF/>

<sup>2</sup> URL: <http://streetracing.ru/auto/3264-travmy-na-giroskutere-prichiny-i-posledstviya.html>

Серьезные травмы чаще всего получают опытные пешеходы на МСПП из-за того, что они свободно чувствуют себя на данном средстве передвижения. Опытные гонщики любят скорость, резко тормозят, совершают различные пируэты, что может закончиться падением. Большинство гироскутеров или мотоколес могут разогнаться до 15 км/ч, а некоторые и больше. Риск травмы значительно повышает самоуверенность. Часто человек мчится на максимальной скорости; не обращает внимание на пешеходов, транспортные средства, в результате может столкнуться с ними; поворачивает во время быстрой езды; занимает неправильное, недостаточно устойчивое положение на доске; ездит в состоянии алкогольного опьянения (даже небольшая доза алкоголя, которая субъективно не ощущается, значительно нарушает координацию движений и способность удерживать равновесие); передвигается по скользкой поверхности<sup>3</sup>.

В таких случаях пешеход, движущийся на МСПП, управляет источником повышенной опасности или нет? МСПП – транспортное средство или нет?

С момента появления МСПП относительно долгое время находились вне правового поля, причиняя вред здоровью как пешеходов, передвигающихся на них, так и пешеходов, с которыми происходило столкновение. Единичные случаи столкновений рассматривались в плоскости хулиганства. Однако во втором полугодии 2022 г. почти одновременно в России и Республике Беларусь в правовом поле появились следующие термины: «средство персональной мобильности (далее – СПМ)» – это устройство или приспособление, не являющиеся транспортными средствами (далее – ТС), приводимые в движение двигателем и предназначенные для индивидуального или совместного (в случае наличия специально оборудованных мест для сидения) использования пешеходами (электросамокат, гироскутер, сигвей, моноколесо и прочее) (п. 2.60<sup>1</sup> ПДД)<sup>4</sup>, и «средство индивидуальной мобильности (далее – СИМ)» – это ТС, имеющее одно или несколько колес (роликов), предназначенное для индивидуального передвижения человека посредством использования двигателя (двигателей) (электросамокаты, электроскейтборды, гироскутеры, сигвеи, моноколеса и иные аналогичные средства)<sup>5</sup>.

Отметим, что под «прочее» в термине СПМ подпадает любое устройство или приспособление, приводимое в движение двигателем, которое пешеход индивидуально или совместно использует для своего перемещения. При этом пешеход, управляющий СПМ, – не водитель, а совместно перемещающийся с ним – не пассажир. Это вытекает из тезиса, что СПМ не является ТС. В то же время ТС – устройство, предназначенное для движения по дороге и для перевозки пассажиров, грузов или установленного на нем оборудования (п. 2.69 ПДД).

Если для раскрытия смысла термина подставить определение ТС в термин СПМ, то СПМ – устройство или приспособление, не являющиеся (устройством, предназначенным для движения по дороге и для перевозки пассажиров, грузов или установленного на нем оборудования), приводимые в движение двигателем и предназначенные для индивидуального или совместного (в случае наличия специально оборудованных мест для сидения) использования пешеходами (электросамокат, гироскутер, сигвей, моноколесо и прочее).

Построение определения термина СПМ как устройства или приспособления через исключение термина ТС привело к возникновению противоречия (в случае подстановки понятия ТС в термин СПМ): одновременно это устройство или приспособление и не устройство, предназначенное для ... перевозки пассажиров и устройство, ... предназначенное для индивидуального или совместного (в случае наличия специально оборудованных мест для сидения) использования пешеходами. При этом использование СПМ предполагает его перемещение при помощи двигателя, а наличие специально оборудованных мест для сидения – что пешеходы, которые на них сидят, – пассажиры. При этом пешеход, управляющий СПМ, не наделен юридической ответственностью как водитель.

Построение определения СИМ в ПДД РФ через термин ТС также не лишено недостатков по следующим формальным причинам. Так, ТС в ПДД РФ – это устройство, предназначенное для перевозки по дорогам людей, грузов или оборудования, установленного на нем. Если подставить определение ТС в термин СИМ, то СИМ – это устройство, предназначенное для перевозки по дорогам людей, грузов или оборудования, установленного на нем, имеющее одно или несколько колес (роликов), предназначенное для индивидуального передвижения человека посредством использования двигателя (двигателей) (электросамокаты, электроскейтборды, гироскутеры, сигвеи, моноколеса и иные аналогичные средства). Человек, передвигающийся на СИМ, – не участник дорожного движения, т.к. участник дорожного движения – это лицо, принимающее непосредствен-

<sup>3</sup> URL: [https://auto.rambler.ru/other/40340608/?utm\\_content=auto\\_media&utm\\_medium=read\\_more&utm\\_source=copylink](https://auto.rambler.ru/other/40340608/?utm_content=auto_media&utm_medium=read_more&utm_source=copylink)

<sup>4</sup> Указ Президента Респ. Беларусь, 28 нояб. 2005 г. № 551 «О мерах по повышению безопасности дорожного движения» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. Беларусь. – Минск, 2024.

<sup>5</sup> Постановление Совета Министров-Правительства Российской Федерации от 23 октября 1993 г. № 1090 «О правилах дорожного движения» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. Беларусь. – М., 2024.

ное участие в процессе движения в качестве водителя, пешехода, пассажира транспортного средства. Если:

- человек, передвигающийся на СИМ, – водитель, то на него в полной мере распространяются обязанности водителя, вплоть до юридической ответственности;
- СИМ – это ТС, то на него распространяется перечень неисправностей и условий, при которых запрещается эксплуатация ТС (приложение к основным положениям по допуску ТС к эксплуатации и обязанностям должностных лиц по обеспечению безопасности дорожного движения) в части касающейся.

Наличие дополнительных требований в разделе 24 ПДД РФ не означает, что человек, передвигающийся на СИМ, должен руководствоваться только этими положениями. На него распространяются все требования ПДД РФ в части касающейся, при этом возникает неоднозначность применения ряда пунктов. Например, в разделе «Сигналы регулировщика»: «... Лица, использующие для передвижения средства индивидуальной мобильности, должны руководствоваться сигналами регулировщика для пешеходов». В то же время п. 24.2 допускает движение СИМ по правому краю проезжей части дороги. При движении на СИМ по краю проезжей части пешеход как водитель ТС должен руководствоваться сигналами регулировщика для ТС, при этом лица, использующие для передвижения СИМ, «должны руководствоваться сигналами регулировщика для пешеходов». Отметим, что не все разрешающие сигналы регулировщика для пешехода и водителя совпадают.

Ключевым фактором в определении средства мобильности пешехода как физического лица, участвующего в дорожном движении, является понятие ТС. В одном случае (ПДД РФ) средство мобильности отнесено к ТС, а в другом (ПДД) – нет, но и в том, и другом случаях имеют место проблемные моменты. Выход из сложившейся ситуации видится в сохранении сути термина ТС как устройства для перемещения с исключением его признаков для СИМ-СПМ как МСПП.

Электросамокаты, электроскейтборды, гироскутеры, сигвеи, моноколеса и другие аналогичные средства мобильности пешехода не исключают другие средства и устройства, которые, используя любой движитель, работающий на любом физическом принципе, будут позволять пешеходу перемещаться (участвовать в дорожном движении) со скоростью больше, чем при движении пешком. Например, еще в 1976 г. были разработаны в Уфимском авиационном институте и изготовлены «сапоги-скороходы» с двигателем внутреннего сгорания [1; 2]. В описанной конструкции нет ни роликов, ни колес для передвижения. Таким образом, вполне возможна реализация конструкции, когда пешеход участвует в дорожном движении и даже не касается или минимально касается поверхности дороги. Автор полагает, что внимательное изучение уже существующих патентов даст широкий спектр устройств, которые можно отнести к СИМ-СПМ. Уже завтра они могут появиться на дороге и внести свой негативный вклад в безопасность дорожного движения.

Учитывая изложенное, термин СИМ-СПМ должен включать в себя следующее:

- это управляемый самодвижущийся объект, специально сконструированный, приспособленный или используемый для перемещения пешехода;
- пешеход на СИМ-СПМ участвует в дорожном движении;
- при максимальной скорости движения СИМ-СПМ при столкновении с пешим пешеходом полученные телесные повреждения не выйдут за рамки легких повреждений.

Вопрос разрешенной максимальной скорости движения СИМ-СПМ следует рассматривать в плоскости скорости движения пешехода. Так, при быстрой ходьбе среднестатистический пешеход выполняет 120–140 шагов в минуту, что соответствует диапазону скоростей 5,6–6,5 км/ч. Выигрыш в скорости пешехода, перемещающегося на СИМ-СПМ, с учетом требований безопасности при столкновении не должен превышать 1,5–1,75 раз. Таким образом, целесообразно установить предел скорости около 10–12 км/ч.

Что касается СИМ-СПМ, которые используются пешеходами совместно (в случае наличия специально оборудованных мест для сидения), то необходимо рассматривать такой параметр, как мощность приводного электродвигателя. В настоящее время мощность устанавливаемого на СИМ-СПМ электродвигателя колеблется в широком диапазоне: от нескольких сот до тысячи ватт и более. В то же время минимальная мощность в режиме длительной нагрузки (более 0,25 кВт) определена только для мопеда (п. 2.27 ПДД).

Мощность 250 Вт может быть определена как верхний предел для средств передвижения, оборудованных электродвигателем. В эту категорию войдут велосипеды с электродвигателем и СИМ-СПМ. С учетом предлагаемого верхнего предела скорости для СИМ-СПМ 12 км/ч может быть обоснован скоростной диапазон для велосипедов, оборудованных электродвигателем, – это 12–25 км/ч.

Таким образом, термин СИМ-СПМ может быть изложен в следующей редакции: это управляемый самодвижущийся (с помощью любого двигателя) объект, специально сконструированный, приспособленный или используемый для перемещения пешехода, участвующего в дорожном движении, со скоростью не более 12 км/ч. В случае оборудования электродвигателем – с номинальной максимальной мощностью в режиме длительной нагрузки до 250 Вт.

Что касается средств передвижения, которые выходят за пределы установленной в определении термина скорости движения для СИМ-СПМ, в т.ч. и электровелосипедов, то необходима их классификация по аналогии с классификацией ТС. В зависимости от степени причинения вреда и тяжести последствий при участии

в дорожном движении СИМ-СПМ некоторая их часть может быть отнесена к ТС со всеми вытекающими последствиями для их конструкции. Так, если максимальная скорость составляет:

- до 12 км/ч и номинальная максимальная мощность в режиме длительной нагрузки до 250 Вт следует отнести к СИМ-СПМ;
- до 25 км/ч и номинальная максимальная мощность в режиме длительной нагрузки до 250 Вт – к велосипедам;
- до 50 км/ч – к мопедам (п. 2.27 ПДД), независимо от вида двигателя;
- 50 км/ч и выше – к мотоциклам (п. 2.28 ПДД), независимо от вида двигателя.

В отдельный класс могут быть выделены СИМ-СПМ спортивного и другого специального назначения, которые не должны участвовать в дорожном движении.

Что касается отнесения СИМ-СПМ к источнику повышенной опасности, то по умолчанию водитель ТС считается и рассматривается как лицо, управляющее источником повышенной опасности. Однако в действующем законодательстве нет определения термина «источник повышенной опасности». Есть только «источник повышенной опасности для окружающей среды»<sup>6</sup>. Анализ этого термина позволяет выявить ключевые моменты в его определении: это объекты деятельности; объекты, осуществляющие виды деятельности; объекты, имеющей высокий уровень потенциальной опасности.

В законодательстве Российской Федерации<sup>7</sup> под источником повышенной опасности признается любая деятельность, осуществление которой создает повышенную вероятность причинения вреда из-за невозможности полного контроля за ней со стороны человека, а также деятельность по использованию, ... и других объектов производственного, хозяйственного или иного назначения, обладающих такими же свойствами. Из определения владельца источника повышенной опасности, под которым понимается юридическое лицо или гражданин, которые используют его (источник повышенной опасности) в силу принадлежащего им права собственности, права хозяйственного ведения, оперативного управления либо на других законных основаниях (например, по договору аренды, проката, по доверенности на право управления транспортным средством, в силу распоряжения соответствующего органа о передаче ему источника повышенной опасности)<sup>7</sup>, следует, что ТС – источник повышенной опасности.

Под термином «вред» понимается травмирование или нанесение ущерба здоровью человека, оборудованию или окружающей среде<sup>8</sup> [3], а вероятность – это количественная мера возможности того, что произойдет определенное случайное событие. Травмирование – это травматические повреждения: ранения, ушибы, растяжения связок, переломы костей, вывихи суставов.

Проведенный анализ показывает, что источник повышенной опасности – это объект, который создает повышенную вероятность причинения вреда из-за невозможности полного контроля за ним со стороны человека, и это не только ТС. СИМ-СПМ как МСПП, несомненно, отвечает в полной мере заявленным критериям: нет полного контроля со стороны пешехода; даже при скорости до 12 км/ч причиняется вред. Пешеход не проходит медицинское освидетельствование для участия в дорожном движении и не получает (после учебной подготовки) права на управление СИМ-СПМ. Величина вреда зависит от объекта, с которым произошло столкновение (пешеход-ребенок, пешеход в возрасте или другие объекты), и самого механизма столкновения.

Применительно к дорожному движению под источником повышенной опасности следует понимать объект (не только ТС), который создает повышенную вероятность (возможность того, что произойдет) причинения травмирования (ранения, ушибы, растяжения связок, переломы костей, вывихи суставов), из-за невозможности полного контроля за ним со стороны участника дорожного движения.

**Заключение.** В правовом поле целесообразно рассматривать СИМ-СПМ как управляемый самодвижущийся объект (в случае оборудования электродвигателем номинальной максимальной мощностью в режиме длительной нагрузки не более 250 Вт), специально сконструированный, приспособленный или используемый для перемещения пешехода, участвующего в дорожном движении со скоростью не более 12 км/ч, при этом он создает повышенную вероятность причинения травмирования из-за невозможности полного контроля за ним со стороны пешехода.

<sup>6</sup> Постановление Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств от 1 нояб. 2006 г. № 27-8 «О модельном Экологическом кодексе для государств-участников Содружества Независимых Государств (Общая часть)» [Электронный ресурс] // Эталон Online. – URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=n20900095>

<sup>7</sup> Постановление Пленума Верховного Суда РФ от 26.01.2010 № 1 «О применении судами гражданского законодательства, регулирующего отношения по обязательствам вследствие причинения вреда жизни или здоровью гражданина» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. Россия. – М., 2024.

<sup>8</sup> Решение Коллегии Евразийской экономической комиссии от 22 дек. 2015 г. № 173 «Об утверждении Правил классификации медицинских изделий в зависимости от потенциального риска применения» [Электронный ресурс] // Эталон Online. – URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=f91500366>. – М., 2023.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров Ю. Сапоги-скороходы // Техника-молодежи. – 1976. – № 9. – С. 7.
2. Коноплева Н. Возвращение к сказке // Техника-молодежи. – 1983. – № 2. – С. 13.
3. Капский Д.В., Кот Е.Н. Некоторые аспекты применения средств персональной (индивидуальной) мобильности // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. / Минск (25–28 мая 2021 г.). – Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2021. – Т. 2. – С. 160–165.

## REFERENCES

1. Fedorov, Yu. (1976). Sapogi-skorokhody. *Tekhnika-molodezhi*, (9), 7. (In Russ.)
2. Konopleva, N. (1983). Vozvrashchenie k skazke. *Tekhnika-molodezhi*, (2), 13. (In Russ.)
3. Kapskii, D.V. & Kot, E.N. (2021). Nekotorye aspekty primeneniya sredstv personal'noi (individual'noi) mobil'nosti [Some aspects of the Use of Personal (Individual) Mobility Means]. *Avtotraktorostroenie i avtomobil'nyi transport: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Minsk (25–28 maya 2021 g.)]*. V 2 t. T. 2, 160–165. Minsk: Belorusskii natsional'nyi tekhnicheskii universitet. (In Russ.)

Поступила 01.07.2024

**MEANS OF TRANSPORTATION  
FOR A PEDESTRIAN PARTICIPATING IN ROAD TRAFFIC**

**A. SUSHKO**

*(Academy of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Belarus, Minsk)*

**A. BAKHANOVICH**

*(Ministry of Education of the Republic of Belarus, Minsk)*

*The terminology and classification of pedestrian mobility devices participating in road traffic are considered. It is proposed and substantiated to consider in the legal field a means of individual mobility - a personal mobility device as a controlled self-propelled object (in the case of equipment with an electric motor with a power of no more than 250 W), used to move a pedestrian participating in road traffic at a speed of no more than 12 km / h, while it creates an increased probability of causing injury due to the impossibility of full control over it by the pedestrian.*

**Keywords:** *Traffic rules, means of individual (personal) mobility, impulse of force, means of increased danger.*



УДК 620.184.4 (623.43.038)

DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-97-101

## ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ

канд. техн. наук, доц. В.А. ФРУЦКИЙ, М.В. СЕМЕНЧЕНКО  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

*Раскрыты вопросы разработки технологии ремонта корпусов двигателей внутреннего сгорания.*

*Рассмотрена конструкция корпуса двигателя, выделены наиболее ремонтпригодные зоны. Определено, что элементами корпуса двигателя, которые разрушаются в первую очередь, являются зоны разборочно-сборочных и регулировочных мероприятий и зоны, подверженные влиянию повышенных температур. Проанализированы процессы, вызывающие деформацию либо разрушение отдельных частей корпуса двигателя. Замечено, что основные эксплуатационные поломки сосредотачиваются в верхней и нижней зонах корпуса двигателя, что накладывает определенные ограничения на методы и технологии ремонта и восстановления.*

*Предложенная технология восстановления работоспособности корпусов двигателей включает в себя операции по полной подготовке дефектно-аварийной зоны, устранению поломок, последующей термической обработке и проведение испытаний сборочного узла в целом. Даны подробные рекомендации по восстановлению исходных размеров и механических свойств поверхностей двигателя.*

*Испытания восстановленных по данной технологии корпусов показали, что работоспособность и технико-эксплуатационные параметры восстановленных узлов имеют приемлемые для эксплуатации значения.*

**Ключевые слова:** отказ, корпус двигателя, трещина, скол, ремонт-восстановление, сопряжение.

**Введение.** В связи со сложившейся в последнее время политико-экономической ситуацией, по нашему мнению, следует особое внимание уделять ремонту и восстановлению уже имеющегося автомобильного парка. Однако нельзя игнорировать и тот факт, что на многих международных форумах [1] поднимаются вопросы, связанные с резким ухудшением экологической обстановки, вызванным непосредственной деятельностью человека. В этой связи видится целесообразным как продление срока службы узлов и агрегатов автомобилей, так и ремонт деталей при участии ресурсосберегающих технологий с применением отходов машиностроительного производства. Все чаще в литературе и высказываниях ведущих специалистов указывается на важность развития стратегий, направленных на различные приемы, повышающие сроки эксплуатации, ремонтпригодность и наработку на отказ узлов и механизмов существующего автомобильного парка. Таким образом, разработки технологий ремонта деталей автомобилей, их восстановления – важные научно-технические задачи, направленные в т.ч. на решение экологических проблем.

В условиях отсутствия дефицита на запасные части и комплектацию иностранных фирм-производителей авто вопросам ремонта блоков и головок блоков цилиндров, изготавливаемых из чугуна и алюминия, уделялось недостаточное внимание, хотя технология их восстановления была отработана (рисунок)<sup>1</sup> [2; 3]. При этом не учитывались специальные вопросы сварочных операций. В нынешних условиях вопрос заделки трещин в блоке цилиндров считаем актуальным.

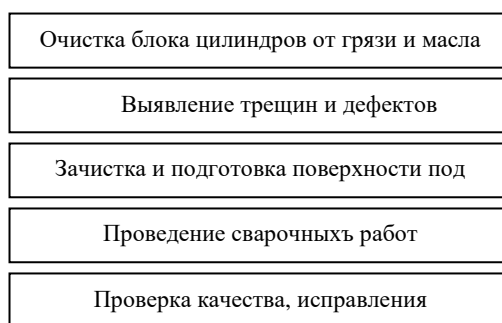


Рисунок. – Общая технология заварки дефектов

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

**Основная часть. Анализ исследований.** Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) работают в условиях резких перепадов температур и воздействия как внешних, так и внутренних физико-механических факторов

<sup>1</sup> Piezo-Injektoren [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.audi-technology-portal.de/de/antrieb/motor-effizienztechnologien/piezo-injektoren>

(например, повышенная температура и детонация). Частыми ошибками в ремонте являются перетяжка крепежа головки блока цилиндров, в эксплуатации – замерзание жидкости в рубашке охлаждения двигателя или удары элементов шатунно-поршневой группы о блок цилиндров. Выявлению этих дефектов посвящено множество работ<sup>2,3</sup> и останавливаться на них подробно не имеет смысла.

Анализ мест появления трещин (по плоскости прилегания блока цилиндров к ГБЦ между водяными и масляными каналами; в зонах вкручивания болтов головки блока; между каналами циркуляции моторного масла и рубашкой охлаждения; между седлом и форкамерой; и т.д.) показал, что они, как правило, появляются в труднодоступных местах, что сопряжено с определенными технологическими неудобствами. При этом существующие технологии включают либо технологию холодной сварки, которая подразумевает участие составов на основе эпоксидных смол (не проявляют необходимой стойкости при возникновении детонации), либо применение электросварки (предполагающей нагрев всего корпуса до температуры 250 °С для корпусов из алюминиевых сплавов), что влечет необходимость полного демонтажа, разборки двигателя и помещения корпуса в технологическую печь с соответствующими параметрами рабочей зоны. Все это влечет дополнительные затраты и не гарантирует качественный ремонт.

*Результаты исследований.* Для проведения исследований воспользовались блоком цилиндров, выполненных из литейного сплава АК12М2МгН (АЛ25) с химическим составом (таблица 1).

Таблица 1. – Состав литейного алюминиевого сплава, в %

Si	Mg	Cu	Mn	Ni	Ti
11...13	0,8...1,3	1,5...3,0	0,3...0,6	0,8...1,3	0,05...0,2

В качестве термообработки применяется режим неполного искусственного старения с ускоренным охлаждением. В результате образуется пересыщенный твердый раствор с небольшим упрочнением вследствие наличия дендритной ликвации с низкой концентрацией легирующих элементов. При этом необходимо предотвратить закаливание материала корпуса из-за возможного образования дефектов.

На данном этапе существует множество технологий заварки трещин на блоках цилиндров ДВС. Проанализируем применимость методов согласно теории восстановления работоспособности (таблица 2) [4].

Заметим, что в анализ не вошли технологии, предусматривающие участие материалов на основе эпоксидных смол и заменителей. По мнению авторов, такие технологии не способны в полной мере обеспечить надежность соединения и не стойки в условиях знакопеременных нагрузок.

Таблица 2. – Рекомендуемые методы заваривания дефектов при ремонте блока цилиндров

Материал	Газопламенный	РДС	Применением инвертора	3-фазная аргонодуговая + ТМО	Холодная молекулярная	Подогрев местный	Подогрев общий
Алюминиевая отливка	–	+/-	+/-	+	+/-	+	+

*Примечание.* + уверенно «да»; – уверенно «нет»; +/- проблематично

Итак, при применении открытого источника пламени материалы на основе алюминиевых сплавов склонны к окислению, следовательно, данный метод не приемлем для восстановления.

При применении ручной дуговой сварки на поверхности основного материала возникают тугоплавкие окислы, которые в общем случае легко преодолеваются при травлении 10%-м раствором щелочи, однако не все зоны устранения дефектов в корпусе блока цилиндров достаточно доступны. И в данном случае присутствие масляной ванны в рабочей зоне предусматривает более тщательную зачистку места обработки (до 0,5 мм).

При применении инверторного аппарата сварки и плавящегося электрода окисная пленка с основной поверхности удаляется под воздействием механизма катодного распыления, который возникает при наличии обратной полярности и увеличении частоты сварочного тока<sup>4</sup>.

При применении холодной молекулярной сварки, разработанной в Московском автомеханическом институте (МАМИ)<sup>5</sup>, адгезионной основой служат микрогетерофазные композитные материалы (реком), состоящие из полимерной основы, воспринимающей основные нагрузки, и различного рода дискретных наполнителей. В качестве наполнителей можно выбрать стружечные отходы, в избытке имеющиеся на механообрабатывающих предприятиях Беларуси. Огромным преимуществом метода является отсутствие нагрева, и сама технология не требует дорогостоящего оборудования. В данном случае тонкостенность детали при любом, даже минимальном, нагреве может привести к термическим деформациям, что негативно скажется на присоединительных и базовых плоскостях. Его отсутствие не нарушит физико-химический состав основного материала и его

<sup>2</sup> Piezo-Injektoren [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.audi-technology-portal.de/de/antrieb/motor-effizienztechnologien/piezo-injektoren>

<sup>3</sup> Основные дефекты и причины их появления [Электронный ресурс]. – URL: <https://studfile.net/preview/5332569/page:85/>

<sup>4</sup> Сплавы алюминия [Электронный ресурс]. – URL: <https://extxe.com/17546/aljuminij-i-ego-splavy-3/>

<sup>5</sup> Холодная молекулярная сварка [Электронный ресурс]. – URL: <https://studfile.net/preview/8850773/page:31/>

геометрические характеристики. Кроме того, из-за тонкостенности изделия уменьшается площадь наложения шва. Даже при рекомендованных значениях параметра шва 0,5...1 мм это может сыграть негативную роль.

Таблица 3. – Показатели прочности соединения при различном направлении прикладываемых нагрузок

Показатель прочности, МПа	Исходное состояние	Изгиб	Сжатие
$\sigma_b$	186	75	135
$\sigma_{0,2}$	166	50	110

По данным<sup>6</sup> стойкость соединения при нагрузке 20 Н составляет от 105 до 115 мин при наличии знакопеременных нагрузок (вибрация либо детонация двигателя). Такие значения нельзя признать положительными при заданных условиях эксплуатации деталей.

Ведущие Российские университеты авиационной промышленности стали апробировать ремонт и восстановление деталей из алюминиевых сплавов при помощи трехфазной дуги в защитных атмосферах, преимущественно в аргоне<sup>7</sup>.

Анализ известных применяемых методов ремонта и восстановления деталей из алюминиевых сплавов подтвердил известные факты, приводящие к дефектам и некачественному ремонту: вследствие большого коэффициента теплопроводности деталь подвержена значительным линейным деформациям. Для борьбы с этим явлением необходимо за короткий промежуток времени достичь температур плавления, что возможно при применении высокой погонной энергии источника тока. Такой прием может привести к значительным температурным деформациям детали, что нельзя назвать приемлемым с учетом допусков на межосевые размеры в пределах  $\pm 0,1$  мм.

Как выход из создавшегося положения можно рекомендовать предварительный подогрев всей детали до температур 300...400 °С. Но в условиях ремонтного предприятия это не всегда осуществимо.

В качестве альтернативы для комплексного решения возникающих проблем был предложен вариант применения трехфазной дуги, где дуги зажигаются в определенной последовательности, при этом одна из них может перекрывать другую. Способ может быть осуществлен как для громоздких деталей с толщиной стенок до нескольких десятков сантиметров, так и для деталей с толщиной стенки до 0,3...0,5 см. При таком подходе постоянно появляющаяся на поверхности оксидная пленка удаляется за счет механизма катодного распыления, который реализуется при наличии обратной полярности сварочного тока при 6...12 А.

Вторая часть комплексного решения заключается в применении местного подогрева под сварку. При этом необходимо избежать дополнительного окисления поверхности. При существующих отработанных технологиях при ведении нитки трубопровода подогрев можно осуществить при помощи термоковриков<sup>8</sup>. При осуществлении такой технологии снимается вопрос дополнительного окисления поверхности и появляется возможность влияния на изменения температурного поля в любой точке технологического процесса.

Однако для получения технико-эксплуатационных параметров детали на уровне нового изделия необходимо введение низкотемпературной термомеханической обработки (НТМО)<sup>9</sup>.

Для осуществления процесса НТМО была предложена следующая технология: заварка – естественное старение. При этом происходит частичная закалка изделия, в последующем – естественное старение, при котором пересыщенный твердый раствор, образовавшийся при закалке, путем естественного старения переходит к равновесному состоянию. Затем для увеличения технико-эксплуатационных характеристик добавляются процессы холодной деформации + искусственное старение. Однако согласно рекомендациям [5] нагрев и выдержка изделия должны производиться при температуре 120...130 °С, при этом предварительная пластическая деформация должна быть на уровне 5–10% (по данным<sup>10</sup>). Согласно проведенным исследованиям предел прочности шва увеличивается до 12%, на такую же величину увеличивается предел текучести, что уже может быть сопоставимо с значениями нового изделия (таблица 4).

Таблица 4. – Показатели прочности соединения при деформации, в %

Показатель прочности	0	2	4	6	8
$\sigma_b$ , МПа	186	200	210	188	190
$\sigma_{0,2}$ , МПа	166	180	182	174	172

Таким образом, пик прочностных показателей для сварочных швов, примененных на материалах данной системы, приходится на процент пластических деформаций 2...4%. При этом, согласно рекомендациям<sup>10</sup>, для увеличения прочностных характеристик материала рекомендуется прилагать знакопеременное нагружение

<sup>6</sup> Пути совершенствования технологий ремонта [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/puti-sovershenstvovaniya-tehnologii-remonta-detaley-i-soedineniy-sostavami-hms-holodnaya-molekulyarnaya-svarka/viewer>

<sup>7</sup> Сварка алюминиевых сплавов [Электронный ресурс]. – URL: <https://extxe.com/2846/svarka-aljuminievyyh-splavov>

<sup>8</sup> Нагреватели для термообработки [Электронный ресурс]. – URL: <https://rem-teh.ru/catalog/nagrevateli-dlya-termoobrabotki/>

<sup>9</sup> Сплавы алюминия [Электронный ресурс]. – URL: <https://extxe.com/17546/aljuminij-i-ego-splavy-3/>

<sup>10</sup> Справочник авиационные материалы. [Электронный ресурс]. – URL: [https://viam.ru/reference\\_book](https://viam.ru/reference_book)

одинаковой амплитуды. Для проверки данного факта к сварочному шву прилагали усилие деформации 3%. При этом образец 1 подвергали статическому растяжению, к образцу 2 прилагалось знакопеременное нагружение с частотой, равной проценту скорости перемещения горелки. Результаты сведены в таблицу 5.

Таблица 5. – Показатели прочности соединения при различных типах нагружения

Показатель прочности	Статическое нагружение	Знакопеременное, частота $\nu_n/4$	Знакопеременное, частота $\nu_n/2$
$\sigma_b$ , МПа	202	212	208
$\sigma_{0,2}$ , МПа	188	192	187

При анализе полученных данных выявлено улучшение прочностных характеристик при приложении знакопеременных нагрузок на сварочный шов в сравнении с нагрузками однонаправленными, что также хорошо согласуется с [6].

Согласно многолетним исследованиям<sup>11</sup> на прочностные характеристики материала в значительной мере влияет время естественного старения (таблица 6).

Таблица 6. – Показатели прочности соединения при различной продолжительности естественного старения, ч

Показатель прочности	0	6	12	24	48
$\sigma_b$ , МПа	186	186	189	191	192
$\sigma_{0,2}$ , МПа	166	168	169	170	172

Разбор приведенных результатов показывает, что за период прохождения процесса до 12 ч прочностные показатели детали увеличились менее, чем на 1%. При продолжительности процесса 12...24 ч характеристики выросли до 2%, при дальнейшем увеличении времени прирост составляет до 1%.

Согласно рекомендациям<sup>11</sup> [6] для увеличения прочностных характеристик применили нагрев до температур 150–200 °С (по рекомендациям<sup>12</sup> нагрев до 350...400 °С) и выдержку 5...15 ч, используя процесс искусственного старения к выбранной области (таблица 7).

Согласно теории Гинье–Престона и данным в научных источниках в материалах данной системы выделяются две равновесные фазы: кубическая  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ) и гексагональная  $Q$  ( $Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ ). Таким образом, можно выделить зону Гинье–Престона, а затем при искусственном старении при распаде пересыщенного раствора еще две равновесные фазы.

Таблица 7. – Показатели прочности соединения при различных вариантах технологии восстановления

Вариант	Технология ремонта	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа
1	Сварка + естественное старение + ХД + искусственное старение	212	192
2	Сварка + искусственное старение + ХД	189	169
3	Сварка + искусственное старение + ХД + искусственное старение	202	189

Так, при варианте 1 реализации технологии прирост показателей прочности составил 14%. При варианте 2 – 1%. При варианте 3 – 7%.

**Заключение.** Учитывая технико-экономическое положение Беларуси в современном технологическом пространстве видится более целесообразным выдвигание стратегий, учитывающих ремонт и восстановление узлов и деталей. До недавнего времени, с точки зрения авторов, вопросам ремонта и восстановления корпусных деталей двигателей было уделено недостаточное внимание, хотя направление исследований очень перспективное.

Первоначальный анализ восстановления целостности корпусных деталей выявил узкие места в существующих методиках восстановления корпусных деталей, а при проведении дальнейшего синтеза решений была предложена следующая технология:

1. Визуальный контроль внешнего вида.
2. Сварка+естественное старение.
3. Термообработка+холодная деформация.
4. Искусственное старение.
5. Окончательная механическая обработка.
6. Окончательная сборка блока.

Для заварки дефектов из существующих способов восстановления была выбрана ручная сварка трехфазной дугой в среде защитных газов. Для устранения появления холодных и горячих трещин рекомендуется подогрев в зонах проведения работ при помощи термоодеял с электроподогревом.

При отмеченной технологии параметры эксплуатационной прочности могут быть достигнуты в течение 16...20 ч. При применении холодного циклического знакопеременного деформирования в диапазоне 2...4% отмечалась максимальная эффективность процесса с точки зрения показателя прочности соединения.

<sup>11</sup> Труды ВИАМ [Электронный ресурс]. – URL: <http://viam-works.ru/ru/>

<sup>12</sup> Анисимова А. Фазовые превращения в сплавах системы Al-Mg-Si-Cu при искусственном старении / Всерос. науч.-исслед. ин-т авиацион. Материалов. – М., 2023. – URL: <https://pandia.ru/text/82/381/39436.php>

После применения рекомендуемой технологии эксплуатационные свойства корпусов повышались на 10...15% по сравнению с проводимыми стандартными операциями восстановления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Schwab K.M., Malleret T. COVID-19: The Great Reset. – Geneva: World Economic Forum. Forum publishing, 2020. – 212 p.
2. Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демьянцевич В.П. Технология и оборудование сварки плавлением: учеб. для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 1977. – 432 с.
3. Потапьевский А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. – М.: Машиностроение, 2004. – 240 с.
4. Восстановление работоспособности соединения «игла-корпус» распылителя форсунок дизельных двигателей / С.В. Пилипенко, О.П. Штемпель, В.А. Фруцкий и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2021. – № 11. – С. 65–72.
5. Лукин В.И., Арзамасов В.Б., Иода А.А. Влияние пластической деформации на свойства алюминиевого сплава ВАД15 и его сварных соединений. // Сварочное производство. – 1999. – № 11. – С. 78.
6. Пилипенко С.В., Фруцкий В.А., Конон М.В. Теплофизические свойства газотермических ремонтных покрытий валов под посадку подшипника // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2019. – № 11. – С. 57–62.

## REFERENCES

1. Schwab, K.M. & Malleret, T. (2020). *COVID-19: The Great Reset*. Geneva: World Economic Forum. Forum publishing.
2. Akulov, A.I., Bel'chuk, G.A. & Demyantsevich, V.P. (1997). *Tekhnologiya i oborudovanie svarki plavleniem: Uchebnik dlya studentov vuzov*. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.)
3. Potap'evskii, A.G. (2004). *Svarka v zashchitnykh gazakh plavyashchimsya elektrodom*. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.)
4. Pilipenko, S.V., Shtempel', O.P., Frutskii, V.A. & Kostritskii, V.V. (2021). Vosstanovlenie rabotosposobnosti soedineniya «igla-korpus» raspylitelya forsunok dizel'nykh dvigatelei [Restoring the Functionality of the “Needle-body” Connection of the Diesel Engine Nozzle Sprayer]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B, Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, (11), 65–72. (In Russ., abstr. in Engl.)
5. Lukin, V.I., Arzamasov, V.B. & Ioda, A.A. (1999). Vliyanie plasticheskoi deformatsii na svoistva alyuminievogo splava VAD15 i ego svarnykh soedinenii. *Svarochnoe proizvodstvo*, (11), 78. (In Russ.)
6. Pilipenko, S.V., Frutskii, V.A. & Konon, M.V. (2019). Teplofizicheskie svoistva gazotermicheskikh remontnykh pokrytii valov pod posadku podshipnika [Thermal Properties of Gas-Thermal Repair Coatings Shafts to Fit Bearings]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B, Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, (11), 57–62. (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 28.06.2024

## TECHNOLOGY FOR RESTORING THE PERFORMANCE OF ENGINE BODY PARTS

V. FRUTSKII, M. SEMENCHENKO  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*The work reveals the development of the technology for repairing the housings of internal combustion engines (ICE).*

*The design of the engine housing is considered, the most repairable zones are identified. It is determined that the elements of the engine housing, which are destroyed in the first place, are the zones most often in contact with the elements of the road surface, as well as the zones of disassembly and adjustment measures and the zones affected by elevated temperatures. Processes causing deformation or destruction of individual parts of engine housing are considered. It has been observed that the main operational defects are concentrated in the upper and lower zones of the engine housing, which imposes certain restrictions on repair and recovery methods and technologies.*

*Proposed technology includes operations for complete preparation of defective emergency zone, elimination of defects, subsequent heat treatment and testing of assembly assembly as a whole. The recommendations for restoring the initial dimensions and mechanical properties of the engine surfaces, taking into account various types of materials, are considered in detail.*

*The operability tests of the housings restored using this technology showed that the operability and technical and operational parameters of the restored units have values that are quite acceptable for operation.*

**Keywords:** *internal combustion engine, failure, engine housing, chip crack, repair-recovery, coupling.*

## ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК: 665.7.038.64

DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-102-108

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСШИХ ЖИРНЫХ СПИРТОВ  
НА ОСНОВЕ НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА  
И АНАЛИЗ ИХ СМАЗЫВАЮЩИХ СВОЙСТВ ДЛЯ ДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВ*д-р техн. наук, проф. С.Ф. ФОЗИЛОВ, А.И. ЗОИРОВА, канд. техн. наук Х.С. ФОЗИЛОВ*  
(Бухарский инженерно-технологический институт)*акад. С.М. ТУРОБЖОНОВ**(Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова)*

В настоящее время внимание нефтегазовой отрасли всего мира направлено на развитие производства дизельного топлива с улучшенными экологическими характеристиками, содержащего минимальное количество серы и ароматических углеводородов.

Выдвинутой нами гипотеза, что в небольших концентрациях растительное масло может улучшить смазывающие свойства топлива, подтвердилась. Для эксперимента было отобрано собственное летнее дизельное топливо Eсо L 0,00-62, изготовленное на Бухарском НПЗ на основе стандартных требований DST 1134:2018, и масло растительное (подсолнечное), произведенное на основе собственных требований DST 2438:2018 в ООО «ЕВРОСНАР». Проведенные эксперименты показали, что добавление растительного масла улучшает смазывающие свойства дизельного топлива, даже не соответствующего ГОСТ 6370-2018<sup>1</sup> по данному параметру; в процентном соотношении  $\delta$  к дизельному топливу почти линейно уменьшает диаметр шара от царапины. В результате исследований получено искомое уравнение зависимости.

**Ключевые слова:** дизельное топливо, присадки, масло, царапина, эффективность, свойства, сера.

**Введение.** Сегодня в мире большое место отводится развитию передовых инновационных технологий, стабилизации и опережающему развитию нефтегазовой отрасли. Достигнуты определенные результаты в создании технологии получения присадок, улучшающих смазывающие свойства дизельного топлива.

С обретением Узбекистаном независимости и началом экономических реформ начался новый этап в развитии нефтяной и газовой промышленности республики. Проект модернизации и реконструкции Бухарского нефтеперерабатывающего завода был направлен на повышение качества нефтепродуктов от требований Евро-2 до требований экологического стандарта Евро-5 и увеличение глубины переработки сырья с 79% до 95%. После модернизации, когда общее количество серы в составе произведенного дизельного топлива уменьшилось с 50 ppm до 10 ppm, резко снизились его смазочные свойства.

Одна из актуальных проблем сегодня – производство импортозамещающих multifunctional присадок с использованием местного вторичного сырья для улучшения смазочных свойств дизельного топлива.

**Основная часть.** На основе высших жирных спиртов производятся различные смазывающие присадки к топливам. К их числу относятся полимерные эфиры метакриловой, дитиофосфорной и других органических и неорганических кислот. Сложные эфиры спиртов C<sub>7</sub>-C<sub>9</sub> и метакриловой кислоты в свою очередь служат основой для получения вязкостных, депрессорных и смазывающих присадок к дизельным топливам и маслам. Одним из видов загущающих присадок являются полимеризаты сложных эфиров метакриловой кислоты и одноатомных спиртов (молекулярный вес полимеров от 5 000 до 20 000).

В дизельном топливе (ДТ Евро-5) содержание серы по норме ГОСТ 6370<sup>1</sup> не более 10 мг/кг, содержание углеводородов также соответствует требованиям данного стандарта. При работе двигателя на таком топливе уменьшаются его шум и вибрация, облегчается запуск двигателя, снижается расход топлива. Это топливо предназначено для предотвращения преждевременного износа деталей двигателя. Оно экологично; низкое содержание углеводородов и серы снижает выброс продуктов сгорания в атмосферу.

Результаты испытаний смазочных присадок для дизельных двигателей представлены в таблице 1.

– ASTM D использует HFRR для измерения смазывающей способности дизельного топлива с высоким значением 520 мкм (ASTM D 6079)<sup>2</sup>;

– HFRR в качестве эталонного метода и ISO приняты для определения смазывающей способности не более 460 мкм (ISO 12156-1)<sup>3</sup>;

– рекомендуется HFRR менее 460 мкм SAE (на основе ASTM D 6079).

<sup>1</sup> ГОСТ 6370-2018 Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей. – М.: Стандартинформ, 2019. – 11 с.

<sup>2</sup> СТ РК АСТМ Д 6079-2010 Метод определения смазывающей способности дизельных топлив = Standard test method for evaluating lubricity of diesel fuels by the high-frequency reciprocating rig (HFRR), IDT). – Астана: Госстандарт, 2010. – 15 с.

<sup>3</sup> ГОСТ ISO 12156-1-2012 Топливо дизельное. Определение смазывающей способности на аппарате HFRR. Ч. 1. Метод испытаний (ISO 12156-1:2006, IDT). – М.: Стандартинформ, 2013. – 20 с.

Согласно договоренности между FIE и производителями, смазывающую способность топлива следует измерять с помощью теста HFRR, приведенного в ISO 12156-1<sup>4</sup>, для определения диаметра пятна размазывания менее 460 мкм.

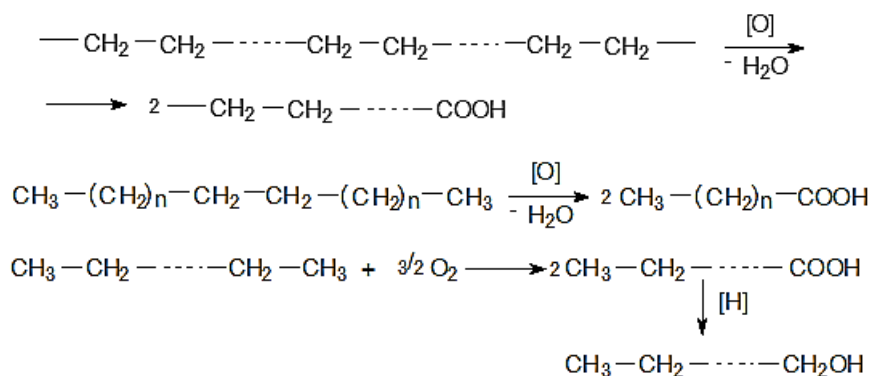
Таблица 1. – Результаты испытаний смазочных материалов для дизельного топлива БНПЗ

Название образцов	Количество присадки, %	Норма по стандарту	Диаметр пятна износа, мкм
Евро-5 дизельное топливо Образец 1 (без добавления присадки)	0,0163	ASTM D высший показатель 520 мкм	520
Образец 2 (с добавлением присадки)	0,0163	по ИСО 460 мкм	460
Образец 3 (с добавлением присадки)	0,0163	по CAE 460 мкм	465

Как известно, высшие жирные спирты синтезируют разными способами на базе нефтехимического сырья и методом восстановления карбоновых кислот, выделенных из природных жиров.

Метод получения жирных спиртов гидрированием продуктов окисления низкомолекулярного полиэтилена (НМПЭ) осуществляли следующим образом: НМПЭ окисляли кислородом воздуха; промывали; затем оксидант гидрогенизовали на цинкхромовом катализаторе и разделяли гидрогенизат на две фракции. Гидрогенизат первой фракции подвергали этерификации борной кислотой, далее углеводороды отгоняли от боратов, промывали и возвращали на окисление. Бораты гидролизовали водой, борную кислоту регенеровали, спирты подвергали гидроочистке на меднохромовом катализаторах. Затем спирты ректифицировали на 5 фракций. Выход первичных спиртов достигал 97–99 %.

В лабораторных условиях синтетические жирные спирты получали с помощью катализаторов окисления нефтяных отходов низкомолекулярного полиэтилена при 100–106 °С кислородом. Затем гидрированием получали жирные спирты. Данный процесс протекал по следующей схеме:



При окислении разрывы молекулы парафина происходят в разных местах, поэтому в итоге получается смесь жирных кислот с различным числом углеродных атомов. Далее полученную смесь перегоняли на дефлегмационной колонке для выделения узкой фракции. Для приготовления присадок, улучшающих качество дизельного топлива, применяли две фракции: C<sub>10</sub>-C<sub>16</sub> и C<sub>17</sub>-C<sub>20</sub>, соответственно.

Топливная карта мира предлагает использовать HFRR с верхним пределом 400 мкм. Основные показатели дизельного топлива Евро-5 по ГОСТ P52368<sup>5</sup> показаны в таблице 2.

Таблица 2. – Основные показатели дизельного топлива (ДТ Евро-5)

Обозначение спецификации	Значения
<i>1</i>	<i>2</i>
Количество цетана, не меньше	51
Для 1 класса	49
Индексы цетана, не меньше	46
Плотность при 15 °С, кг/м <sup>3</sup>	820–845
Плотность при 15 °С для класса 1, кг/м <sup>3</sup>	800–845

<sup>4</sup> ГОСТ ISO 12156-1-2012 Топливо дизельное. Определение смазывающей способности на аппарате HFRR. Ч. 1. Метод испытаний (ISO 12156-1:2006, IDT). – М.: Стандартинформ, 2013. – 20 с.

<sup>5</sup> ГОСТ P52368-2005 (ЕН 590:2004) Топливо дизельное Евро. Технические условия. = EN 590:2004 Automotive fuels – Diesel – Requirements and test methods (MOD). – М.: Стандартинформ, 2009. – 42 с.

Окончание таблицы 2

1	2
Полисахаридные ароматические углеводороды, % (по массе), не более	11
Содержание серы в топливе, мг/кг, не более	10
Температура воспламенения в закрытом тигле, °С	55
Коксуемость, при вспышке 10%-ая остаточная коксуемость, % (по массе), не более	0,30
Использование, % (по массе), не более	0,01
Количество воды, мг/кг, не более	200
Общее загрязнение, мг/кг, не более	24
Коррозия медной пластины (3 °С при 50 °С), класс по степени	1 класс
Стойкость к окислению, г/м <sup>3</sup> , не более	25
Смазывающая способность: диаметр пятна при 60 °С, мкм, не более	460
Кинематическая вязкость при 40 °С, мм <sup>2</sup> /с	2–4,5
Кинематическая вязкость при 40 °С для класса 1, мм <sup>2</sup> /с	1,5–4

Физико-химические свойства дизельного топлива с добавлением смазочной присадки представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Физико-химические свойства дизельного топлива с добавлением смазочных присадок

Присадки	Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	Кинематическая муфта при 40 °С	Температура застывания, °С	Содержание серы, ppm	Температура воспламенения, °С	Диаметр пятна, мкм
Зарубежная присадка	–	–	–	–	–	186
Образец 1	0,835	2,83	–12	9	80	195
Образец 2	0,837	3,02	–13	10	80	113
Образец 3	0,840	3,29	–13	33	81	133
ГОСТ Р52368	0,816–0,8417	2,00–4,50		10	55	<460

Таким образом, предлагаемая синтетика позволяет получить экологически чистое дизельное топливо с улучшенной смазкой и низким содержанием серы из высокомолекулярных спиртов и присадок.

Как видно, смазывающая способность по методу ASTM Д 6079<sup>6</sup> при добавлении в дизельное топливо 0,0163% синтезированных смазочных присадок улучшается. Диаметр пятна износа равен 400 мкм в образце 3 при 60 °С, что соответствует требованиям стандарта.

*Влияние растительных масел на смазывающие свойства дизельного топлива.* Требования к качеству дизельного топлива постоянно ужесточаются с целью повышения экологической безопасности, снижения дымности и токсичности выхлопных газов дизельных двигателей.

Одним из общепризнанных способов снижения воздействия дизельных двигателей на окружающую среду считается использование нетрадиционных моторных топлив, в т.ч. природного происхождения, например, растительных масел и их производных. Во многих отраслях промышленности существует потребность в таких присадках. Однако здесь возникают трудности, препятствующие их широкому применению в высоких концентрациях: с одной стороны, высокая стоимость, с другой – ухудшение их низкотемпературных свойств и уменьшение количества цетаного числа.

Еще одно требование, предъявляемое к дизельному топливу, – снижение содержания в нем серы. При этом топлива с низким содержанием серы должны содержать присадки, улучшающие смазывающие свойства.

Однако некоторые исследователи отмечают, что показатели качества топлива могут отличаться на разных заправочных станциях. В частности, несоответствие установленным требованиям к свойствам смазки-III существенно влияет на ресурс системы подачи топлива дизельного двигателя, в первую очередь системы Common Rail. Этот факт приводит к ухудшению экологических характеристик двигателей, а также к увеличению эксплуатационных расходов.

В связи с вышесказанным нами была выдвинута гипотеза, что в небольших концентрациях растительное масло может улучшить смазывающие свойства топлива.

Попытки применения масел в качестве добавки для улучшения смазочных свойств уже предпринимались, но в этих работах применялись и другие методы, не соответствующие стандарту ГОСТ ISO 12156-1-2012<sup>7</sup>. В большинстве исследований отмечалось положительное влияние эфиров растительных масел на смазывающие свойства топлив, но высокая стоимость эфиров и ограниченность распространения эфиров мало привлекали к использованию в эксплуатации.

<sup>6</sup> СТ РК АСТМ Д 6079-2010 Метод определения смазывающей способности дизельных топлив = Standard test method for evaluating lubricity of diesel fuels by the high-frequency reciprocating rig (HFRR), IDT). – Астана: Госстандарт, 2010. – 15 с.

<sup>7</sup> ГОСТ ISO 12156-1-2012 Топливо дизельное. Определение смазывающей способности на аппарате HFRR. Ч. 1. Метод испытаний (ISO 12156-1:2006, IDT). – М.: Стандартинформ, 2013. – 20 с.



Для эксперимента было отобрано собственное летнее дизельное топливо Eсо L 0,00-62, изготовленное на Бухарском НПЗ на основе стандартных требований DST 1134:2018, и масло растительное (подсолнечное), произведенное на основе собственных требований DST 2438:2018 в ООО «ЕВРОСНАР».

В экспериментах использовано 6 образцов топлива с объемным содержанием растительного масла 0–25% в смеси. Причина, по которой остановились на этом диапазоне изменения концентрации масла, заключается в том, что дальнейшее увеличение содержания масла в топливе существенно влияет на рабочий процесс двигателя, т.е. на эффективность работы и жесткость.

Во время испытаний в топливо (смесь) погружали 3 специально подготовленные пластины, шлифованные до зеркального оттенка, и подвергали двусторонней обработке. Также были выбраны 6 металлических шариков диаметром 6 мм.

Очистка поверхностей до и после испытаний проводилась с использованием обезжиривателя. Перед тем, как впрыскивать топливо в устройство для исследования, топливо измерялось с помощью медицинской экспериментальной пипетки.

Топливо, залитое в агрегат, изначально нагревалось до температуры 60 °С. Эта температура поддерживалась для каждого образца топлива на протяжении всего исследования.

Процесс высокочастотного (50 Гц, амплитуда 1 мм) поступательного/обратного движения шарика по пластине, расположенной на дне ванны топливного устройства по ГОСТ 12156-1-2012<sup>8</sup>, длился 75 мин (каждый тест). По истечению времени испытаний топливо Sinalma и пара шарик–пластина заменялись на другой образец.

После очистки шарика и пластины обезжиривателем их упаковывали отдельно, шрамы от царапин анализировали под микроскопом.

Результаты испытаний эксплуатационных свойств дизельной топливной смеси, приготовленной с добавлением подсолнечного масла в качестве смазочной добавки, приведены в таблице 4.

Таблица 4. – Примеры дизельных топливных смесей, приготовленных с добавлением растительного масла

Образцы	Количество дизельного топлива		Количество растительного масла		Общий объем смеси мл
	%	мл	%	мл	
Образец 1	100	40	0	0	40
Образец 2	95	38	5	2	40
Образец 3	90	36	10	4	40
Образец 4	85	34	15	6	40
Образец 5	80	32	20	8	40
Образец 6	75	30	25	10	40

При анализе смазывающих свойств дизельного топлива, приготовленного с добавлением 12,79% растительного масла, было установлено, что диаметр царапины равен 400 мкм в образце 3 при 60 °С и соответствует стандартному требованию смазывающей способности по методу ASTM D 6079<sup>9</sup>.

Для визуальной оценки шрамов от царапин и измерения их размера использовался микроскоп модели Tourcammodel с цифровой камерой UCMOS 09000 КРВ (рисунок 1). Максимальное разрешение камеры составляет 3488×2616 (около 9 000 000 пикселей). Размер пикселя – 1,67 мкм×1,67 мкм, а очень высокая чувствительность позволяет детально рассмотреть царапины.

Камера подключается к персональному компьютеру с интерфейсом USB. Для просмотра цифрового изображения с камеры на персональном компьютере установлена специальная программа Poqview. Обычно шрам от царапин представляет собой совокупность нескольких царапин, которые образуются в направлении движения шара. Они будут намного больше в направлении оси абсцисс по сравнению с направлением оси ординат.

В некоторых случаях, например, при тестировании эталонных жидкостей с небольшой смазывающей способностью, шрамы от царапин, а также границы непрозрачной поверхности шрама от царапин ярко выделяются, и точные размеры шрама могут быть легко измерены. В других случаях центральная соскобленная часть шрама окружена менее выраженной областью износа с нечеткой поверхностью царапин, а граница между поверхностью с царапинами и поверхностью без царапин на шаре не видна. Некоррелированный средний диаметр шрама от царапины MWSD, мкм, рассчитывается по формуле

$$MWSD = \frac{x + y}{2},$$

где  $x$  – размер шрама от царапины, перпендикулярной возвратно-поступательному движению, мкм;  
 $y$  – размер шрама от царапины, параллельной возвратно-поступательному движению, мкм.

<sup>8</sup> ГОСТ ISO 12156-1-2012 Топливо дизельное. Определение смазывающей способности на аппарате HFRR. Ч. 1. Метод испытаний (ISO 12156-1:2006, IDT). – М.: Стандартинформ, 2013. – 20 с.

<sup>9</sup> СТ РК АСТМ Д 6079-2010 Метод определения смазывающей способности дизельных топлив = Standard test method for evaluating lubricity of diesel fuels by the high-frequency reciprocating rig (HFRR), IDT). – Астана: Госстандарт, 2010. – 15 с.



Рисунок 1. – Цифровой микроскоп Tourcammodel

Впоследствии диаметр шрама от царапин корректировали в соответствии с требованиями ГОСТ 12156-1-2012<sup>10</sup> с учетом абсолютного давления насыщенных паров, влажности и температуры окружающей среды в момент начала и окончания испытания.

На рисунке 2 показаны изображения царапин от сфер, сделанные с помощью цифрового микроскопа с микроскопа на модели Tourcammodel. Для удобства на картинке сразу указываются размеры пятен.

Расчет корректируемого диаметра шрамов от царапин первого шара производился с учетом следующих данных: температура окружающего воздуха  $t = 25$  °С, влажность  $RH = 39\%$ .

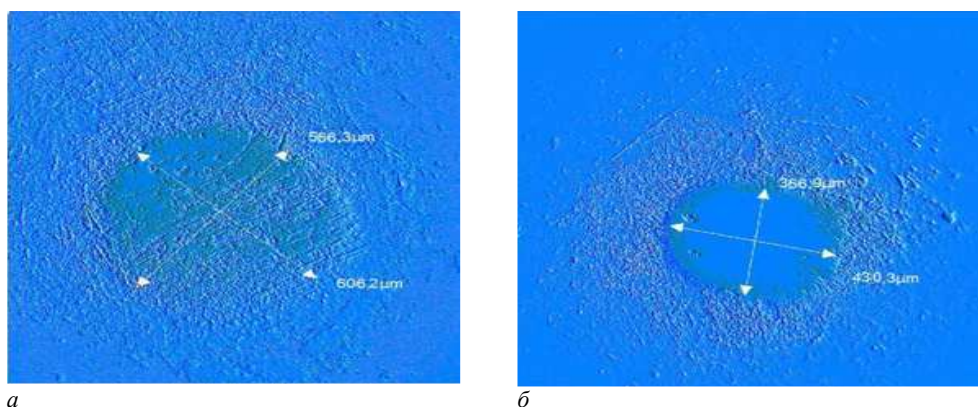


Рисунок 2. – Шариковые царапины на чистом дизельном топливе (а) без добавок и на дизельном топливе (б), приготовленном с добавлением 10% растительного масла по объему

Средний диаметр некоррелированного шрама от царапин  $MWSD$  определялся как

$$MWSD = \frac{606,2 + 566,3}{2} = 586,25 \text{ мкм},$$

$$v = 8,017352 - \frac{1705,984}{231,864 + 25} = 1,376 \text{ мкм}.$$

Абсолютное давление насыщенного пара в начале (конце) испытания.

$$AVP_1 = \frac{39 \cdot 10^{1,376}}{750} = 1,236.$$

Результаты расчетов суммируются в таблице 5.

Принимаем коэффициент коррекции влажности  $HCF$  равным 60. Тогда

$$WS_{1,4} = 586,25 + 60(1,376 - 1,236) = 594,65 \text{ мкм}.$$

При анализе сфер под микроскопом температура и влажность окружающего воздуха не менялись. Расчеты для других сфер аналогичны.

$$WS_{1,4} = 579,38 - 13,653 \cdot \delta (R^2 = 0,96).$$

<sup>10</sup> ГОСТ ISO 12156-1-2012 Топливо дизельное. Определение смазывающей способности на аппарате HFRR. Ч. 1. Метод испытаний (ISO 12156-1:2006, IDT). – М.: Стандартинформ, 2013. – 20 с

Таблица 5. – Результаты измерений шрамов от царапин и расчетов скорректированных значений диаметров пятен

№	Масло, %	x, мкм	y, мкм	MWSD, мкм	$RH_1 = RH_2$ , %	$t_1 = t_2$ , °C	$\nu$	$AVP_1 = AVP_2$	WS1.4, мкм
1	0	606,2	566,3	586,25	39	25	1,376	1,236	594,65
2	5	495,7	485,1	489,9	39	25	1,376	1,236	498,3
3	10	466,3	382,9	422	39	25	1,376	1,236	430,4
4	15	358,1	298,6	315,25	39	25	1,376	1,236	323,65
5	20	345,6	325,8	330,05	39	25	1,376	1,236	338,45
6	25	288,2	163,4	220,5	39	25	1,376	1,236	228,9

По результатам расчетов был составлен график зависимости диаметра шаровой царапины от содержания масла в дизельном топливе (рисунок 3). График задается линейным уравнением линии тренда и коэффициентом надежности аппроксимации  $R^2$ .

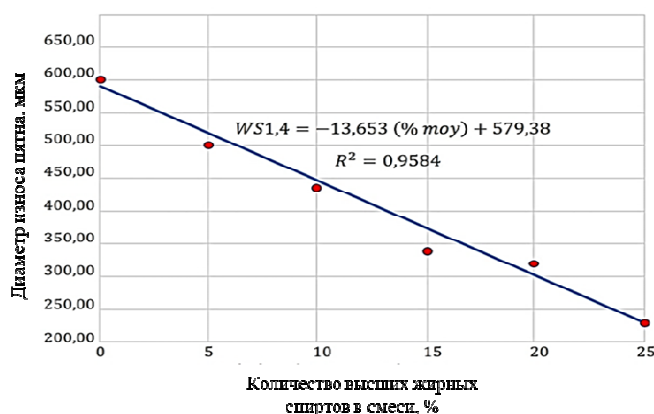


Рисунок 3. – График зависимости диаметра износа пятна шарика от количества синтезированной присадки в дизельном топливе

**Заключение.** Синтез высших жирных спиртов на основе использования местного вторичного сырья, при добавке которых улучшаются смазывающие и вязкостные свойства дизельного топлива, на данный момент считается актуальной темой. Исходя из этого приоритетной задачей остается получение таких спиртов, которые можно использовать в качестве присадок для дизельных топлив. Таким образом, ввод полученных нами из высших жирных спиртов присадок в дизельное топливо приводит к улучшению физико-химических свойств.

На основе проведенных исследований сделано заключение о перспективности и целесообразности анализа смазывающих и эксплуатационных свойств синтезированных присадок.

1. Качество дизельного топлива, реализуемого на АЗС, может не отвечать требованиям по параметрам смазочных свойств. В частности, на образце Sinalma диаметр царапин в 1,3 раза больше значения, установленного в ГОСТ ISO 12156-1-2012<sup>11</sup>.

2. Добавление растительного масла улучшает смазывающие свойства дизельного топлива, даже не соответствующего ГОСТ 6370-2018<sup>12</sup> по данному параметру.

3. Проведенные эксперименты показывают, что добавление растительного масла в процентном соотношении  $\delta$  к дизельному топливу почти линейно уменьшает диаметр шрама от царапин. В результате исследований было получено уравнение зависимости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов А.М. Применение присадок в топливах для автомобилей: справ. изд. – М.: Химия, 2000. – 232 с.
2. Данилов А.М. Присадки к топливам // Химия и технология топлив и масел. – 2007. – № 2. – С. 47–56.
3. Данилов А.М. Присадки к топливам, используемые в России // Мир нефтепродуктов. – 2004. – № 2. – С. 2–6.
4. Данилов А.М. Разработка и применение присадок к топливам в 2006–2010 гг.: аналитический обзор // Химия и технология топлив и масел. – 2011. – № 6. – С. 41–45.
5. Дизельные топлива и присадки, допущенные к применению в 2001–2004 гг. / Т.М. Митусова, Е.Е. Сафонова, Г.А. Брагина и др. // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2006. – № 1. – С. 12–19.
6. Противозносные присадки в дизельное топливо и их развитие / Х.С. Фозилов, А.С. Мавлонова, Ш.Ф. Хамроев и др. // Sanoat injeneriyasining dolzarb muammolari: respublika ilmiy-amaliy anjumani / Buxoro (20–22 okt. 2021 yil.). – S. 376–377.

<sup>11</sup> ГОСТ ISO 12156-1-2012 Топливо дизельное. Определение смазывающей способности на аппарате HFRR. Ч. 1. Метод испытаний. – М.: Стандартинформ, 2019. – 21 с.

<sup>12</sup> ГОСТ 6370-2018 Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей. – М.: Стандартинформ, 2019. – 11 с.

7. Получение и изучение высших жирных спиртов и их применение в нефтехимической промышленности. «Universum: технические науки» / Х.С. Фозилов, М.З. Шарипов, С.Ф. Фозилов др. // *Universum: Technical sciences.* – 2021. – № 11(92). – Ч. 4. – С. 97–100. DOI: 10.32743/UniTech.2021.92.11.12559
8. Фозилов Х.С. Нормал парафин углеводородларни оксидаб юкори ёғ спиртлари олиш ва уларни дизель ёқилғисининг физик-кимёвий хоссаларини яхшилашда қўллаш // *Фан ва технологиялар тараққиёти. Илмий техникавий журнал.* – 2021. – № 1. – С. 110–115.
9. Синтез и изучение высших жирных спиртов на основе промышленных отходов и их применение для улучшения свойств дизельных топлив / О.Б. Ахмедова, М.З. Комилов, С.Ф. Фозилов и др. // *Universum: технические науки.* – 2020. – № 2(71). – Ч. 2. – С. 75–78.
10. Противознозные присадки в дизельное топливо и их развитие / С.Ф. Фозилов, А.С. Мавлонова, Х.С. Фозилов и др. // *Sanoat injeneriyasining dolzarb muammolari: respublika ilmiy-amaliy anjumani.* – 2021. – S. 376–377.
11. Фозилов Х.С., Туробжонов С.М., Фозилов С.Ф. Синтез высших жирных спиртов из парафинов для улучшение смазывающие свойства дизельных топлив // *Назарий ва экспериментал кимё ҳамда кимёвий технологиянинг замонавий муаммолари: Халқаро илмий-амалий анжумани материаллари / Карши (20 окт. 2023 yil.).* – S. 413–415.

## REFERENCES

1. Danilov, A.M. (2000). *Primenenie prisadok v toplivakh dlya avtomobilei: spravochnoe izdanie.* – Moscow: Khimiya. (In Russ.)
2. Danilov, A.M. (2007). Prisadki k toplivam. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel [Chemistry and Technology of Fuels and Oils]*, (7), 47–56. (In Russ.)
3. Danilov, A.M. (2004). Prisadki k toplivam, ispol'zuemye v Rossii. *Mir nefteproduktov [World of Petroleum Products]*, (2), 2–6. (In Russ.)
4. Danilov, A.M. (2011). Razrabotka i primeneniye prisadok k toplivam v 2006–2010 gg.: analiticheskii obzor. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel [Chemistry and Technology of Fuels and Oils]*, (6), 41–45. (In Russ.)
5. Mitsova, T.M., Safonova, E.E., Bragina, G.A. & Barmina, L.V. (2006). Dizel'nye topliva i prisadki, dopushchennyye k primeniyu v 2001–2004 gg. *Neftepererabotka i neftekhimiya*, (1), 12–19. (In Russ.)
6. Fozilov, Kh.S., Mavlonova, A.S., Xamroev, Sh.F., Rakhimova, M.R. & Fozilov, S.F. (2021). Protivoiznosnye prisadki v dizel'noe toplivo i ikh razvitiye. *Sanoat injeneriyasining dolzarb muammolari: respublika ilmiy-amaliy anjumani* (Bukhara, 20–22 okt. 2021 yil), 376–377. (In Russ., in Uzbek)
7. Fozilov, X.S., Sharipov, M.Z., Fozilov, S.F., Mavlonov, B.A. & Faibullaeva, A.F. (2021). Poluchenie i izuchenie vysshikh zhirnykh spirtov i ikh primeneniye v neftekhimicheskoi promyshlennosti [Obtaining and Studying Higher Fatty Alcohols and their Application in the Petrochemical Industry]. *Universum: tekhnicheskie nauki*, 11(92), ch. 4, 97–100. (In Russ., abstr. in Engl.) DOI: 10.32743/UniTech.2021.92.11.12559
8. Fozilov, S.F. (2021). Normal paraffin hydrocarbons oxidlab yukori eg spirtlari olish va ularni diesel ekilgisining physici-st-kimeviy hossalari ni yahshilashda kyllash. *Fan va tekhnologiyalar tarakkiet i. Ilmiy teknikaviy magazine*, (1), 110–115. (In Russ., in Uzbek)
9. Akhmedova, O.B., Komilov, M.Z., Fozilov, S.F., Mavlonov, Sh.B., Razhabov, S.Kh., Tursunov, A.S. & Ergasheva, Kh. (2020). Sintez i izuchenie vys-shikh zhirnykh spirtov na osnove promyshlennykh otkhodov i ikh primeniye dlya uluchsheniya svoistv dizel'nykh topliv [The Synthesis and Study of Higher Fatty Alcohol Based on Factory Waste and their Use for Property Improvement of Diesel Oil]. *Universum: tekhnicheskie nauki*, 2(71), ch. 2, 75–78. (In Russ., abstr. in Engl.)
10. Fozilov, Kh.S., Mavlonova, A.S., Fozilov, X.S., Xamroev, Sh.F. & Rakhimova M.R. (2021). Protivoiznosnye prisadki v dizel'noe toplivo i ikh razvitiye. *Sanoat injeneriyasining dolzarb muammolari: respublika ilmiy-amaliy anjumani*, 376–377. (In Russ., in Uzbek)
11. Fozilov, H.S., Turobzhonov, S.M. & Fozilov, S.F. (2023). Synthesis of higher fatty alcohols from paraffins to improve the lubricating properties of diesel fuels // *Nazari va experimental kimeamda kimeviy tekhnologiyaning zamonaviy muammolari: Khalkaro ilmiy-amali anjumani materialari / Karshi (20 okt. 2023 yil.),* 413–415.

Поступила 15.07.2024

**PRODUCTION OF HIGHER FATTY ALCOHOLS  
BASED ON LOW MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE  
AND ANALYSIS OF THEIR LUBRICATING PROPERTIES FOR DIESEL FUELS**

**S. FOZILOV, A. ZOIROVA, Kh. FOZILOV  
(Bukhara Engineering-Technological Institute)  
S. TUROBZHONOV**

**(Tashkent State Technical University Named after Islam Karimov)**

Currently, the attention of the oil and gas industry around the world is focused on the development of diesel fuel production with improved environmental characteristics, containing a minimum amount of sulfur and aromatic hydrocarbons. Our hypothesis that in small concentrations vegetable oil can improve the lubricating properties of fuel was confirmed. For the experiment, our own summer diesel fuel Eco L 0.00-62, manufactured at the Bukhara Oil Refinery based on the standard requirements DST 1134:2018, and vegetable oil (sunflower) produced based on our own requirements DST 2438:2018 at EUROSINAR LLC were selected. The experiments showed that the addition of vegetable oil improves the lubricating properties of diesel fuel, even if it does not meet GOST 6370-2018 for this parameter; in percentage terms  $\delta$  to diesel fuel, it almost linearly reduces the diameter of the scratch scar. As a result of the research, the desired equation of dependence was obtained.

**Keywords:** diesel fuel, additives, oil, scratch, efficiency, properties, sulfur.

УДК 678.74.033.541.64.539.3

DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-109-115

## ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО ЦЕОЛИТА НА ПРОЧНОСТНЫЕ И ДИФфуЗИОННО-СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИОЛЕФИНОВ

*д-р техн. наук, проф. С.Ф. ФОЗИЛОВ, И.И. ФАТОВЕВ, А.С. КАСИМОВ, А.И. ЗОИРОВА*  
(Бухарский инженерно-технологический институт)  
*канд. пед. наук, доц. И.В. БУРАЯ*  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Исследованы прочностные свойства полиолефинов (ПЭНП и ПЭВП), наполненных высокодисперсными частицами цеолита. Установлено, что увеличение содержания наполнителя приводит к росту растягивающего напряжения при разрыве. Неоднородность проявляется в разрушении всех без исключения стандартных литевых образцов при растяжении в той части рабочего участка, которая максимально удалена от литника. Обосновываются причины разрыва, снижения прочности и неодинаковая прочность по длине литевых образцов при растяжении.

**Ключевые слова:** прочность, цеолит, структурная макронеоднородность, разрушающие напряжения при растяжении, относительное удлинение при разрыве, литевые образцы, литье под давлением, высоконаполненный полиэтилен.

**Введение.** На текущий момент наибольшее распространение получили композиции на основе полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) и активированных при механическом помоле частиц кальцита ( $\text{CaCO}_3$ ), туфа, каолина, перлита, талька, графита и т.п. Они используются в различных отраслях народного хозяйства в качестве тары, труб, емкостей для хранения и транспортировки жидких сред, а также культурно-бытовых изделий. От степени однородности структуры существенно зависят эксплуатационные и технологические свойства полимерных композиций [1; 2]. Степень однородности полимерных композиций определяет возможность их переработки высокопроизводительными методами и, в особенности, литьем под давлением.

Следует особо отметить, что количественное определение структурной макронеоднородности дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов необходимо для оценки качества смешения композиции и формирования работоспособных изделий из них. С этой целью была предпринята попытка использовать стандартные литевые образцы для количественного анализа технологической неоднородности изделий из дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов.

В настоящей работе обобщены результаты экспериментального исследования структуры, прочностных и диффузионно-сорбционных свойств полиолефинов, наполненных высокодисперсными частицами цеолита.

**Основная часть. Постановка задачи.** Объектами исследования служили композиционные материалы на основе полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) марки 11102-020 с плотностью  $0,873 \text{ г/см}^3$  и полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) марки 20908-040 (ГОСТ 16338-77<sup>1</sup>) с показателем текучести расплава 4,9 г/10 мин и плотностью  $0,945 \text{ г/см}^3$ . В качестве наполнителя использовался цеолит с дисперсностью 7–10 мкм. Содержание наполнителя в полимерной матрице составляло 5, 20, 35 и 50% масс. Полимерные композиции получали в виде гранул методом активации поверхности наполнителей при механическом помоле. Образцы для испытаний – в виде двухсторонних лопаток с размерами  $80 \times 5 \times 3 \text{ мм}$  (ГОСТ 11262-80<sup>2</sup>, тип 5) литьем под давлением в соответствии с традиционной технологией. Разрушающее напряжение образцов при растяжении изучали на разрывной машине «Instron ТМ-М» при скорости подвижного зажима, равной 5 мм/мин. Каждая точка на прямых зависимости разрушающего напряжения при растяжении от длины образца (рисунок 1) является результатом усреднения более десяти параллельных испытаний. Поверхность разрушения образцов со стороны литника и с противоположной стороны изучали в проходящем свете с помощью микроскопа МБИ-6.

**Методология исследований.** Существенная структурная макронеоднородность изделий из полимерных композиционных материалов может быть обнаружена при стандартных механических испытаниях литевых образцов.

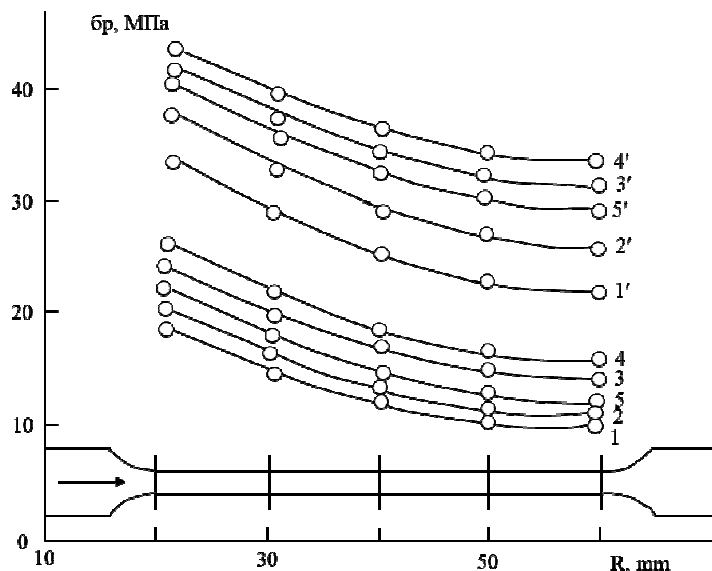
Экспериментально было установлено, что на физико-механические свойства литевых изделий из дисперсно-наполненных полимеров влияет не только микроструктура композиции, но и макроскопическая однородность изделия в целом. Неоднородность проявляется в разрушении всех без исключения стандартных литевых образцов при растяжении в той части рабочего участка, которая максимально удалена от литника.

<sup>1</sup> ГОСТ 16338-77 Полиэтилен низкого давления. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2005. – 35 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 11262-80 Пластмассы. Метод испытания на растяжение (СТ СЭВ 1199-78). – М.: Гос. ком. СССР по стандартам, 1986. – 16 с.

Локализация места разрушения литевых образцов указывает на одну из причин неоднородности изделий: наличие остаточных напряжений, возникающих при течении остывающего расплава внутри формы и охлаждении образцов.

Справедливость такого предположения подтверждает существенная зависимость разрушающего напряжения при растяжении и относительного удлинения при разрыве стандартных литевых образцов от места разрушения [1; 2]: чем дальше от литника, тем ниже прочность образца. Полученные результаты представлены на рисунке 1.



**Рисунок 1. – Зависимости разрушающего напряжения при растяжении наполненных литевых образцов ПЭНП (1–5) и ПЭВП (1'–5') от расстояния до литника.**  
Содержание цеолита в полимере (% масс.): 1,1' – 0; 2,2' – 5; 3,3' – 20; 4,4' – 35; 5,5' – 50% (стрелкой показано направление литья)

Аналогичная закономерность установлена при изучении деформационных свойств дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов. Экспериментально доказано, что независимо от природы полимера и высокодисперсного наполнителя разрушающее напряжение при растяжении образцов вблизи литника существенно выше, чем в максимально удаленной от него точке.

Ранее [1] экспериментально было установлено, что и деформируемость образца вблизи литника почти вдвое больше, чем в максимально удаленной от него точке. Градиент прочности вдоль оси образца не столь значителен, но направлен также, как градиент деформационных свойств. Неодинаковая прочность стандартных образцов по длине лишь косвенно свидетельствует о структурной макронеоднородности изделий из полимерных композиционных материалов, поэтому было проведено исследование поверхностей разрушения образцов при изгибе. Характер поверхности излома образцов, содержащих 50% цеолита, указывает на смешанный (упруговязкий) процесс разрушения дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов. Часть исследованных поверхностей разрушения содержала визуально определяемые структурные макронеоднородности в виде сферических пустот или микрокапилляров преимущественно в центре сечения рабочего участка образцов, полученных литьем под давлением в холодных прессформах. Однако большинство образцов в местах разрушения не имело видимых дефектов. Причина разрушения литевых образцов в последнем случае не может быть установлена фактографически и не позволяет провести количественный анализ.

Экспериментально определено, что прочностные показатели композиции зависят от содержания цеолита и характера распределения частиц в объеме полимерной матрицы. Установлено, что наибольшей прочностью обладают композиции, полученные на основе ПЭВП. В области содержания наполнителя от 0 до 50% наполненные ПЭНП и ПЭВП имеют высокие прочностные показатели по сравнению с их величинами для ненаполненных полимеров. Это объясняется тем, что модифицирующая добавка, введенная в полимерную матрицу, распределяясь между макромолекулами аморфной фазы полимера, облегчает взаимное перемещение надмолекулярных структур, что способствует их взаимной ориентации, приводящей к повышению прочности полимерных материалов.

Отмечено, что с увеличением содержания наполнителя материал становится хрупким и величина относительного удлинения образцов при разрыве резко снижается.

Существенная структурная макронеоднородность литевых изделий из композиций обнаружена не только при стандартных механических испытаниях, но и методом набухания микрообразцов в физически активных

жидких средах [3], так что практически все стандартные литевые образцы, испытываемые на прочность при одноосном растяжении, разрушаются в той части рабочего участка, которая максимально удалена от литникового канала [1]. Причем наблюдаемое явление не зависит от природы полимера и высокодисперсного наполнителя, а также от его содержания в полимерной матрице. Более того, предварительная термообработка готовых литевых изделий из композиций в воздушной среде или неабсорбируемых жидкостях при температурах, близких к температуре плавления полимерной матрицы, не приводит к изменению места очагов разрушения. Однако до настоящего времени нет подробного описания этого явления.

Поскольку все полимерные изделия, полученные литьем под давлением, в той или иной степени ориентированы [4], то изменение гибкости цепочек молекул при ориентации макромолекул полимера должно приводить к изменению коэффициентов массопереноса низкомолекулярных веществ. Исследование кинетики сорбции низкомолекулярных веществ твердыми полимерными композициями является своеобразным «молекулярным щупом», позволяющим изучать структуру композитов и их дефектность, а также оценивать физические процессы, лежащие в основе сорбционных явлений [5].

Кинетика набухания образцов в физически активных жидкостях (*n*-гептане, *o*-ксилоле и тетрахлорметане (CCl<sub>4</sub>)) изучалась сорбционным методом при 293±2 °С. Коэффициент диффузии (*D*) среды оценивали по кинетическим кривым набухания образцов согласно ГОСТ 12020-72<sup>3</sup>.

Поскольку ориентация и внутренние напряжения, возникающие в материале, распределяются по сечению и длине отливки неравномерно [6], то для оценки дефектности структуры наполненных материалов литевые образцы разделили в зависимости от расстояния литника на три равные части, как это показано на рисунке 2.

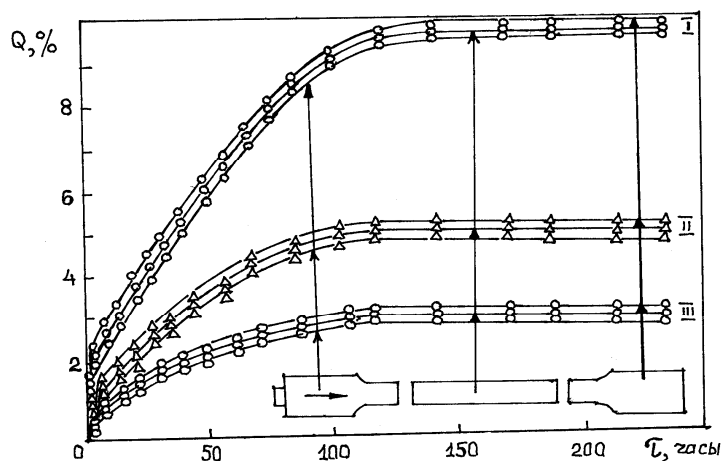


Рисунок 2. – Кинетика набухания литьевого наполненного ПЭВП, содержащего 50% масс. цеолита, в CCl<sub>4</sub> (I), *o*-ксилоле (II) и *n*-гептане (III) в зависимости от расстояния литника

Видно, что наибольший *D* и степень набухания в выбранных жидкостях имеют те образцы, которые максимально удалены от литникового канала. Аналогичная зависимость установлена в случае испытания литевых образцов наполненных полимеров в указанных жидкостях независимо от содержания и природы наполнителя (кальцита, каолина, графита, туфа), введенного в полиэтиленовую матрицу.

Наблюдаемое явление объясняется тем, что максимальная степень ориентации достигается в зоне впрыска материала в форму, а у противоположной стенки формы она минимальная [6]. К тому же, ориентация макромолекул, происходящая, как правило, при литье под давлением, идет преимущественно поперек движения потока полимерного расплава [7]. Продольная ориентация макромолекул возникает только в тех случаях, когда расплав протекает в очень узких каналах с сечением менее 1 мм<sup>2</sup>. Только на первом участке изделия, находящемся непосредственно после литникового канала, макромолекулы располагаются вдоль оси потока, и это приводит к увеличению прочности композиции. С увеличением степени ориентации макромолекул степень набухания образцов снижается. Кроме того, кристаллические ламели регулярно расположены в литевых изделиях преимущественно перпендикулярно направлению литья [6]. Интенсивные сдвиговые воздействия на расплав полимера активизируют превращения, приводящие к изменению его молекулярно-массовых характеристик [7]. Следствием специфических условий литья под давлением является различие уровней изменения молекулярно-массовых характеристик полимера в объеме полости формы. Неоднородность этих характеристик полимера в сечении изделия, перпендикулярном направлению впрыска расплава, рассмотрена в работах [6–11]. По данным

<sup>3</sup> ГОСТ 12020-72 Пластмассы. Методы определения стойкости к действию химических сред. – М.: Гос. ком. СССР по стандартам, 1980. – 23 с.

ИК-спектроскопии и гель-хроматографии установлено, что низкомолекулярная фракция полимера располагается у поверхности литьевого образца. Для ненаполненного ПЭВП [8], а также композиций [12] пребывание материала в узле пластикации, прохождение его через литниковую систему приводит к доминированию процесса деструкции. При этом на расстояниях 20 и 60 мм от литникового канала величина средней молекулярной массы ( $M_w$ ) полимера составляет  $201 \cdot 10^3$  и  $140 \cdot 10^3$ , соответственно. Это и приводит к снижению прочности и увеличению степени набухания дисперсно-наполненного полимерного материала.

Следует отметить, что деформационно-прочностные и диффузионно-сорбционные свойства полимерных композиций определяются природой и содержанием полимера и наполнителя, их строением и свойствами, формой, средним размером частиц наполнителя, их распределением в объеме полимерной матрицы, структурно-механической неоднородностью межфазной границы [13]. Дефектность структуры наполненных полимерных материалов непосредственно связаны со способами приготовления композиции и методами их переработки в изделия.

Введение наполнителей в расплав способствует перераспределению вблизи границы с наполнителем низко- и высокомолекулярных фракций полимера. В результате формируются граничные слои с измененной структурой. Регулярность упаковки макромолекул в них понижается [14], что приводит к появлению дефектов структуры.

Подчеркнем, что поверхность реальных твердых наполнителей никогда не бывает идеально гладкой. Она покрыта многочисленными неровностями с размерами от нескольких межатомных расстояний до десятков микрон. Разнообразные шероховатости, поры, микротрещины, неоднородности химического состава и локальные деформации оказывают сильное влияние не только на смачивание твердой поверхности наполнителя полимерным расплавом, но и на дефектность структуры получаемых полимерных композиций. В ряде случаев даже крайне незначительные примеси на поверхности наполнителя могут изменить характер смачивания и скорость кристаллизации. Царапины, параллельные направлению течения расплава, могут ускорять растекание, тогда как поперечные царапины вызывают его замедление. При увеличении коэффициента шероховатости скорость растекания уменьшается [15]. Кроме того, ряд дефектов структуры самого наполнителя (поры, узкие капилляры и т.д.) оказываются недоступными для высоковязкого расплава, причем их количество возрастает с увеличением молекулярной массы полимера и содержания наполнителя.

Наряду с этим контакт расплава с твердой поверхностью не бывает абсолютно полным даже в случае низковязкой жидкости. Краевой угол смачивания и вязкость расплава оказывают значительное влияние на кинетику процесса заполнения микрошероховатостей поверхности. Поверхности наполнителя, не смачиваемые расплавом полимера, могут препятствовать кристаллизации и приводить к дефектности структуры [16]. С другой стороны, увеличение поверхностной энергии наполнителя, повышая скорость зародышеобразования, приводит к подавлению роста кристаллов [17; 18]. К тому же на поверхности раздела фаз могут появиться микротрещины из-за неполного смачивания частиц наполнителя расплавом полимера и концентрации напряжений у полимерной матрицы и твердой поверхности. Концентрация напряжений возникает у границы раздела фаз на некотором расстоянии от поверхности наполнителя. При высоких содержаниях наполнителя уровень напряжений в полимерной матрице оказывается выше, чем на поверхности раздела. Если учесть высокую вязкость и низкую подвижность макромолекул в граничном слое [18], то полимер, находящийся здесь, не должен вспениваться. Следовательно, вспенивается полимер, находящийся в свободных и недоступных объемах наполненной композиции [19], что приводит к дефектности структуры наполненного полимера.

Полимерная матрица, у которой термический коэффициент расширения значительно выше, чем у высокодисперсного минерального наполнителя, «обжимает» частицы, что препятствует появлению подвижности фаз на границе раздела даже при слабой адгезионной связи. Термический коэффициент расширения полимера в поверхностном слое при температурах выше и ниже температуры стеклования закономерно увеличивается с ростом удельной поверхности наполнителя [20]. Это оказывает влияние на возникновение в тонких слоях полимера на наполнителе неплотной упаковки и увеличение на них доли свободного объема [21]. Иначе говоря, термический коэффициент расширения с увеличением содержания твердых частиц наполнителя обоснованно повышается.

Основная особенность кристаллического состояния полимеров заключается в том, что полимер никогда не бывает полностью закристаллизован. Большая роль дефектов в аморфно-кристаллических полимерах связана с тем, что кристаллизация полимеров идет, как правило, в неравновесных и неизотермических условиях. Но даже при определенной температуре кристаллизации вследствие полидисперсности полимера и нерегулярности его цепей возможен набор кристаллов разной дефектности, что и приводит к существенному изменению дефектности полимерных композиций в целом и интервала плавления. Дефектными участками могут быть также фрагменты макромолекул в граничных слоях, которые в силу топологических или кинетических ограничений потеряли способность кристаллизоваться [16; 21].

В процессе формирования изделий из расплава полимера охлаждение поверхности и внутреннего объема происходит неравномерно, что приводит к появлению внутренних напряжений и микроскопических трещин и пор на его поверхности. Своеобразие условий кристаллизации полимеров в литевых формах приводит



к получению изделий, имеющих сложную структуру. В литевых изделиях возникают три области с различной структурой: поверхностная оболочка, средние слои и центральные слои блока<sup>4</sup> [11; 22]. Более подробная информация о слоистом характере структуры упрочненных образцов полиэтилена получена нами [23] при оптико-поляризованном исследовании. Экспериментально показано, что упрочненные литевые образцы имеют четырехслойную макроструктуру в отличие от трехслойной макроструктуры неупрочненных образцов, исследование которой проводилось рядом авторов<sup>4</sup> [11; 22]. Авторы цитируемых работ отмечают, что выделенные слои неоднородны, в свою очередь подразделяются на зоны и характеризуются большими различиями по морфологии. Структурная макронеоднородность слоев приводит к существенному изменению деформационно-прочностных и диффузионно-сорбционных свойств упрочненных полимерных материалов. Если время выдержки под давлением меньше, чем время охлаждения литника, то центральная часть детали рыхлая с разрушенными образованиями и дефектами. При резком охлаждении рвутся напряженные цепи, а кристаллиты оказываются соединенными весьма ограниченным числом проходных цепей. Если кристаллическая фаза полимера состоит из крупных сферолитов, занимающих почти весь объем образца, он обычно разрушается по границам сферолитов из-за недостатка проходных цепей между ними. Заметим, что такой образец может обладать незначительной степенью кристалличности, т.к. сферолиты сами могут содержать относительно большую долю аморфного материала [24].

Ориентация макромолекул, происходящая при литье под давлением, обычно сопровождается изменением формы и относительного расположения молекул полимера, что вызывает перераспределение химических и межмолекулярных связей по направлению ориентации. При этом происходит пространственно-неравномерное образование поперечных связей, приводящее к возникновению участков полимера с высокой плотностью сшивок. Это провоцирует дефектность структуры и анизотропию свойств литевых изделий.

Следует отметить, что основной причиной аномального изменения деформационно-прочностных и диффузионно-сорбционных свойств дисперсно-наполненных полиолефинов является неоднородность их структуры и состава. В реальных полимерах существуют участки с относительной упорядоченностью в расположении мономерных единиц (ближний порядок), которые чередуются с участками, где этот порядок нарушен. Последние возникают вокруг таких топологических структур, как петли, складки, различные переплетения полимерных цепей, а также на концах макромолекул. Вероятно, большинство участков с нарушенным ближним порядком (единицы нарушения порядка (ЕНП)) образуются при синтезе полимера или его осаждении из раствора, сохраняются в течение всего срока существования данного образца полимера и не исчезают даже при плавлении. Совокупность разнообразных ЕНП называется устойчивым топологическим беспорядком, определяющим многие свойства полимера.

Особенность кристаллизующихся полимеров (полиэтилена, полипропилена, полиамида и т.п.) – неполнота кристаллизации. Физической причиной, препятствующей полной кристаллизации полимерного вещества, является наличие устойчивого беспорядка в расположении полимерных цепей. Кристалличность, т.е. содержание кристаллического вещества, в таких полимерах варьирует, как правило, в широком интервале (от 20 до 80%) и может обратимо изменяться с температурой и, вероятно, давлением. Неполнота кристаллизации означает, что в индивидуальном гомополимере в некотором интервале температур и давлений существуют две фазы: кристаллическая и аморфная. Складки, узлы и переплетения длинных полимерных цепей являются центрами сорбции и не исчезают при плавлении полимера [25].

Центрами сорбции могут быть различные микропустоты, образование которых не связано непосредственно с беспорядком в расположении полимерных цепей и которые исчезают при прессовании образцов под повышенным давлением [26].

Существуют процессы, в которых присутствующие в полимерном веществе элементы топологического беспорядка можно рассматривать как частицы, в той или иной степени отличающиеся по свойствам и реакционной способности от окружающего их относительно упорядоченного вещества, а распределение элементов беспорядка в полимерном веществе можно рассматривать как негативное изображение его морфологической (надмолекулярной) структуры. Поэтому если не учитывать беспорядок в качестве отдельного компонента, свойства полимера не будут однозначной функцией его состава и молекулярно-массового распределения [25].

**Заключение.** Таким образом, установлено, что с помощью высокодисперсного цеолита как модифицирующей добавки можно регулировать технологические и физико-механические характеристики конструктивных полимерных материалов. Плотность упаковки макромолекул, дефектность структуры, степень кристалличности и прочностные показатели, а также диффузионно-сорбционные свойства литевых изделий из полимерных композиционных материалов тесно связаны с неоднородностью молекулярно-массовых характеристик полимерной матрицы и неравномерностью распределения частиц наполнителя в морфологических зонах изделия и могут быть объяснены различием условий формирования материала.

---

<sup>4</sup> Марусенко В.В. Исследование влияние основных технологических факторов процесса литья под давлением на качество деталей из полиолефинов: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1972. – 160 л.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Оценка макронеоднородности норпластов методом краевого надреза / В.Н. Манин, И.И. Фатоев, Г.А. Патрикеев и др. // Пласт. массы. – 1985. – № 9. – С. 36–38.
2. И.И. Фатоев, В.Н. Манин, А.В. Веселов А.В. и др. // Пласт. массы. – 1986. – № 7. – С. 36–38.
3. Фатоев И.И., Кондратов А.П. Дефектность структуры литевых полимерных изделий // Науч. вестн. Бухар. гос. ун-та. – 2001. – № 4. – С. 53–57.
4. Калинин Э.Л. // Пласт. массы. – 1978. – № 1. – С. 12–17.
5. Манин В.Н., Громов А.Н., Григорьев В.П. Дефектность и эксплуатационные свойства полимерных материалов. – Л.: Химия, 1986. – 184 с.
6. Ориентационные эффекты и структура литевых изделий из полиолефинов / С.П. Морозова, М.Л. Фридман, В.В. Абрамов и др. // Пласт. массы. – 1979. – № 9. – С. 39–42.
7. Натов М.А., Мицулов А.И. О надмолекулярной структуре // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. – 1983. – Т. 25. – № 6. – С. 1140–1148.
8. Молекулярно-массовые характеристики ПЭНД при литье под давлением / М.С. Акутин, В.В. Абрамов, Д.А. Соиреф и др. // Пласт. массы. – 1984. – № 12. – С. 29–30.
9. Будтов В.П., Лопатин А.К., Тихонова Г.П. Механизм релаксационных процессов в микрообъемах литевых изделий из полиэтилена высокой плотности // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. – 1985. – Т. 27. – № 1. – С. 144–155.
10. Влияние молекулярных характеристик на структуру литевых изделий из ПЭНД / Г.П. Тихонова, И.Э. Шехтмейстер, А.Л. Гольденберг и др. // Пласт. массы. – 1981. – № 10. – С. 39–40.
11. Калинин Э.Л., Кацевман М.М. Современные проблемы химии и химической промышленности. – М.: НИИТЭХИМ, 1976. – Вып. 10(35). – 73 с.
12. Фатоев И.И., Назаров Д., Ситамов С. Влияние многократной переработки на свойства высоконаполненного ПЭВП // Пласт. массы. – 1991. – № 7. – С. 40–41.
13. Нельсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций / пер. с англ. П.Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1978. – 312 с.
14. Липатов Ю.С., Файнерман А.Е., Анохин О.В. О роли межфазных явлений в формировании смесей полимеров // Докл. АН СССР. – 1976. – Т. 231. – № 2. – С. 381–384.
15. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия, 1976. – 232 с.
16. Бухина М.Ф. Кристаллизация каучуков и резин. – М.: Химия, 1973. – 240 с.
17. Особенности структурообразования в тонких полимерных пленках / Ю.М. Малинский, И.В. Эпельбаум, Н.М. Титова // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. – 1968. – Т. 10. – № 4. – С. 786–798.
18. Малинский Ю.М. О влиянии твердой поверхности на процесс релаксации и структурообразования в пристенных слоях полимеров // Успехи химии. – 1970. – Вып. 39. – № 8. – С. 1511–1535.
19. Симонов-Емельянов И.Д., Кулезнев В.Н., Трофимичева Л.З. Влияние размера частиц наполнителя на некоторые характеристики полимеров // Пласт. массы. – 1989. – № 5. – С. 61–64.
20. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров. – М.: Химия, 1991. – 264 с.
21. Липатов Ю.С., Фабуляк Ф.Г., Сергеева Л.М. Определение величины свободного объема при температуре стеклования из данных по временам объемной релаксации // Высокомолекулярные соединения. Сер. Б. – 1968. – Т. 10. – № 7. – С. 527–529.
22. Калинин Э.Л., Саковцева М.В. Свойства и переработка термопластов. – Л.: Химия, 1983. – 288 с.
23. Фатоев И.И., Веселов А.В., Сальникова В.Н. Сопоставительный анализ структуры и свойств упрочненных и неупрочненных полимерных материалов // Композиционные и полимерные материалы. Структура, свойства и технологии получения. – Ташкент. УзРНТК «Фан ва тараккиет», 1996. – С. 148–154.
24. Джейл Ф.Х. Полимерные монокристаллы: [пер. с англ.] / под ред. С.Я. Френкеля. – Л.: Химия, 1968. – 552 с.
25. Шляпников Ю.А. Роль топологического беспорядка в физикохимии полимеров // Успехи химии полимеров. – 1997. – Т. 66. – № 11. – С. 1064–1076.
26. Тагер А.А., Аскадский А.А., Цилипоткина М.В. // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. – 1975. – Т. 17. – С. 1346–1351.

## REFERENCES

1. Manin, V.N., Fatoev, I.I., Patrikeev, G.A. i dr. (1985). Otsenka makroneodnorodnostinorplastov metodom kraevogo nadreza. *Plasticheskie massy*, (9), 36–38. (In Russ.)
2. Fatoev, I.I., Manin, V.N., Veselov, A.V., Sal'nikova, V.N., Patrikeev, G.A., Abramov, V.V. ... Kondratov, A.P. (1986). *Plasticheskie massy*, (7), 36–38. (In Russ.)
3. Fatoev, I.I. & Kondratov, A.P. (2001). Defektnost' struktury lit'evykh polimernykh izdelii. *Nauchnyi vestnik Bukharskogo gosuniversiteta*, (4), 53–57. (In Russ., abstr. in Engl.)
4. Kalinchev, E.L. (1978). *Plasticheskie massy*, (1), 12–17. (In Russ.)
5. Manin, V.N., Gromov, A.N. & Grigor'ev, V.P. (1986). *Defektnost' i ekspluatatsionnye svoystva polimernykh materialov*. Leningrad: Khimiya. (In Russ.)
6. Morozova, S.P., Fridman, M.L., Abramov, V.V., Simonov-Emel'yanov, I.D. & Zinchenko, S.A. (1979). Orientatsionnye efekty i struktura lit'evykh izdelii iz poliolefinov. *Plasticheskie massy*, (9), 39–42. (In Russ.)
7. Natov, M.A. & Mitsulov, A.I. (1983). O nadmolekulyarnoi strukture. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A*, 25(6), 1140–1148. (In Russ., abstr. in Engl.)
8. Akutin, M.S., Abramov, V.V., Soiref, D.A., Valiotti, N.N. & Paverman, N.G. (1984). Molekulyarno-massovye kharakteristiki PEND pri lit'e pod davleniem. *Plasticheskie massy*, (12), 29–30. (In Russ.)

9. Budtov, V.P., Lopatin, A.K. & Tikhonova, G.P. (1985). Mekhanizm relaksatsionnykh protsessov v mikroob'emakh lit'evykh izdelii iz polietilena vysokoi plotnosti. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A*, 27(1), 144–155. (In Russ., abstr. in Engl.)
10. Tikhonova, G.P., Shekhtmeister, I.E., Gol'denberg, A.L., & Leosko, E.A. (1981). Vliyanie molekulyarnykh kharakteristik na struktu-ru lit'evykh izdelii iz PEND. *Plasticheskie massy*, (10), 39–40. (In Russ.)
11. Kalinchev, E.L. & Katsevman, M.M. (1976). *Sovremennye problemy khimii i khimicheskoi promyshlennosti*, vypusk 10(35). Moscow: NIITEKHIM. (In Russ.)
12. Fatoev, I.I., Nazarov, D. & Sitamov, S. (1991). Vliyanie mnogokratnoi pererabotki na svoistva vysokonapolnennogo PEVP. *Plasticheskie massy*, (7), 40–41. (In Russ.)
13. Nel'sen, L. (1978). *Mekhanicheskie svoistva polimerov i polimernykh kompozitsii*. Moscow: Khimiya. (In Russ.)
14. Lipatov, Yu.S., Fainerman, A.E. & Anokhin, O.V. (1976). O roli mezhfaznykh yavlenii v formirovanii smesei polimerov. *Doklady AN SSSR*, 231(2), 381–384. (In Russ., abstr. in Engl.)
15. Summ, B.D. & Goryunov, Yu.V. *Fiziko-khimicheskie osnovy smachivaniya i rastekaniya*. Moscow: Khimiya. (In Russ.)
16. Bukhina, M.F. (1973). Kristallizatsiya kauchukov i rezin. Moscow: Khimiya. (In Russ.)
17. Malinskii, Yu.M., Epel'baum, I.V., Titova, N.M. & Kargin, V.A. (1968). Osobennosti strukturoobrazovaniya v tonkikh polimer-nykh plenkach. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A*, 10(4), 786–798. (In Russ., abstr. in Engl.)
18. Malinskii, Yu.M. (1970). O vliyani tverdoi poverkhnosti na protsess relaksatsii i strukturoobrazovaniya v pristennykh sloyakh polimerov. *Uspekhi khimii*, 39(8), 1511–1535. (In Russ., abstr. in Engl.)
19. Simonov-Emel'yanov, I.D., Kuleznev, V.N. & Trofimicheva, L.Z. (1989). Vliyanie razmera chastits napolnitelya na nekotorye kha-rakteristiki polimerov. *Plasticheskie massy*, (5), 61–64. (In Russ.)
20. Lipatov, Yu.S. (1991). *Fiziko-khimicheskie osnovy napolneniya polimerov*. Moscow: Khimiya. (In Russ.)
21. Lipatov, Yu.S., Fabulyak, F.G. & Sergeeva, L.M. (1968). Opredelenie velichiny svobodnogo ob"ema pri temperature steklovaniya iz dannykh po vremenam ob"emnoi relaksatsii. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya B*, 10(7), 527–529. (In Russ., abstr. in Engl.)
22. Kalinchev, E.L. & Sakovtseva M.V. (1983). *Svoistva i pererabotka termoplastov*. Leningrad: Khimiya. (In Russ.)
23. Fatoev, I.I., Veselov, A.V. & Sal'nikova, V.N. Sopotavitel'nyi analiz struktury i svoistv uprochnennykh i neuprochnennykh polimernykh materialov. *Kompozitsionnye i polimernye materialy. Struktura, svoistva i tekhnologii polucheniya* (148–154). Tashkent: UzRNTK «Fan va tarakkiet». (In Russ.)
24. Dzheil, F.Kh. (1968). *Polimernye monokristally*. Leningrad: Khimiya. (In Russ.)
25. Shlyapnikov, Yu.A. (1997). Rol' topologicheskogo besporyadka v fiziko-khimii polimerov. *Uspekhi khimii polimerov*, 66(11), 1064–1076. (In Russ., abstr. in Engl.)
26. Tager, A.A., Askadskii, A.A. & Tsilipotkina, M.V. (1975). *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A*, (17), 1346–1351. (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 29.07.2024

## THE EFFECT OF HIGHLY DISPERSED ZEOLITE ON THE STRENGTH AND DIFFUSION-SORPTION PROPERTIES OF POLYOLEFINS

S. FAZILOV, I. FATOEV, A. KASIMOV, A. ZOIROVA  
(Bukhara Engineering-Technological Institute)  
I. BURAYA  
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

*The paper investigates the strength properties of polyolefins (LDPE and HDPE) filled with highly dispersed zeolite particles. It has been found that an increase in the filler content leads to an increase in tensile stress at rupture. The heterogeneity manifests itself in the destruction of all standard injection molding samples without exception during stretching in the part of the working area that is as far away from the gate as possible. The reasons for the rupture, the decrease in strength and the uneven tensile strength along the length of the injection molding samples are explained.*

**Keywords:** strength, zeolite, structural microuniformity, destructive tensile stresses, elongation at break, injection molding, injection molding, high-filled polyethylene.

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ИЗБЫТОЧНОГО АКТИВНОГО ИЛА

**В.А. ЕМЕЛЬЯНОВА**

*ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0507-0206>*

*канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК*

*ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4398-1796>*

**А.В. КОРНЯКОВА**

*ORCID <https://orcid.org/0009-0007-5301-1458>*

*(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

*Представлен обзор литературы по проблеме переработки избыточного активного ила очистных сооружений, выявлены перспективные способы его утилизации. Рассмотрен состав объекта исследования, в качестве которого был использован избыточный активный ил очистных сооружений ОАО «Слонимский картонно-бумажный завод “Альбертин”». Изучено влияние термообработки избыточного активного ила при 105 °С, 250 °С и 350 °С на его свойства. Получены кривые дифференциального термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии избыточного активного ила. Определена зависимость изменения потери массы образца активного ила при нагревании до 900 °С в воздушной среде от температуры сушки. Также получены ИК-спектры активного ила, просушенного при 105 °С и 350 °С. Исследовано влияние температуры сушки активного ила на изменение характеристик поверхности и распределение пор.*

**Ключевые слова:** *активный ил, утилизация активного ила, термогравиметрический анализ, порометрия.*

**Введение.** Во всем цивилизованном мире проблема переработки различных отходов народного хозяйства стоит чрезвычайно остро. К одним из наиболее трудно утилизируемых отходов относятся остатки сточных вод [1]. Образующийся активный ил накапливается на иловых картах, что приводит к потере ценных земель, выделению ядовитых веществ, аккумуляции соединений тяжелых металлов, а также росту и развитию многих патогенных микроорганизмов. В связи с этим возникает необходимость уменьшения объемов хранения активного ила путем его утилизации [2].

Ил представляет собой многовидовой микробиоценоз в виде хлопьев, покрытых плотной гидратной оболочкой, которая препятствует уплотнению, и содержит до 40% минеральных частиц [3]. В состав ила входят микроорганизмы различных групп, такие как актиномицеты, бактерии, грибы, вирусы, простейшие, членистоногие и многие другие [4]. Суммарная поверхность хлопьев активного ила достигает 100 м<sup>2</sup> на 1 г сухого вещества, что объясняет его очень высокую сорбционную способность [3].

Поиск экологически безопасных способов утилизации избыточного активного ила на сегодня является актуальной темой.

**Основная часть.** *Обзор существующих методик переработки избыточного активного ила очистных сооружений.* На основе анализа научно-технической информации и зарубежного опыта можно выделить следующие способы переработки и утилизации активного ила:

- депонирование на иловых картах;
- биологическая переработка;
- термические методы;
- другие методы.

В Республике Беларусь основным способом утилизации обезвоженного избыточного активного ила остается его складирование на иловых картах и в илонакопителях, где в течение длительного времени протекает биодegradация отходов. Однако данные методы неэффективны и экологически небезопасны<sup>1</sup> [5].

Биологическая переработка ила включает в себя процессы для получения биогаза и органического минерального удобрения. Биохимический метод анаэробного сбраживания позволяет использовать энергетический потенциал отходов. С экономической точки зрения получение биогаза из активного ила выгодно в связи с тем, что себестоимость производства биогаза дешевле, чем природного газа, срок окупаемости экономически минимален, индекс прибыльности – не менее единицы, а внутренняя ставка рентабельности – больше процентной ставки по кредитам [6]. Между тем сложность применяемого оборудования (специальные реакторы) и управления процессом, необходимость очистки биогаза от токсичных примесей сдерживают применение метода в промышленной практике [3].

Ввиду питательной ценности активного ила, его положительного влияния на свойства почв, урожайность и качественный состав культивируемых культур многие исследователи рассматривают возможность примене-

---

<sup>1</sup> Способ утилизации отработанного активного ила очистных сооружений: пат. RU2 680 509 С2 / П.Д. Захаров – Опубл. 21.02.2019.

ния ила в выращивании сельскохозяйственных культур. В осадках сточных вод содержание органических веществ, которые могут служить основой для формирования гумуса, достигает 60%. Осадки сточных вод включают необходимые для развития растений микроэлементы. Однако наличие патогенной микрофлоры и высокие концентрации тяжелых металлов осложняют использование осадков сточных вод в качестве удобрения [7]. Данная тема затрагивается в исследованиях Н.П. Хрипача, С.Н. Жегулина и Е.Г. Камнева<sup>2</sup>.

Широкое распространение получили термические методы переработки избыточного активного ила. К таким методам относятся сжигание и пиролиз. Сжигание применимо в тех случаях, когда невозможна или экономически нецелесообразна утилизация осадка. Это позволяет снизить расход химических реагентов [8]. Компактность оборудования и технологической схемы также можно отнести к достоинствам метода. При этом метод представляет экологическую опасность, т.к. сжигание сопровождается выделением большого количества токсичных пылегазовых выбросов [7]. Одним из современных методов утилизации избыточного активного ила является сжигание его в цементных печах. Данный способ привлекателен и перспективен не только из-за экономической эффективности процесса, но и благодаря его экологичности [8].

Пиролиз представляет процесс переработки углеродсодержащих веществ путем высокотемпературного нагрева без доступа кислорода. В отличие от сжигания в процессе пиролиза наблюдается меньшая загрязненность атмосферы. Но способ не нашел широкого практического внедрения, что связано с недостаточной теоретической и технологической его проработкой, а также токсичностью образующихся продуктов [9]. К недостаткам пиролиза можно отнести то, что происходит потеря органического вещества, а также выпадение из сферы биологического круговорота некоторых биофильных макро- и микроэлементов [5]. Известны способы переработки осадков биологических очистных сооружений посредством пиролиза в присутствии реагентов с получением сорбентов. Недостаток способа – образование в процессе пиролиза токсичных газов, что приводит к необходимости применения сложных, трудо- и ресурсозатратных технологий очистки газовых выбросов (серо- и хлорсодержащие и хлорорганические соединения) и размещения твердых продуктов переработки, которые при термической утилизации концентрируют в себе тяжелые металлы<sup>3</sup>.

Б.С. Ксенофонтовым, Е.Е. Гончаренко, Ю.А. Борисовым было предложено использование ила в качестве биофлокулянта [10]. Это решает задачу не только его утилизации, но и интенсификации процесса очистки сточных вод. Следует отметить, что финансовые затраты в этом случае связаны только с транспортировкой ила [10].

Биомасса избыточного активного ила при определенных условиях может быть использована в качестве белково-витаминной добавки при строгом выполнении санитарного контроля<sup>4</sup>. Ее использование в рационе сельскохозяйственных животных балансирует корм по витаминам и белку.

Еще в 1939 г. была выдвинута идея об использовании бактериального белка в качестве сырья для изготовления пластмассовых изделий. Активный ил характеризуется большим содержанием общего азота, входящего в состав белка, и ничтожным содержанием клетчатки. Из активного ила извлекалось 10–20% бактериального белка, содержащего около 13% общего азота и большое количество фосфора. Таким образом, бактериальные белки из активного ила могут в значительной мере заменить белки растительного и животного происхождения [11].

Технология инактивации (автолиза) микробной биомассы очистных сооружений позволяет получить при ее применении качественные пластификаторы для дорожных бетонов и асфальтов. Это дает возможность снизить затраты на дорожное строительство, при этом отмечается повышение качества строительных материалов. В работе К.С. Черновой, М.М. Бауриной и Н.Б. Градовой [12] анализируется процесс автолиза активного ила метантенков очистных сооружений при различных параметрах процесса.

В публикации [13] Е.С. Белик приводит результаты экспериментальных исследований по получению биосорбента на основе микроорганизмов-нефтедеструкторов и карбонизата – отхода низкотемпературного пиролиза избыточного активного ила биологических очистных сооружений нефтехимического предприятия. Использование карбонизата позволит сократить объемы складированных в окружающей среде отходов и наиболее полно использовать их ресурсный потенциал.

В статье А.Е. Шурдовой [14] рассматривается избыточный активный ил как сырье для получения магнитных углеродных сорбентов. Магнитные сорбенты не только способствуют ликвидации аварийных разливов нефти на водных поверхностях, но и в качестве сырья для переработки. Применение парокислородной газификации позволяет достичь полного превращения углеродной составляющей в газообразные источники чистой энергии.

В работе Е.В. Москвичевой, А.А. Войтюка, Э.П. Доскиной, Д.О. Игнаткиной, Ю.Ю. Юрьева и Д.В. Щитова [15] впервые предложено использование образующегося избыточного активного ила в качестве вторичного сырья для получения адсорбционного материала, извлекающего ионы цинка, меди и никеля из стоков до биологической очистки, что позволяет далее активному илу полноценно взаимодействовать с остальными ионами, не теряя своих функций.

<sup>2</sup> Способ переработки избыточного активного ила: пат. RU2 782 605 C1 / Н.П. Хрипач, С.Н. Жегулин, Е.Г. Камнев. – Оpubл. 31.10.2022.

<sup>3</sup> Кузнецова Л.Н. Пиролиз осадков сточных вод ЦБП с получением органоминеральных адсорбентов для очистки промышленных стоков: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03. – Архангельск, 2000. – 20 с.

<sup>4</sup> Рудакова А.О. Применение активного ила в качестве исходного технологического сырья для производства органического удобрения (на примере ПАО «КуйбышевАзот» г. Тольятти): дис. ... магистра пед. наук: 20.04.01. – Тольятти, 2019. – 101 л.

Еще один способ утилизации избыточного активного ила представлен в исследованиях Б.С. Ксенофонта, А.С. Козодаева и Р.А. Таранова [16; 17]. Они рассматривают вопросы выделения редкоземельных металлов из золошлаков путем проведения ряда технологических операций. Для процесса концентрирования редкоземельных металлов (скандий, иттрий, лантан) в растворе в качестве реагента-собираателя использовался избыточный активный ил. Ими было установлено, что активный ил обладает высокой сорбционной способностью к скандию. Также вопросом выделения тяжелых металлов занимались В.П. Панов, И.В. Зыкова Е.А. Алексеева<sup>5</sup>. Ими разработан способ упрощения технологии выделения тяжелых металлов из ила с последующим использованием органического вещества ила в сельском хозяйстве. Похожий способ выделения тяжелых металлов представлен В.Н. Марцуль, А.Б. Мошевым, А.Е. Авсеевым, Т.А. Жарской<sup>6</sup>. В их работе описана методика удаления тяжелых металлов перед депонированием избыточного активного ила. Эффективность удаления металлов из избыточного активного ила составляет не менее 50% для меди, цинка, свинца и кадмия.

Основные области применения активного ила приведена на рисунке 1.

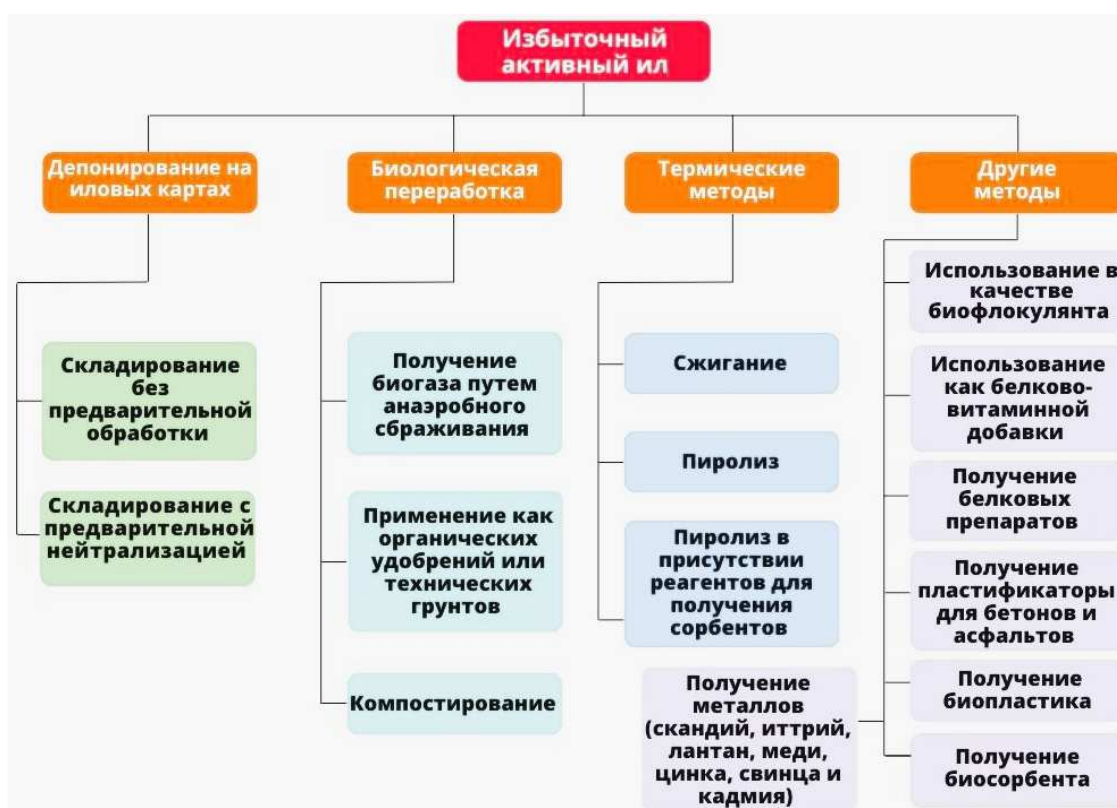


Рисунок 1. – Способы утилизации избыточного активного ила очистных сооружений

В ходе обзора научной литературы и патентного анализа способов переработки избыточного активного ила была выявлена перспективность его переработки путем термодеструкции с целью дальнейшего использования в качестве компонента твердых топлив или сорбентов.

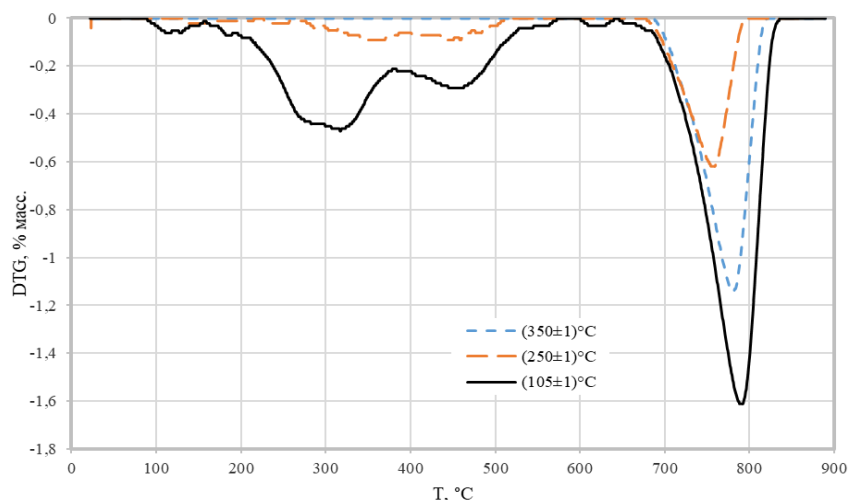
*Исследовательская часть.* В качестве объекта исследований использовался избыточный активный ил с очистных сооружений ОАО «Слонимский картонно-бумажный завод “Альбертин”». Он образуется в процессе биологической очистки производственных сточных вод в аэротенках. Объем образования ила составляет 1200 т/год.

Избыточный активный ил состоит из 92,23% влаги и 7,77% сухого вещества, который в свою очередь включает 59,33% органического вещества, 5,23% азота, 2,37% фосфора и 0,14% калия. Во влажном избыточном активном иле содержатся такие металлы, как свинец (2,35 мг/кг), кадмий (0,09 мг/кг), марганец (27,24 мг/кг), хром (1,50 мг/кг), никель (1,01 мг/кг) и цинк (12,15 мг/кг). Кислотность активного ила составляет 7,77.

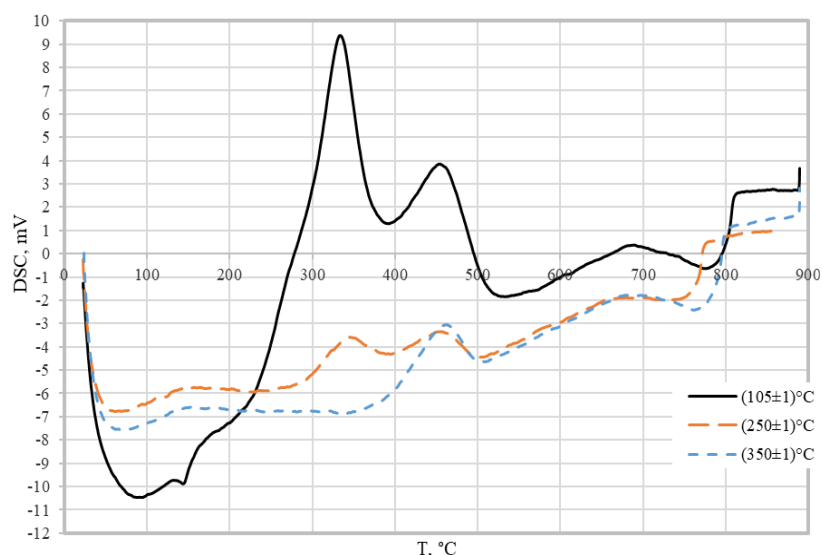
<sup>5</sup> Способ переработки избыточного активного ила, содержащего тяжелые металлы: пат. RU2 133 231 C1 / В.П. Панов, И.В. Зыкова, Е.А. Алексеева. – Оpubл. 20.07.1999.

<sup>6</sup> Способ удаления тяжелых металлов из избыточного активного ила: пат. BY5554 C1 / В.Н. Марцуль, А.Б. Мошев, А.Е. Авсеев, Т.А. Жарская. – Оpubл. 30.09.2003.

Термогравиметрический анализ образцов избыточного активного ила после термообработки в течение 2 ч при температуре 105 °С, 250 °С и 350 °С проводился при помощи термогравиметрического анализатора LR-TGA101. Результаты анализа представлены на рисунках 2–5.



**Рисунок 2.** – Кривые дифференциального термогравиметрического анализа активного ила, просушенного при температурах (105±1) °С, (250±1) °С и (350±1) °С



**Рисунок 3.** – Результаты дифференциальной сканирующей калориметрии активного ила, просушенного при температурах (105±1) °С, (250±1) °С и (350±1) °С

В области от 200 °С до 800 °С у просушенного активного ила при 105 °С и 250 °С наблюдается три пика потери массы, у просушенного активного ила при 350°С наблюдается только два.

Рассмотрим образец просушенного активного ила при 105 °С. Первый пик с наибольшей удельной энтальпией (экзотермический эффект) равен 332,6 °С, энтальпия 55,2 Дж/г. Для второго пика экзотермический эффект равен 455,6 °С, энтальпия 26,1 Дж/г. Третий пик (эндотермический эффект) для активного ила 777,9°С, энтальпия 17,6 Дж/г.

Для образца, состоящего из просушенного активного ила при 250 °С, можно выделить следующее. Первый пик с удельной энтальпией (экзотермический эффект) равен 345,1 °С, энтальпия 22,7 Дж/г. Для второго пика экзотермический эффект равен 457,7 °С, энтальпия 21,1 Дж/г. Третий пик (эндотермический эффект) с наибольшей удельной энтальпией для активного ила 737,8 °С, энтальпия 37,0 Дж/г.

Для просушенного активного ила при 350 °С первый пик с удельной энтальпией (экзотермический эффект) равен 460,5°С, энтальпия 25,5 Дж/г. Второй пик (экзотермический эффект) с наибольшей удельной энтальпией для активного ила равен 764,1 °С, энтальпия 36,8 Дж/г.

Как видно из рисунка 4, зависимость потери массы от температуры сушки активного ила имеет линейную зависимость. Потеря массы для просушенного активного ила при 105 °С, 250 °С и 350 °С составила соответственно 51,85% масс., 40,66% масс., 31,41% масс.

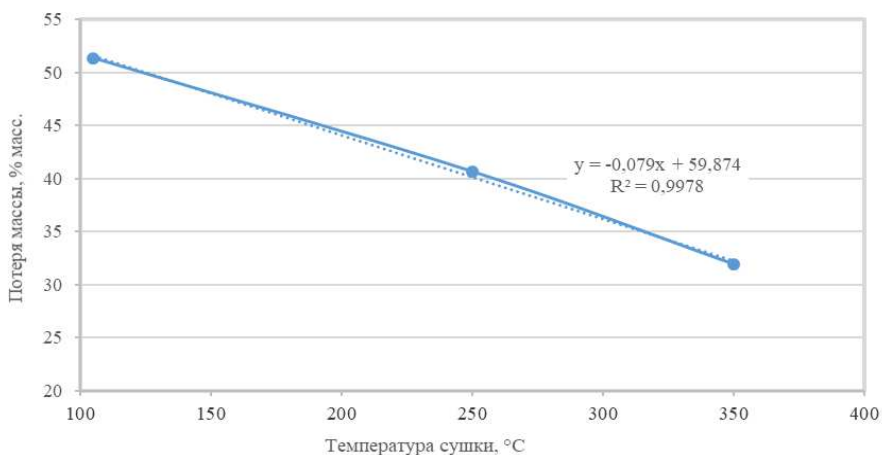


Рисунок 4. – Зависимость изменения потери массы образца активного ила при нагревании до 900 °С в воздушной среде от температуры сушки

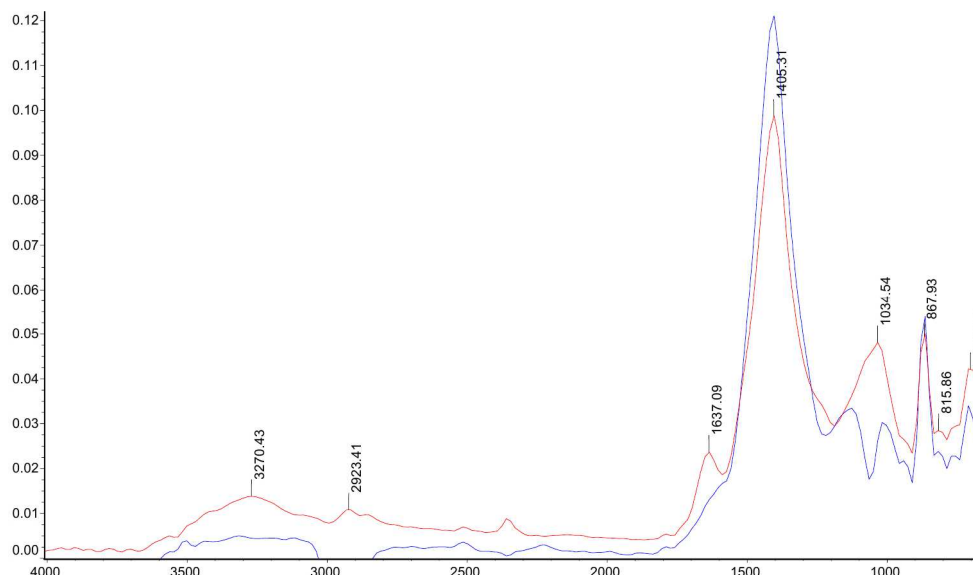


Рисунок 5. – ИК- спектры активного ила, просушенного при (105±1) °С и (350±1) °С

Таблица. – Характеристики поверхности и пор образцов (адсорбтив СО<sub>2</sub> при температуре 298 К),  $p_0 = 101,3$  кПа

Показатель	Активный ил после термообработки в течение 2 ч при температуре, °С	
	105	350
Удельная площадь поверхности по методу ВЕТ, м <sup>2</sup> /г	2,6562	4,8063
Суммарный объем пор по методу ВЕТ, мм <sup>3</sup> /г	3,477	5,292
Константа С	10,314	12,55
Средний диаметр пор по методу ВЕТ, нм	5,2362	4,4043
Удельная площадь поверхности по методу Ленгмюра, м <sup>2</sup> /г	14,418	16,147
Константа адсорбционного равновесия – отношение констант скорости адсорбции/десорбции	0,009818	0,02017
Потенциальная энергия адсорбции по методу DA (метод Дубинина–Астахова), Дж/моль	3,4607	4,2606

Если сравнивать ИК-спектры активного просушенного активного ила при 105 °С и 350 °С, представленные на рисунке 5, то следует отметить следующее. В образце, просушенном при 350 °С, почти не содержится азотосодержащих соединений органического происхождения (аминокислот) по сравнению с образцом, просушенным при 105 °С. Также наблюдается уменьшение количества непредельных соединений, гетероатомных соединений (амидов, спиртов). В активном иле, просушенном при 350 °С, также происходит уменьшение углеводородных групп, таких как -CH<sub>3</sub>, -CH<sub>2</sub>-.



Основной пик представлен карбонатами и примесями, причем содержание данных компонентов выше в образце, состоящем из просушенного активного ила при 350 °С.

Изучение характеристик поверхности и распределения пор в образцах активного ила после термообработки в течение 2 ч при температурах 105 °С и 350 °С проводилось при помощи анализатора площади поверхности и распределения пор BELSOPR MAX. Перед проведением испытаний образцы подвергались сушке и дегазации под вакуумом при температуре 160 °С в течение 1 ч. Далее были получены изотермы адсорбции и десорбции исследуемых образцов при температуре 298 К. В качестве адсорбтива использовался углекислый газ (см. таблицу).

Как видно из данных таблицы, активный ил, просушенный при 105 °С, – полярное непористое вещество. При повышении температуры сушки до 350 °С в воздушной среде это уже низкопористое вещество, полярность которого снижается с повышением температуры термообработки.

**Заключение.** Перспективными способами утилизации избыточного активного ила является его переработка путем термодеструкции с целью дальнейшего использования в качестве компонента твердых топлив или сорбентов. Результаты, полученные в ходе проведенных исследований, свидетельствуют о том, что при увеличении температуры сушки активного ила происходит термическое разложение (пиролиз) органического вещества. Низкий экзотермический эффект просушенных образцов связан с фазовым переходом минеральных компонентов, а также реакцией окисления и разложения солей, например, карбонатов или фосфатов. Также просушивание активного ила при более высоких температурах способствует повышению удельной поверхности и суммарного объема пор.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Состав микробного сообщества активного ила в процессах совместной биологической и реагентной очистки сточных вод / Л.М. Сибиева, И.А. Дегтярева, А.С. Сироткин и др. // Изв. вузов. Приклад. химия и биотехнология. – 2019. – Т. 9, № 2. – С. 302–312. DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-2-302-3
2. Акимова И.А., Ткач П.Д., Сыч О.О., Утилизация биомассы активного ила: учеб. – М.: Высш. шк., 2015. – Т. 16. – 156 с.
3. Ручай Н.С., Маркевич Р.М. Экологическая биотехнология: учеб. пособие. – Минск: БГТУ, 2006. – 311 с.
4. Неволлина И.В., Брагин В.А. Утилизация осадков сточных вод коксохимического производства после биологической очистки // Система управления экологической безопасностью: сб. тр. XVII междунар. науч.-практ. конф. / Екатеринбург (19–20 мая 2023 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2023. – С. 255–260.
5. Путырская Е.А., Бельская Г.В. Анализ методов утилизации активного ила при очистке сточных вод // Сб. материалов 72-й студенч. науч.-техн. конф. / Минск (20–28 апр. 2016 г.). / Белорус. нац. техн. ун-т, фак. горн. дела и инженер. экологии. – Минск: БНТУ, 2016. – С. 69–72.
6. Калинина Е.В., Добрынина О.М. Экспериментальные исследования по получению биогаза из избыточного активного ила г. Перми // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2012. – Т. 4. – С. 323–329.
7. Горелова О.М., Титова К.Ю. Исследования по утилизации избыточного активного ила // Ползун. вестн. – 2015. – № 4. – Т. 1. – С. 114–116.
8. Способ обезвреживания и утилизации отработанного активного ила / Е.Ю. Брызгина, Р.Р. Насыров, З.А. Латыпова и др. // Нефтегазовое дело. – 2014. – № 3. – С. 124–132.
9. Экологически безопасный способ утилизации осадков сточных вод биохимических очистных сооружений с получением углеродсодержащих сорбционных материалов / Я.И. Вайсман, И.С. Глушанкова, М.С. Дьяков и др. // Вода: химия и экология. – 2011. – № 3. – С. 14–24.
10. Ксенофонтов Б.С., Гончаренко Е.Е., Борисов Ю.А. Использование избыточного активного ила как биофлокулянта для биохимической очистки воды // Евраз. союз ученых. Пром. биотехнологии. – 2019. – № 10. – С. 23–27.
11. Евилевич А.З. Удаление, обработка и использование осадков сточных вод. – Л.; М.: Гос. изд-во лит. по стр-ву и архитектуре, 1954. – 227 с.
12. Чернова К.С., Баурина М.М., Градова Н.Б. Изучение влияния автолизатов активного ила метантенков на прочностные характеристики строительных материалов // Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. – 2019. – Т. XXXIII. – № 5. – С. 47–48.
13. Белик Е.С. Получение нефтяного биосорбента на основе карбонизата – отхода пиролиза избыточного активного ила // Вестн. Казан. технол. ун-та. – 2017. – № 14. – С. 120–124.
14. Шурдова А.Е. Магнитный углеродный сорбент для ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на водоемах // Время науки – The times of science. – 2023. – № 4. – С. 31–36.
15. Совершенствование технологии очистки городских сточных вод с использованием сорбента на основе избыточного активного ила / Е.В. Москвичева, А.А. Войтюк, Э.П. Доскина и др. // Инженер. вестн. Дона. – 2015. – № 2. – Ч. 2. – С. 1–14.
16. Разработка комплексной технологии выщелачивания редкоземельных металлов из золотшлаков и проблема концентрирования растворов этих металлов / Б.С. Ксенофонтов, А.С. Козодаев, Р.А. Таранов и др. // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 3. – С. 44–49.
17. Ксенофонтов Б.С., Козодаев А.С., Таранов Р.А. Проблемы выделения редкоземельных металлов из угольной золы в виде растворов и их концентрирование // Экология и пром-сть России. – 2016. – Т. 20. – № 4. – С. 12–15. DOI: 10.18412/1816-0395-2016-4-12-15

#### REFERENCES

1. Sibieva, L.M., Degtyareva, I.A., Sirotkin, A.S. & Babynin, E.V. (2019). Sostav mikrobnogo soobshchestva aktivnogo iла v protsessakh sovmestnoi biologicheskoi i reagentnoi ochistki stochnykh vod [Composition of Activated Sludge Microbial

- Community Used in the Combined Biological and Chemical Wastewater Treatment]. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology]*, 9(2). 302–312. (In Russ., in Engl.) DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-2-302-3
2. Akimova, I.A., Tkach, P.D. & Sych, O.O. (2015). *Utilizatsiya biomassy aktivnogo ila*, (16). Moscow: Vysshaya shkola. (In Russ.)
  3. Ruchai, N.S. & Markevich, R.M. (2006). *Ekologicheskaya biotekhnologiya*. Minsk: BGTU. (In Russ.)
  4. Nevolina, I.V. & Bragin, V.A. (2023). Utilizatsiya osadkov stochnykh vod koksokhimicheskogo proizvodstva posle biologicheskoi ochistki. In *Sistema upravleniya ekologicheskoi bezopasnost'yu: sbornik trudov XVII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, 19–20 maya 2023 g. (255–260). Ekaterinburg: UrFU. (In Russ.)
  5. Putyrskaya, E.A. & Bel'skaya, G.V. (2016). Analiz metodov utilizatsii aktivnogo ila pri ochistke stochnykh vod. In *Sbornik materialov 72-i studencheskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*, 20–28 apr. 2016 g. (69–72). Minsk: BNTU. (In Russ.)
  6. Kalinina, E.V. & Dobrynina, O.M. (2012). Eksperimental'nye issledovaniya po polucheniyu biogaza iz izbytochnogo aktivnogo ila g. Permi. *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse*, (4), 323–329. (In Russ.)
  7. Gorelova, O.M. & Titova, K.Yu. (2015). Issledovaniya po utilizatsii izbytochnogo aktivnogo ila. *Polzunovskii vestnik*, 4(1), 114–116. (In Russ.)
  8. Bryazgina, E.U., Nasyrov, R.R., Latypova, Z.A. & Khazimova, L.R. (2014). Method of neutralization and utilization of spent activated sludge. *Oil and gas business*, (3), 124–132. (In Russ.)
  9. Vaisman, Ya.I., Glushankova, I.S., Dyakov, M.S. & Khodyashev, M.B. (2011). Ekologicheski bezopasnyi sposob utilizatsii osadkov stochnykh vod biokhimicheskikh ochistnykh sooruzhenii s polucheniem ugle-rodosoderzhashchikh sorbtsionnykh materialov. *Voda: khimiya i ekologiya*, (3), 14–24. (In Russ.)
  10. Ksenofontov, B.S., Goncharenko, E.E. & Borisov, Yu.A. (2019). The use of excess activated sludge as a bioflocculant for biochemical water purification. *Eurasian Union of Scientists. Industrial biotechnologies*, (10), 23–27. (In Russ.)
  11. Evilevich, A.Z. (1954). *Udalenie, obrabotka i ispol'zovanie osadkov stochnykh vod*. Leningrad; Moscow: Gosudarstvennoe Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu i arkhitekture. (In Russ.)
  12. Chernova, K.S., Baurina, M.M. & Gradova, N.B. (2019). Izuchenie vliyaniya avtolizatov aktivnogo ila metantenkov na prochnostnye kharakteristiki stroitel'nykh materialov [The Influence of Activated Sludge Autolizates on the Strength Characteristics of Construction Materials]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii. sb. nauch. tr. [Advances in Chemistry and Chemical Technology: A Collection of Scientific Papers]*, XXXIII(5), 47–48. (In Russ., abstr. in Engl.)
  13. Belik, E.S. (2017). Poluchenie neftyanogo biosorbenta na osnove karbonizata – otkhoda piroliza izbytochnogo aktivnogo ila. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, (14), 120–124. (In Russ.)
  14. Shurdova, A.E. (2023). Magnitnyi uglerodnyi sorbent dlya likvidatsii avariinykh razlivov nefiti i nefteproduktov na vodoteloakh [Magnetic Carbon Sorbent for Eliminating Emergency Spills of Oil and Oil Products on Water Bodies]. *Vremya nauki – The times of science*, (4), 31–36. (In Russ., abstr. in Engl.)
  15. Moskvicheva, E.V., Voityuk, A.A., Doskina, E.P., Ignatkina, D.O., Yur'ev, Yu.Yu. & Shchitov, D.V. (2015). Sovershenstvovanie tekhnologii ochistki gorodskikh stochnykh vod s ispol'zovaniem sorbenta na osnove izbytochnogo aktivnogo ila. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2(2), 1–14. (In Russ.)
  16. Ksenofontov, B.S., Kozodaev, A.S., Taranov, R.A., Vinogradov, M.S., Voropaeva, A.A. & Senik, E.V. (2016). Razrabotka kompleksnoi tekhnologii vishchelachivaniya redkozemel'nykh metallov iz zoloshlakov i problema kontsentrirovaniya rastvorov etikh metallov. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, (3), 44–49. (In Russ.)
  17. Ksenofontov, B.S., Kozodaev, A.S. & Taranov, R.A. (2016). Problemy vydeleniya redkozemel'nykh metallov iz ugol'noi zoly v vide rastvorov i ikh kontsentrirovaniye [The Problems of Rare Earth Metals Extraction from Coal Ash in the Form of Solvents and its Concentrating]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and Industry of Russia]*, 20(4), 12–15. (In Russ., in Engl.) DOI: 10.18412/1816-0395-2016-4-12-15

Поступила 05.07.2024

## THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE PROPERTIES OF EXCESS ACTIVATED SLUDGE

**V. YEMELYANOVA, A. YERMAK, A. KARNIAKOVA**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*A literary analysis of the ways of processing excess activated sludge from sewage treatment plants has been carried out, promising ways of its disposal have been identified. The composition of the research object was considered, as which the excess activated sludge of the treatment facilities of JSC Slonimsky Cardboard and Paper Plant “Alber-tin” was used. The effect of heat treatment of excess activated sludge at 105 °C, 250 °C and 350 °C on its properties has been studied. The curves of differential thermogravimetric analysis and differential scanning calorimetry of excess activated sludge are obtained. The dependence of the change in the mass loss of the activated sludge sample when heated to 900 °C in an air environment on the drying temperature is determined. IR spectra of activated sludge dried at 105 °C and 350 °C were also obtained. The influence of the drying temperature of activated sludge on the change in surface characteristics and pore distribution has been studied.*

**Keywords:** *activated sludge, disposal of activated sludge, thermogravimetric analysis, porometry.*

УДК 665.761.6; 544.723

DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-123-128

## КИНЕТИКА СТАДИИ ОКИСЛИТЕЛЬНО-АДСОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ДЕПАРАФИНИЗИРОВАННОГО ГИДРОКРЕКИНГОВОГО МАСЛА АКТИВНОЙ ГЛИНОЙ МЕТОДОМ ПЕРКОЛЯЦИИ

П.Ф. ГРИШИН

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0916-7507>

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

*Изучены кинетика адсорбции депарафинизированного гидрокрекингового масла по кривым изменения отношения значения оптической плотности депарафинизированного гидрокрекингового масла ко времени  $t$  ( $D_t$ ) и равновесного значения ( $D_e$ ), интенсивность потери сорбционной емкости активированной соляной кислотой гранулированной монтмориллонитовой глины или степень ее срабатывания во времени окислительно-адсорбционной очистки депарафинизированного гидрокрекингового масла. Процесс окислительно-адсорбционной очистки масла проводился методом перколяции в вертикальном цилиндрическом адсорбере при объемной скорости пропускания очищаемого масла через слой глины, равной  $0,5 \text{ ч}^{-1}$ . Глубина очистки масла определялась по изменению оптической плотности очищенного масла при постоянной длине волны  $400 \text{ нм}$ . Предпринята попытка исследования кинетики только стадии окислительно-адсорбционной очистки гидрокрекингового масла, используя кинетическую модель псевдопервого порядка, и оценки энергии активации данной стадии в исследуемом диапазоне температур. Установлено, что энергия активации окислительно-адсорбционной стадии очистки гидрокрекингового масла составляет  $9,15 \text{ кДж/моль}$ .*

**Ключевые слова:** адсорбционная очистка масла, активная глина, изменение свойств, кинетика адсорбции, энергия активации, перколяция, депарафинизированное гидрокрекинговое масло.

**Введение.** Адсорбция является важным явлением, лежащим в основе ряда процессов, имеющих большое экологическое и технологическое значение. Выявление закономерностей адсорбционного равновесия и кинетики процессов адсорбционной очистки – фундаментальный шаг к проектированию и эксплуатации адсорбционного оборудования [1].

Адсорбция может быть физической или химической (хемосорбция). Физическая адсорбция является результатом слабых электростатических сил притяжения малого радиуса действия, возникающих под действием сил Ван-дер-Ваальса, а хемосорбция включает образование химической связи между адсорбатом и адсорбентом.

Кинетика адсорбции дает представление о скорости реакции и механизме сорбции, включающем массоперенос, диффузию, а в случае протекания хемосорбции реакцию на поверхности адсорбента во время адсорбции. Процесс перехода адсорбатов из растворов в адсорбент состоит из нескольких фаз, таких как: внешний массоперенос через пограничный слой или диффузионную пленку между жидкой фазой и внешней поверхностью адсорбента; диффузия, происходящая в частицах адсорбента, при которой раствор адсорбата проникает в поры адсорбента; образование физических или химических связей адсорбата на активных центрах в порах адсорбента.

Кинетика адсорбции является существенным фактором, определяющим эффективность сорбции. Скорость, с которой молекулы адсорбата переносятся из раствора на поверхность адсорбента и накапливаются там, определяют кинетику адсорбции и, следовательно, эффективность процесса адсорбции.

Изучение кинетики адсорбции в чистом виде – крайне сложная задача, т.к. наблюдаемое поглощение вещества на межфазной границе протекает в два этапа: диффузия вещества к поверхности и собственно адсорбция. При использовании пористых адсорбентов кинетику процесса определяют преимущественно диффузионные явления. Кроме того, адсорбция может протекать как в статическом, так и в динамическом режимах. К настоящему времени разработано более десятка кинетических моделей адсорбции [2; 3], например, модель псевдопервого порядка Лагергрена (1898), широко используемая для описания скорости адсорбции веществ из водных растворов [4], экспоненциальная модель Еловича (1962), которая описывает случаи гетерогенной хемосорбции на твердых поверхностях [5]. К современным моделям относятся фрактальная кинетическая модель Брауэрса–Сотолонго (2018) [6] и фрактально-подобная модель кинетической адсорбции Баундати (2019) [7].

Использование кинетических моделей при описании сорбционных процессов позволяет охарактеризовать механизм сорбции вещества поверхностью адсорбента и установить лимитирующую стадию адсорбции для последующего определения рациональных условий осуществления технологического процесса.

Однако депарафинизированное гидрокрекинговое масло является достаточно сложным объектом исследования в связи с особенностями его химического состава и склонностью к окислению [8; 9].

Одним из способов улучшения цвета депарафинизированного селективными растворителями гидрокрекингового масла и повышения его устойчивости к ультрафиолетовому излучению является адсорбционная очистка методом перколяции с использованием глины<sup>1</sup>.

Недостаток данного способа очистки гидрокрекингового масла – относительно низкая степень повышения устойчивости продукта к окислению. Это связано с наличием в составе очищаемого масла компонентов с низкой поляризуемостью, т.е. слабо или вообще не взаимодействующих с активными центрами адсорбента, но обладающих высокой склонностью к окислению. При контакте с кислородом воздуха эти компоненты окисляются, что приводит к ухудшению цвета масла, увеличению его кислотного числа и образованию осадка.

В связи с этим был предложен и запатентован способ очистки гидрокрекингового масла, включающий в себя две стадии. На первой стадии проводится окислительно-адсорбционная очистка масла с применением активной глины, насыщенной кислородом путем продувки воздухом. На второй – продукт, полученный после первой стадии очистки, доочищают активной глиной, продутой инертным газом – азотом. В результате предлагаемой двухстадийной очистки гидрокрекингового масла удастся получить бесцветное базовое масло, отвечающее требованиям, предъявляемым к базовым маслам III группы по классификации Американского института нефти (API), с высокой устойчивостью к окислению – в 4,5 раза меньшей склонностью к образованию осадка в условиях ГОСТ 981-75<sup>2</sup>, и низким кислотным числом (менее 0,1 мг КОН/г).

В ходе стадии окислительно-адсорбционной очистки гидрокрекингового масла на поверхности отработанной активной монтмориллонитовой глины наблюдается образование адсорбата угольно-черного цвета (рисунок 1, б), представляющего собой продукт окислительной конденсации наиболее неустойчивых к окислению компонентов масла, в частности, нафтено-ароматических соединений, полинафтенных и их алкилпроизводных [9].

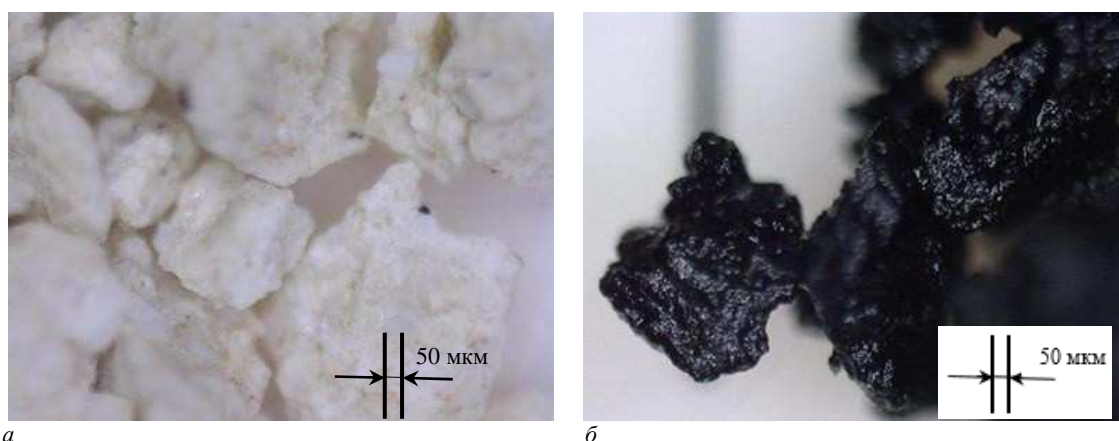


Рисунок 1. – Исходная активная глина (а) и отработанная глина после стадии окислительно-адсорбционной очистки (б)

В результате глина достаточно быстро теряет осветляющую способность по отношению к очищаемому маслу и требуется ее регенерация. При этом полностью регенерировать сольвентным способом отработанную глину даже с использованием бинарных растворителей невозможно. Эффективным является только окислительная регенерация отработанной глины путем выжигания адсорбата. В связи с этим стадию окислительно-адсорбционной очистки можно рассматривать одновременно как химический, так и адсорбционный процесс очистки гидрокрекингового базового масла. Следовательно, к основным факторам, влияющим на эффективность стадии окислительно-адсорбционной очистки гидрокрекингового масла, можно отнести температуру и энергию активации процесса.

**Исследовательская часть.** В качестве объектов исследования использованы:

- активированная соляной кислотой гранулированная монтмориллонитовая глина, прокаленная в муфельной печи при температуре  $(550 \pm 10)$  °С в течение 2 ч. Гранулометрический состав глины (в % масс.): размер частиц менее 0,25 мм – 1,86; от 0,25 до 0,5 мм – 35,81; от 0,5 до 1,0 мм – 27,18; от 1,0 до 1,25 мм – 35,15;
- гидрокрекинговое депарафинизированное масло, полученное из остаточного продукта процесса гидрокрекинга вакуумных газойлей по технологии «Юнигрекинг», со следующими свойствами: индекс вязкости – 121 п.; кинематическая вязкость при 100 °С – 4,922 мм<sup>2</sup>/с; плотность при 20 °С – 840,0 кг/м<sup>3</sup>; температура застыва-

<sup>1</sup> Pat. US 3684684. United States of America. Production of oils stable to ultra-violet light. – 15.08.1972.

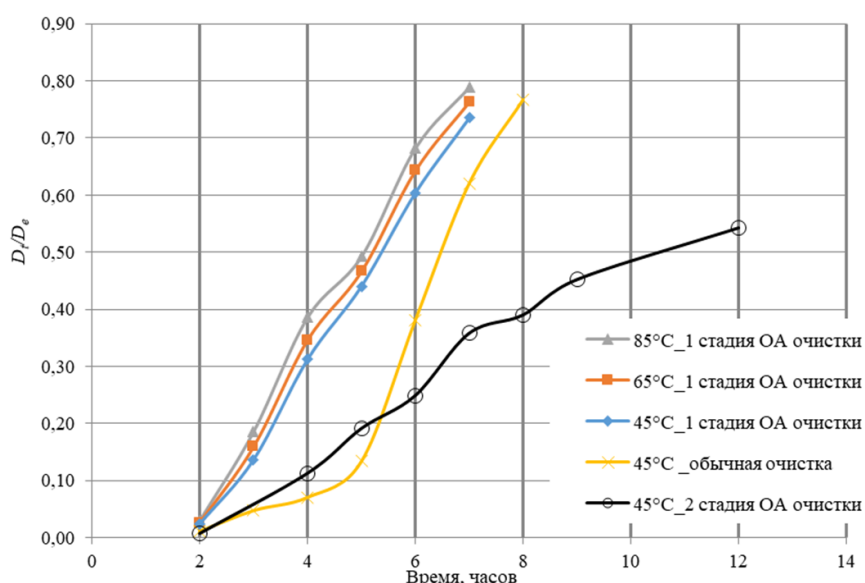
<sup>2</sup> ГОСТ 981-75 Масла нефтяные. Метод определения стабильности против окисления (с Изменениями № 1, 2, 3, 4). – URL: [https://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id\\_doc=97236](https://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=97236)

ния – минус 16 °С; кислотное число – 0,89 мг КОН/г; цвет по шкале ASTM D 1500 – 1,5. Групповой состав: содержание парафино-нафтеновых углеводородов – 98,04% масс.; ароматических углеводородов – 1,05% масс.; смол – 0,91% масс.

Процесс окислительно-адсорбционной очистки масла проводился методом перколяции в вертикальном цилиндрическом адсорбере при объемной скорости пропускания очищаемого масла через слой глины, равной 0,5 ч<sup>-1</sup>. Высота слоя глины 20 см. Испытания проводились при температурах (45±0,1) °С, (65±0,1) °С и (85±0,1) °С. Нижний предел температуры связан с вязкостью очищаемого масла, верхний – с рекомендуемой температурой проведения процесса перколяционной очистки масла не выше 160 F (71,1 °С)<sup>3</sup> и 100 °С [10].

Перед подачей масла при проведении первой стадии окислительно-адсорбционной очистки слой адсорбента продувался сухим воздухом в течение 10 мин. Перед проведением обычной перколяционной очистки и второй стадии окислительно-адсорбционной очистки адсорбент продувался азотом.

Затем через слой адсорбента пропускали масло и определяли глубину его очистки по изменению оптической плотности очищенного масла при постоянной длине волны 400 нм. При этом кинетика адсорбции оценивалась по кривым изменения отношения значения оптической плотности ко времени  $t(D_e)$  масла и равновесного значения ( $D_e$ ). Данное отношение также характеризует интенсивность потери сорбционной емкости глины или степень ее срабатывания во времени<sup>4</sup>.



**Рисунок 2. – Интенсивность потери сорбционных свойств глины в процессе обычной перколяционной очистки и на стадиях окислительно-адсорбционной (ОА) очистки гидрокрекингового масла**

Из рисунка 2 видно, что при проведении обычной очистки масла первые 4 ч наблюдается эффективная очистка масла от компонентов, увеличивающих его оптическую плотность и ухудшающих цвет. Однако затем сорбционные свойства глины резко снижаются, ее осветляющая способность падает. При этом, хотя кислотное число масла снижается до 0,38 мг КОН/г и цвет масла по шкале ASTM D 1500 улучшается с 1,5 до 0,5 п., массовая доля осадка при окислении увеличивается на 0,007% масс.

При проведении первой стадии окислительно-адсорбционной очистки гидрокрекингового масла сорбционные свойства глины снижаются практически линейно. При повышении температуры интенсивность снижения осветляющей способности снижается. Это говорит о протекании реакций окисления наименее устойчивых компонентов масла кислородом воздуха и сорбции их на глине. В результате цвет масла по шкале ASTM D 1500 улучшается с 1,5 до 0,5 п., при этом увеличивается кислотное число масла до 1,55 мг КОН/г.

С целью улучшения цвета и снижения кислотного числа масла, полученного после первой стадии окислительно-адсорбционной очистки, проводится вторая стадия доочистки глиной, продутой азотом. При этом очищаемое масло становится бесцветным, кислотное число снижается до 0,1 мг КОН/г, а массовая доля осадка при окислении снижается по сравнению с маслом, очищенным по обычной технологии, в 7,5 раз и составляет 0,002% масс.

<sup>3</sup> Pat. US 3684684. United States of America. Production of oils stable to ultra-violet light. – 15.08.1972.

<sup>4</sup> Сахибов Н.Б. Физико-химические основы регенерации отработанных промышленных масел природными сорбентами: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04. – Душанбе, 2012. – 111 л.

Таким образом, процесс окислительно-адсорбционной очистки гидрокрекингвого масла можно рассматривать как физико-химический процесс, сопровождающийся протеканием реакций окисления наименее химически стабильных компонентов очищаемого масла, адсорбции и, вероятно, хемосорбции продуктов окисления и смол, содержащихся в масле на поверхности глины. Существующие теории кинетики адсорбции не позволяют описать данный процесс. Не дает полного представления о характере адсорбции и энергия активации, хотя в большинстве случаев процесс хемосорбции активирован, т.е. имеет место преодоление некоторого энергетического барьера, а физическая адсорбция протекает практически без активации [11].

В связи с вышесказанным в настоящей работе предпринята попытка исследовать кинетику только стадии окислительно-адсорбционной очистки гидрокрекингвого масла, используя кинетическую модель псевдопервого порядка, и оценить энергию активации данной стадии в исследуемом диапазоне температур.

Предложенное Лагерреном уравнение может быть представлено в виде

$$\frac{dQ_t}{dt} = k_1(Q_e - Q_t), \quad (1)$$

где  $k_1$  – константа скорости псевдопервого порядка, мин<sup>-1</sup>;

$t$  – время, мин;

$Q_e, Q_t$  – равновесная сорбционная емкость и сорбционная емкость ко времени  $t$ .

При интегрировании с граничными условиями от  $t = 0$  до  $t = t$  и  $Q_t = 0$  до  $Q_t = Q_e$

$$\log(Q_e - Q_t) = \log(Q_e) - \frac{k_1 t}{2.303}. \quad (2)$$

Используя вместо равновесной сорбционной емкости оптическую плотность исходного неочищенного масла  $Q_e = D_0$ , т.е. когда глина полностью теряет сорбционные свойства, а вместо сорбционной емкости  $Q_t$  оптическую плотность масла ко времени  $t$ , т.е.  $Q_t = D_t$ , получим уравнение

$$\log(D_0 - D_t) = \log(D_0) - \frac{k_1 t}{2.303}. \quad (3)$$

Зависимость константы скорости  $k_1$  от температуры в координатах  $\ln k_1 = f(1/T)$ , где  $T$  – температура, К, имеет выраженный линейный характер (рисунок 3).

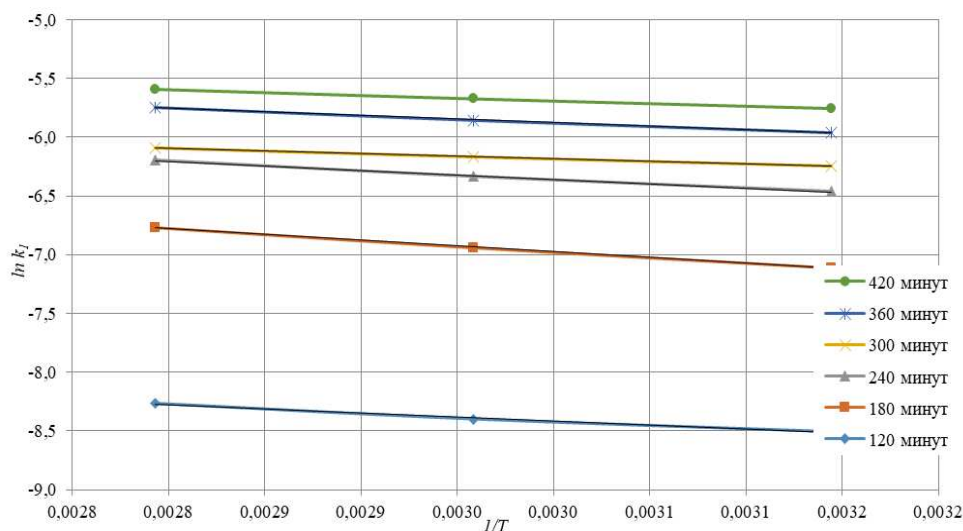


Рисунок 3. – График зависимости  $\ln k_1 = f(1/T)$

Следовательно, применимо уравнение Аррениуса и может быть определена энергия активации окислительно-адсорбционной стадии очистки масла по уравнению [12]

$$E_a = \frac{RT_1 T_2}{T_1 - T_2} \cdot \ln \left( \frac{k_{1(T_1)}}{k_{1(T_2)}} \right), \quad (4)$$

где  $E_a$  – энергия активации, кДж/моль;

$R$  – газовая постоянная, кДж/(моль·К);

$T_1, T_2$  – температура двух экспериментов, К;

$k_{1(T_1)}, k_{1(T_2)}$  – константы скорости реакций, определенные по уравнению (3) при температурах  $T_1$  и  $T_2$ ,

соответственно.

Энергия активации окислительно-адсорбционной стадии очистки гидрокрекингового масла составляет 9,15 кДж/моль. Согласно [13] энергия активации химической адсорбции составляет от 40 до 400 кДж/моль. Значит, в ходе исследуемой стадии преобладает физическая адсорбция смол и продуктов окисления компонентов масла.

**Заключение.** Полученные результаты свидетельствуют о том, что в результате окислительно-адсорбционной очистки гидрокрекингового масла происходит физико-химический процесс, сопровождающийся протеканием реакций окисления наименее химически стабильных компонентов очищаемого масла, адсорбции и, вероятно, хемосорбции продуктов окисления и смол, содержащихся в масле на поверхности глины. Существующие теории кинетики адсорбции не позволяют описать данный процесс. Не дает полного представления о характере адсорбции и энергия активации, хотя в большинстве случаев процесс хемосорбции активирован, т.е. имеет место преодоление некоторого энергетического барьера, а физическая адсорбция протекает практически без активации. Энергия активации окислительно-адсорбционной стадии очистки 9,15 кДж/моль, следовательно, в ходе исследуемой стадии преобладает физическая адсорбция смол и продуктов окисления компонентов масла.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Azizian S., Eris S. Adsorption isotherms and kinetics // *Interface Science and Technology. Adsorption: Fundamental Processes and Applications* / Mehrorang Ghaedi (Ed.). – UK, 2021. – Vol. 33, Ch. 6. – P. 445–509. DOI: 10.1016/B978-0-12-818805-7.00011-4
2. Adsorption Kinetics and Isotherm Models: A Review / M. Monday, Y. Azeh, John T. Mathew et al. // *Caliphate Journal of Science & Technology (CaJoST)*. – 2022. – № 1. – P. 20–26. DOI: <https://dx.doi.org/>
3. Tawfik A. Saleh. Kinetic models and thermodynamics of adsorption processes: classification // *Interface Science and Technology. Surface Science of Adsorbents and Nanoadsorbents*. UK, 2022. – Vol. 34, Ch. 3. – P. 65–97. DOI: 10.1016/B978-0-12-849876-7.00003-8
4. Ho Y.-S. Citation review of Lagergren kinetic rate equation on adsorption reactions // *Scientometrics*. – 2004. – № 1(59). – P. 171–177. DOI: 10.1023/B:SCIE.0000013305.99473.cf
5. Javadian H. Application of kinetic, isotherm and thermodynamic models for the adsorption of Co(II) ions on polyamide/polypyrrole copolymer nanofibers from aqueous solution // *Journal of industrial and engineering chemistry*. – 2014. – № 6(20). – P. 4233–4241. DOI: 10.1016/j.jiec.2014.01.026
6. Brouers F., Al-Musawi T.J. Brouers-Sotolongo fractal kinetics versus fractional derivative kinetics: A new strategy to analyze the pollutants sorption kinetics in porous materials // *Journal of Hazardous Materials*. – 2018. – Vol. 350. – P. 162–168. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.02.015
7. Generalized fractal-like adsorption kinetic models: Application to adsorption of copper on Argan nut shell / Y. El Boundati, K. Ziat, A. Naji et al. // *Journal of Molecular Liquids*. – 2019. – Vol. 276. – P. 15–26. DOI: 10.1016/j.molliq.2018.11.121
8. Свойства и перспективные направления переработки остаточного продукта процесса «Юникрекинг» / А.А. Ермак, С.В. Покровская, И.В. Бурая и др. // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки*. – 2015. – № 11. – С. 115–120.
9. Гришин П.Ф., Ермак А.А. Окислительная стабильность гидрокрекинговых базовых масел и способы ее повышения // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки*. – 2021. – № 3. – С. 80–85.
10. Капустин В.М., Тонконогов Б.П., Фукс И.Г. Технология переработки нефти. В 4 ч. – М.: Химия, 2014. – Ч. 3. Производство нефтяных смазочных материалов. – 328 с.
11. Иоффе И.И., Письмен Л.М. Инженерная химия гетерогенного катализа. – Л.: Химия, 1972. – 464 с.
12. Хмельницкий Р.А. Физическая и коллоидная химия. – М.: Высш. шк., 1988. – 400 с.
13. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. – М.: Химия, 1988. – 464 с.

#### REFERENCES

1. Azizian, S. & Eris, S. (2021). Ch. 6. Adsorption isotherms and kinetics. In M. Ghaedi (Ed.). *Interface Science and Technology. Adsorption: Fundamental Processes and Applications*, (33), 445–509. DOI: 10.1016/B978-0-12-818805-7.00011-4
2. Musah, M., Azeh, Y., Mathew, John T., Umar, Musa T., Abdulhamid, Z. & Muhammad, Aishetu I. (2022). Adsorption Kinetics and Isotherm Models: A Review. *Caliphate Journal of Science & Technology (CaJoST)*, (1), 20–26. DOI: 10.4314/cajost.v4i1.3
3. Tawfik, A. Saleh. (2022). Ch. 3. Kinetic models and thermodynamics of adsorption processes: classification. In *Interface Science and Technology. Surface Science of Adsorbents and Nanoadsorbents*, (34). 65–97. DOI: 10.1016/B978-0-12-849876-7.00003-8

4. Ho, Y.-S. (2004). Citation review of Lagergren kinetic rate equation on adsorption reactions. *Scientometrics*, 1(59), 171–177. DOI: 10.1023/B:SCIE.0000013305.99473.cf
5. Javadian, H. (2014). Application of kinetic, isotherm and thermodynamic models for the adsorption of Co(II) ions on poly-amidine/polypyrrole copolymer nanofibers from aqueous solution. *Journal of industrial and engineering chemistry*, 6(20), 4233–4241. DOI: 10.1016/j.jiec.2014.01.026
6. Brouers, F. & Al-Musawi-Tariq J. (2018). Brouers-Sotolongo fractal kinetics versus fractional derivative kinetics: A new strategy to analyze the pollutants sorption kinetics in porous materials. *Journal of Hazardous Materials*, (350), 162–168. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.02.015
7. Boundati, Y. El, Ziat, K., Naji, A. & Saidi, M. (2019). Generalized fractal-like adsorption kinetic models: Application to adsorption of copper on Argan nut shell. *Journal of Molecular Liquids*, (276), P. 15–26. DOI: 10.1016/j.molliq.2018.11.121
8. Ermak, A.A., Pokrovskaya, S.V., Buraya, I.V., Syubareva, E.V. & Zavadskii, A.V. (2015). Svoistva i perspektivnye napravleniya pererabotki ostatochnogo produkta protsessa «Unicracking» [The Properties and Promising Areas of Processing Residual Product of the Process “Unicracking”]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, (11), 115–120. (In Russ., abstr. in Engl.)
9. Grishin, P.F. & Ermak, A.A. (2021). Okislitel'naya stabil'nost' gidrokrekingovykh bazovykh masel i sposoby ee povysheniya [Oxidative Stability of Hydrocracking Base Oils and Ways to Improve it]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, (3), 80–85. (In Russ., abstr. in Engl.)
10. Kapustin, V.M., Tonkonogov, B.P. & Fuks, I.G. (2014). Ch. 3. Pro-izvodstvo neftyanykh smazochnykh materialov. In *Tekhnologiya pererabotki nefii*. V 4 ch. Moscow: Khimiya. (In Russ.)
11. Ioffe, I.I. & Pis'men, L.M. (1972). *Inzhenernaya khimiya geterogennogo kataliza*. Leningrad: Khimiya. (In Russ.)
12. Khmel'nitskii, R.A. (1988). *Fizicheskaya i kolloidnaya khimiya*. Moscow: Vysshaya Shkola. (In Russ.)
13. Frolov, Yu.G. (1988). *Kurs kolloidnoi khimii. Poverkhnostnye yavleniya i dispersnye sistemy*. Moscow: Khimiya. (In Russ.)

Поступила 01.07.2024

## KINETICS OF THE STAGE OF OXIDATION-ADSORPTION PURIFICATION OF DEWAXED HYDROCRACKING OIL WITH ACTIVE CLAY BY PERCOLATION

P. HRYSHYN

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

*The kinetics of adsorption of dewaxed hydrocreating oil was studied using curves of change in the ratio of the optical density of dewaxed hydrocreating oil to the time  $t$  ( $Dt$ ) and the equilibrium value ( $De$ ), the intensity of loss of sorption capacity of granular montmorillonite clay activated by hydrochloric acid or the degree of its activation during oxidative adsorption purification of dewaxed hydrocreating oil. The process of oxidative-adsorption oil purification was carried out by percolation in a vertical cylindrical adsorber at a volumetric flow rate of the purified oil through a clay layer equal to 0.5 h<sup>-1</sup>. The depth of oil purification was determined by a change in the optical density of the purified oil at a constant wavelength of 400 nm. An attempt has been made to study the kinetics of only the stage of oxidation-adsorption purification of hydrocracking oil using a kinetic model of the pseudo-first order and to estimate the activation energy of this stage in the studied temperature range. It was found that the activation energy of the oxidation-adsorption stage of hydrocracking oil purification is 9.15 kJ/mol.*

**Keywords:** adsorption purification of oil, active clay, change of properties, kinetics of adsorption, activation energy, percolation, dewaxed hydrocracking oil.



УДК 628.15.075

DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-129-134

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ МАГИСТРАЛЬНОГО НАСОСНОГО АГРЕГАТА  
ОТ ОБЪЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СМЕСИ НЕФТЕПРОДУКТОВ  
ПРИ ИХ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ  
МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ПЕРЕКАЧКИ ПРЯМЫМ КОНТАКТИРОВАНИЕМ**

**А.Н. ВОРОНИН, А.Д. КОНДРАТЮК, канд. экон. наук, доц. С.В. БОСЛОВЯК  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)**

*Проанализировано отношение потребляемой мощности к количеству технологической смеси, образующейся в местах контакта разноименных или разносортных нефтепродуктов при транспортировании по магистральному нефтепродуктопроводу методом последовательной перекачки с использованием скорости перекачки в качестве промежуточного параметра. Расчет предлагается выполнить последовательно в три этапа: 1) определить зависимость объема технологической смеси от скорости движения нефтепродукта, что позволяет оценить возможность раскладки технологической смеси по резервуарам на конечном пункте в соответствии с объемом резервуарного парка; 2) определить зависимость потребляемой мощности от скорости движения нефтепродукта, что создает условия для оценивания энергетических затрат транспортирования нефтепродуктов; 3) определить зависимость потребляемой мощности от объема технологической смеси, что информативно помогает в выборе оптимального баланса между объемом смеси и потребляемой мощностью с возможностью снижения скорости перекачки ниже нормативно рекомендуемых значений. Предложенный подход по определению зависимости потребляемой мощности от количества технологической смеси представляет собой удобный инструмент для одновременного оценивания двух параметров и нахождения оптимального режима перекачки.*

**Ключевые слова:** последовательная перекачка, нефтепродуктопровод, нефтепродукты, смесеобразование, энергопотребление.

**Введение.** В результате переработки нефти с установок нефтеперерабатывающих заводов одновременно выходит множество видов нефтепродуктов, из которых значительную часть составляют светлые. В настоящее время и в нашей стране, и за рубежом светлые нефтепродукты транспортируют методом последовательной перекачки прямым контактированием. Сооружение отдельного трубопровода для каждого из выпускаемых светлых нефтепродуктов было бы нерентабельно, поэтому большинство из них перегоняют по одному и тому же трубопроводу один за другим.

На головной станции трубопровода нефтепродукты закачивают из отдельных резервуаров, транспортируют партиями по трубопроводу, раздают по пути промежуточным потребителям, подключенным к магистральному трубопроводу через отводы, а в пунктах приема-сдачи принимают из трубопровода в отдельные резервуары [2]. При этом каждая партия вытесняет предыдущую и в свою очередь вытесняется последующей. Получается так, что нефтепродуктопровод по всей своей протяженности заполнен партиями различных нефтепродуктов, вытянутых в цепочку и контактирующих друг с другом в местах, где заканчивается одна партия и начинается другая [1].

Последовательная перекачка разносортных нефтепродуктов по трубопроводам осуществляется циклами. Каждый цикл состоит из нескольких партий нефтепродуктов, располагающихся в определенной последовательности. Порядок следования партий нефтепродуктов в цикле определяется таким образом, чтобы каждый нефтепродукт контактировал с двумя другими, наиболее близкими к нему по своим свойствам.

При последовательной перекачке нефтепродуктов прямым контактированием в местах контакта партий различных марок образуется смесь исходных нефтепродуктов. Причиной смесеобразования является неравномерное вытеснение одной жидкости другой. Скорость частиц жидкости на оси трубопровода больше, чем у его стенок, поэтому клин позади идущей жидкости внедряется в жидкость, идущую впереди, а процессы турбулентного перемешивания размешивают вытесняющий нефтепродукт по сечению трубопровода. Образование смеси в местах контакта соседних партий органически присуще данному методу транспортировки нефтепродуктов и является основной особенностью последовательной перекачки прямым контактированием. Такая особенность объясняется физическими процессами, сопровождающими вытеснение одной жидкости другой, и не может быть полностью устранена.

В течение всего времени перекачки смесь нефтепродуктов в зоне контакта последовательно движущихся партий постоянно возрастает, образуя плавный переход от одного нефтепродукта к другому. Темпы этого возрастания не одинаковы. Сначала, когда протяженность зоны смеси мала и переход от одного нефтепродукта к другому происходит на небольшом расстоянии, смесь нарастает быстро, но по мере увеличения протяженности смеси, последняя играет роль буфера между нефтепродуктами, и темпы роста смеси замедляются<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> СО-06-16-АКТНП-003-2004 Стандарт организации. Инструкция по транспортированию нефтепродуктов по магистральным нефтепродуктопроводам системы ОАО «АК «Транснефтепродукт»» методом последовательной перекачки. – М., 2005. – 23 с.

При последовательной перекачке бензинов разных сортов (марок) контактирующие пары подбираются с наименьшей разницей октановых чисел, а также из условия минимальной разности температур вспышки, а при одинаковой разности температур вспышек – из условия минимальной разности содержания серы.

В пунктах приема-сдачи магистрального нефтепродуктопровода с целью восстановления качества перекачиваемых последовательно нефтепродуктов осуществляется равномерное распределение (раскладка) смеси, образовавшейся при транспортировке нефтепродуктов, по партиям этих нефтепродуктов. Сущность раскладки состоит в добавлении некоторого количества смеси к нефтепродуктам, из которых она образовалась, осуществляемой за счет имеющегося у нефтепродуктов запаса качества с обеспечением сохранности в допустимых стандартами пределах показателей качества нефтепродуктов, к которым добавляется смесь.

Для уменьшения смесеобразования при транспортировке нефтепродуктов методом последовательной перекачки прямым контактированием необходимо вести ее с максимально высокими скоростями в условиях развитого турбулентного режима при числе Рейнольдса, равным значению 25 000 и выше. В таких режимах распределение скоростей жидкости в сечении трубопровода происходит более равномерно, полнота вытеснения одним нефтепродуктом другого увеличивается, а количество образующейся смеси уменьшается. С целью уменьшения смесеобразования рекомендуется устанавливать режим перекачки нефтепродуктов со скоростью потока не менее  $0,75 \text{ м/с}^2$ .

**Основная часть.** При эксплуатации нефтепродуктопровода может возникать необходимость снижения маршрутных объемов партий, транспортируемых по одному трубопроводу методом последовательной перекачки, в связи с изменением спроса на поставку нефтепродуктов на конечном пункте. В таком случае режим транспортирования претерпит изменение, при котором скорость движения партий нефтепродуктов будет находиться ниже значения, рекомендованного техническими нормативными правовыми актами для минимизации объема технологической смеси. Это изменение вызовет увеличение объема технологической смеси в зоне контакта партий нефтепродуктов, что может создать условия для невозможности раскладки всего объема технологической смеси по резервуарам на конечном пункте. В то же время уменьшение производительности нефтепродуктопровода приведет к снижению мощности, потребляемой магистральным насосным агрегатом, и, соответственно, снижению финансовых затрат за электроэнергию.

Оператор магистрального нефтепродуктопровода в условиях необходимости транспортирования партий нефтепродуктов ниже рекомендуемых скоростей перекачки может быть заинтересован в нахождении оптимального экономического баланса между объемом технологической смеси и мощностью, потребляемой магистральным насосом. Для нахождения такого баланса необходимо построить графическую зависимость мощности, потребляемой магистральным насосом, от объема технологической смеси. Поскольку не существует готового математического выражения, обобщающего зависимость потребляемой мощности от количества технологической смеси, то с целью удобства реализации получение такой графической зависимости предлагается выполнить последовательно в три этапа, используя скорость транспортирования партий нефтепродуктов в качестве промежуточного параметра.

На первом этапе следует произвести расчет с определением зависимости объема технологической смеси от скорости движения нефтепродукта, что позволит оператору магистрального нефтепродуктопровода оценить возможность раскладки технологической смеси по резервуарам на конечном пункте в соответствии с существующим объемом резервуарного парка.

В рамках первого этапа вначале необходимо пересчитать плотность нефтепродуктов на расчетную температуру  $t$  по формуле [3]

$$\rho_t = \rho_{15} - \xi(t - 20), \quad (1)$$

где  $\rho_t$  – плотность при температуре  $t$ ,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $\rho_{15}$  – плотность при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 $\xi$  – температурная поправка,  $\text{кг/м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ ;  
 $t$  – расчетная температура,  $^\circ\text{C}$ .

При последовательной перекачке скорость движения нефтепродуктов по трубопроводу будет задаваться самым вязким нефтепродуктом, в случае перекачки по трубопроводу с несколькими перекачивающими станциями. При условии осуществления транспортирования дизельных топлив с бензинами наиболее вязким нефтепродуктом является дизельное топливо.

Расчет секундной пропускной способности нефтепродуктопровода для заданных режимов перекачки выполняется как

$$Q_c = \frac{G}{24 \cdot 3600 \cdot \rho}, \quad (2)$$

где  $G$  – массовый годовой расход, млн т/год.

<sup>2</sup> СО-06-16-АКТНП-003-2004 Стандарт организации. Инструкция по транспортированию нефтепродуктов по магистральным нефтепродуктопроводам системы ОАО «АК «Транснефтепродукт»» методом последовательной перекачки. – М., 2005. – 23 с.

Скорость движения нефтепродуктов в трубопроводе определяется по формуле

$$v = \frac{4 \cdot Q_c}{\pi \cdot d^2}, \quad (3)$$

где  $d$  – внутренний диаметр, м.

Для определения объема смеси при последовательной перекачке методом прямого контактирования продуктов без учета первичной смеси воспользуемся формулой Сьенитцера–Марона [2]

$$V_c = 1000 \cdot (\lambda_1^{1,8} + \lambda_2^{1,8}) \cdot \left(\frac{d}{L}\right)^{0,43} \cdot V_{тр}, \quad (4)$$

где  $L$  – протяженность МНПП, м;

$\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – коэффициенты гидравлического сопротивления, вычисленные по параметрам контактирующих нефтепродуктов для данной скорости транспортировки  $v$ ;

$V_{тр}$  – объем внутренней полости трубопровода, м<sup>3</sup>, от начального сечения до сечения  $x = L$ , которое достигла середина зоны смеси.

Для расчета коэффициентов гидравлического сопротивления необходимо определить режим движения жидкости, для чего следует рассчитать число Рейнольдса режима движения нефтепродуктов по формуле [3]

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (5)$$

где  $v$  – скорость перекачки, м/с;

$\nu$  – кинематическая вязкость рассчитываемого нефтепродукта, м<sup>2</sup>/с.

Движение нефтепродуктов в магистральном трубопроводе обычно происходит в турбулентном режиме в зоне смешанного трения.

Коэффициент гидравлического сопротивления для зоны смешанного трения определяется [3] как

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \frac{d}{d}\right)^{0,25}. \quad (6)$$

Суммарный объем смеси нефтепродуктов состоит из объема первичной смеси и объема смеси, образующейся при движении в трубе. Образование первичной смеси происходит при смене партий перекачиваемых продуктов, во время которой начинает закрываться задвижка резервуара партии первого нефтепродукта и открываться задвижка резервуара партии второго нефтепродукта, в результате чего некоторое время в трубопровод поступают одновременно оба нефтепродукта. Объем первичной смеси можно рассчитать:

$$V_{пс} = v \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot t, \quad (7)$$

где  $t$  – время открытия/закрытия задвижки, с.

Суммарный объем смеси рассчитывается как [1]

$$V_{сс} = \left(V_c^{1,75} + V_{пс}^{1,75}\right)^{0,57}, \quad (8)$$

где  $V_c$  – объем смеси образующийся при движении в трубе;

$V_{пс}$  – объем первичной смеси.

На втором этапе необходимо выполнить расчет с определением зависимости мощности, потребляемой насосным агрегатом, от скорости движения нефтепродукта, что для оператора магистрального нефтепродуктопровода создаст условия для оценки финансовых затрат в связи с изменениями производительности трубопровода.

Мощность, потребляемая насосным агрегатом [3]:

$$N = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{\eta_n \cdot \eta_{мех} \cdot \eta_{эл}}, \quad (9)$$

где  $Q$  – секундный расход, м<sup>3</sup>/с;

$H$  – напор, развиваемый насосом, м;

$\eta_n$  – коэффициент полезного действия насоса;

$\eta_{мех}$  – коэффициент полезного действия механической передачи, принимается равным 0,99 [3];

$\eta_{эл}$  – коэффициент полезного действия электродвигателя.

Гидравлическую характеристика насоса можно определить как

$$H = a \cdot \left(\frac{n}{n_n}\right)^2 - b \cdot Q^2, \quad (10)$$

где  $H$  – напор, создаваемый насосом;  
 $Q$  – производительность насоса;  
 $a, b$  – коэффициенты аппроксимации;  
 $n$  – частота оборотов ротора насоса;  
 $n_n$  – номинальная частота оборотов ротора насоса.  
 Коэффициент полезного действия электродвигателя [3]

$$\eta_{эл} = \left(1 + \frac{(1-\eta_{ном})}{2 \cdot \eta_{ном} \cdot k_3} \cdot (1 + k_3^2)\right)^{-1}, \quad (11)$$

где  $\eta_{ном}$  – коэффициент полезного действия электродвигателя при номинальной нагрузке, принимается равным 0,96 [4];  
 $k_3$  – коэффициент загрузки электродвигателя [3]

$$k_3 = \frac{N_n}{N_{ном}}, \quad (12)$$

где  $N_n$  – мощность на валу электродвигателя.

При уменьшении объемов перекачки ниже проектных номинальных значений коэффициент полезного действия магистральных насосов снижается. В настоящее время в практике эксплуатации магистральных нефтепродуктопроводов для предотвращения снижения коэффициента полезного действия насосов при изменении режима перекачки нашло применение использование частотно-регулируемого привода. Применение частотного преобразователя для регулирования частоты вращения роторов магистральных насосов имеет ряд существенных преимуществ [5]:

- коэффициент полезного действия частотного преобразователя имеет высокие значения в рабочем диапазоне и составляет 96%;
- его использование не приводит к увеличению пусковых токов электродвигателя;
- частотный преобразователь уменьшает нагревание электродвигателя, а также увеличивает срок его службы;
- частотный преобразователь имеет встроенную систему защиты от перегрузок;
- его можно использовать при управлении группой насосов, что снижает затраты на оборудование и его установку.

Обычно коэффициент полезного действия насоса зависит от его подачи, однако, при использовании частотного преобразователя коэффициент полезного действия также зависит от частоты вращения ротора насоса. Зависимость коэффициента полезного действия насоса от этих двух параметров можно уравнением [4]

$$\eta = \eta_n - \left(\frac{Q}{Q_n} - \frac{n}{n_n}\right)^2 \cdot \eta_n \cdot \left(\frac{n}{n_n}\right)^2, \quad (13)$$

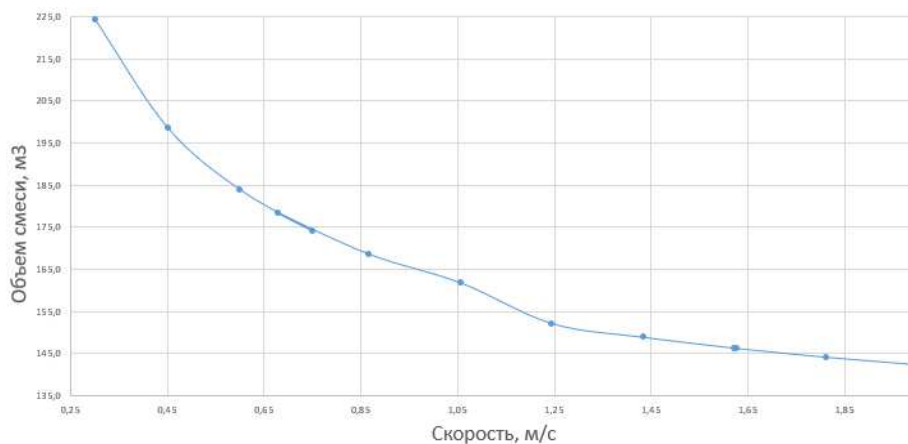
где  $\eta_n$  – максимальное значение коэффициента полезного действия;  
 $Q$  – подача насоса;  
 $Q_n$  – подача насоса, соответствующая максимальному коэффициенту полезного действия (при  $n_{ном} = 3000$  об/мин).

Использование частотного преобразователя позволяет сохранить коэффициент полезного действия на высоком уровне в широком диапазоне перекачки из-за смещения максимального показателя коэффициента полезного действия при изменении частоты вращения ротора насоса. Это позволяет повысить энергоэффективность перекачки и дает ряд преимуществ по сравнению с другими способами регулирования работы магистральных насосов [5].

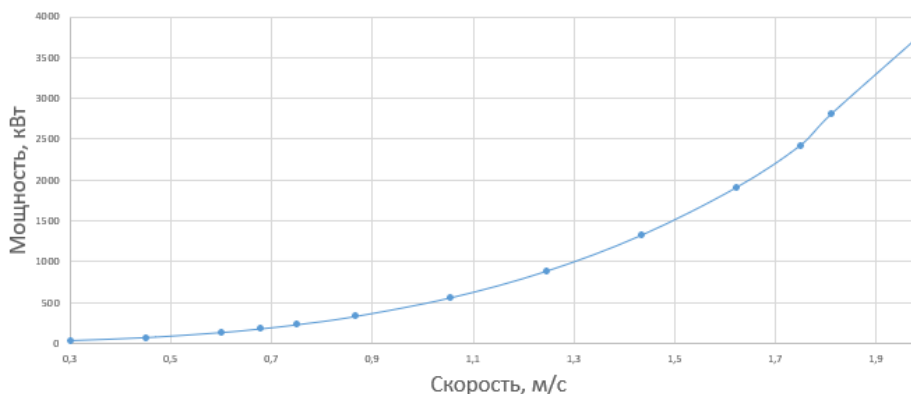
В качестве примера описанного подхода получения зависимости мощности, потребляемой насосным агрегатом, от количества технологической смеси нефтепродуктов произведем соответствующий расчет для одного перегона между промежуточными перекачивающими станциями длиной 100 км трубопровода диаметром 530 мм с толщиной стенки 7 мм, по которому магистральным насосом марки НМ 1250-260 методом последовательной перекачки прямым контактированием транспортируется дизельное топливо зимнее (ДТз) и автомобильный бензин с октановым числом 92 (АИ-92), для оценивания потребляемой мощности и объема смеси при снижении скорости перекачки на 20% меньше минимального рекомендуемого значения (0,75 м/с).

Результат первого этапа расчета определения зависимости объема технологической смеси нефтепродуктов от скорости их движения показан на рисунке 1. Результат второго этапа расчета определения мощности,

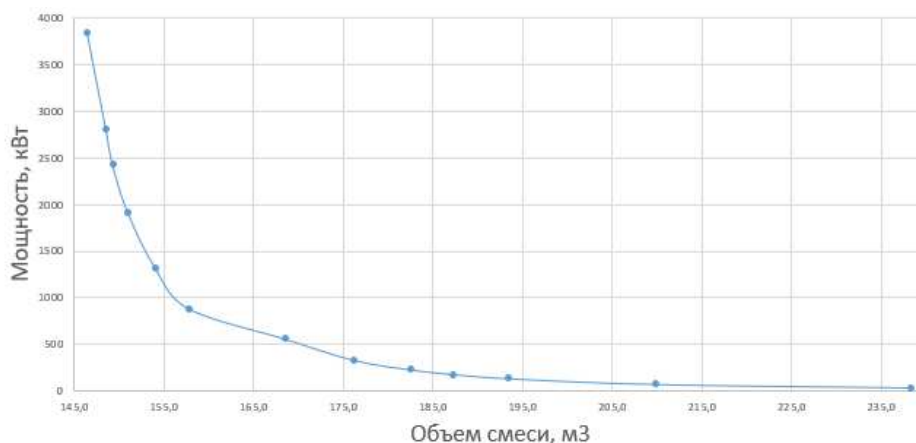
потребляемой магистральным насосным агрегатом, от скорости их движения – на рисунке 2. Результат третьего этапа расчета определения мощности, потребляемой магистральным насосным агрегатом, от объема технологической смеси нефтепродуктов – на рисунке 3.



**Рисунок 1. – График зависимости объема смеси от скорости при контакте нефтепродуктов**



**Рисунок 2. – График зависимости мощности, потребляемой насосом, от скорости**



**Рисунок 3. – График зависимости мощности, потребляемой насосом, от объема смеси нефтепродуктов**

Согласно расчетам снижение минимально рекомендуемой скорости транспортирования нефтепродуктов (0,75 м/с) на 20% до 0,6 м/с приводит к увеличению объема технологической смеси нефтепродуктов на 6% и снижению потребляемой мощности на 42%, что позволяет оператору магистрального нефтепродуктопровода

произвести одновременное оценивание выгоды снижения энергетических затрат и возможности раскладки технологической смеси на конечном пункте при наличии необходимого объема резервуарного парка.

**Заключение.** При эксплуатации нефтепродуктопровода могут складываться штатные ситуации, при которых необходимо проводить перекачку разнотипных или разноименных нефтепродуктов ниже минимально допустимых скоростей, рекомендуемых техническими нормативными правовыми актами во избежание излишнего смесеобразования. Увеличение объема технологической смеси при новом режиме транспортирования может создать условия для невозможности раскладки всего объема смеси по резервуарам на конечном пункте, для чего изначально необходимо проводить оценку целесообразных скоростей перекачки. В то же время уменьшение производительности нефтепродуктопровода приведет к снижению мощности, потребляемой магистральным насосным агрегатом, и, соответственно, снижению затрат за электроэнергию. В таком случае предложенный подход по определению зависимости потребляемой мощности от количества технологической смеси представляет собой удобный инструмент для одновременного оценивания двух параметров и нахождения оптимального режима перекачки ниже рекомендуемых скоростей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Трубопроводный транспорт нефтепродуктов: учеб.-практ. пособие по вопросам теории и расчета / И.Т. Ишмухаметов, С.Л. Исаев, М.В. Лурье и др.; под общ. ред. проф. М.В. Лурье. – М.: Нефть и газ, 1999. – 300 с.
2. Губин В.Е., Новоселов В.Ф., Тугунов П.И. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепродуктопроводов. – М.: Недра, 1968. – 156 с.
3. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов / П.И. Тугунов, В.Ф. Новоселов, А.М. Шаммазов и др. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2002. – 658 с.
4. Шабанов В.А., Шарипова С.Ф., Ахметгареев А.А. Влияние частоты вращения на КПД магистрального насоса // Электротехн. и информ. комплексы. – 2013. – № 9(4). – С. 13–19.
5. Шарнина Г.С., Щур С.В. Экономическая эффективность применения ЧРП для корректировки давления роторов магистральных насосов нефтеперекачивающих станций // Neftegaz.RU. – 2022 – № 12.

#### REFERENCES

1. Ishmukhametov, I.T., Isaev, S.L., Lur'e, M.V. & Makarov, S.P. (1999). *Truboprovodnyi transport nefteproduktov: uchebno-prakticheskoe posobie po voprosam teorii i rascheta*. Moscow: Neft' i gaz. (In Russ.)
2. Gubin, V.E., Novoselov, V.F. & Tugunov, P.I. (1968). *Tipovye raschety pri proektirovanii i ekspluatatsii neftebaz i nefteproduktoprovodov*. Moscow: Nedra. (In Russ.)
3. Tugunov, P.I., Novoselov, V.F., Shammazov, A.M. & Korshak, A.A. (2002). *Tipovye raschety pri proektirovanii i ekspluatatsii neftebaz i nefteprovodov*. Ufa: DizainPoligrafServis. (In Russ.)
4. Shabanov, V.A., Sharipova, S.F. & Akhmetgareev, A.A. (2013). Vliyanie chastoty vrashcheniya na kpd magistral'nogo nasosa [Effect of Speed on the Efficiency of the Main Pump]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы [Electrical and data processing facilities and systems]*, 9(4), 13–19. (In Russ., abstr. in Engl.)
5. Shamina, G.S. & Shchur, S.V. (2022). Ekonomicheskaya effektivnost' primeneniya ChRP dlya korrektyrovki davleniya rotorov magistral'nykh nasosov nefteperekachivayushchikh stantsii. *Neftegaz.RU*, (12). (In Russ.)

Поступила 12.03.2024

### DETERMINATION OF THE DEPENDENCE OF POWER CONSUMPTION OF THE MAIN PUMPING UNIT ON THE VOLUME OF TECHNOLOGICAL MIXTURE OF PETROLEUM PRODUCTS DURING THEIR TRANSPORTATION BY THE METHOD OF SEQUENTIAL PUMPING WITH DIRECT CONTACT

A. VORONIN, A. KONDRATUK, S. BOSLOVYAK  
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The article is devoted to identifying the relationship between power consumption and the amount of process mixture formed at the points of contact of different types of petroleum products during transportation through a main petroleum product pipeline using the method of sequential pumping with the fluid speed as an intermediate parameter. At the first stage, it is necessary to determine the dependence of the volume of the process mixture on the speed of movement of the petroleum product, which allows assessing the possibility of distributing the process mixture into tanks at the final point in accordance with the volume of the tank farm. At the second stage, the dependence of power consumption on the speed of movement of the petroleum product is determined, which creates conditions for estimating the energy costs of transporting petroleum products. At the third stage, the dependence of power consumption on the volume of the process mixture is determined, which informatively helps in choosing the optimal balance between the volume of the mixture and power consumption with the possibility of reducing the pumping speed below the normatively recommended values. The proposed approach for determining the dependence of power consumption on the amount of process mixture is a convenient tool for simultaneous assessment of two parameters and finding the optimal pumping mode.

**Keywords:** sequential pumping, oil pipeline, petroleum products, mixture formation, energy consumption.

УДК 622.692.4.053:620.179.12

DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-135-143

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛА ТРУБ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

канд. техн. наук, доц. А.С. СНАРСКИЙ  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)  
А.Н. ЯНУШОНОК

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

*Представлен метод неразрушающего контроля магистральных трубопроводов, основанный на возможности косвенного определения основных механических свойств металла неразрушающим способом. Получены корреляционные уравнения взаимосвязей значений твердости по Виккерсу и измеренных размеров пирамидального отпечатка при контроле твердости, с механическими свойствами металла труб магистральных трубопроводов. Приведены результаты статистической обработки экспериментальных данных исследуемых взаимосвязей для труб магистральных трубопроводов, изготовленных из стали 20 и стали 09Г2С.*

**Ключевые слова:** магистральные трубопроводы, неразрушающий контроль, механические свойства, твердость.

**Введение.** Срок эксплуатации большей части магистральных трубопроводов (нефте- и газопроводов), расположенных на территории Республики Беларусь, превышает назначенный срок службы и для отдельных участков приближается к 60 годам. Вследствие воздействия эксплуатационных факторов с течением времени происходит деградация механических свойств металлических конструкций, что снижает их надежность, а зачастую приводит к аварийным ситуациям. Актуальной задачей является комплексная и максимально объективная оценка их фактического технического состояния с целью обеспечения надежности и безопасности функционирования. На текущий момент о состоянии магистральных трубопроводов судят по данным внутритрубных диагностических обследований, которые дают информацию только о состоянии стенки трубы на основании изменения ее геометрических параметров (вмятины, коррозионные повреждения, расслоения и т.д.) и наличия неметаллических включений. В то же время данные о механических свойствах эксплуатируемых труб являются фрагментарными, полученными, как правило, на участках, подлежащих ремонту методом «замены катушки», стандартными методами испытаний макропроб. Поэтому так важно совершенствование методов определения механических характеристик и, в первую очередь, ударной вязкости, магистральных трубопроводов неразрушающими методами, что позволит проводить контроль без остановки перекачки и вырезки «катушки». На наш взгляд, наиболее перспективными являются методы контроля механических свойств косвенным методом с использованием переносных приборов измерения твердости.

**Основная часть.** В работе<sup>1</sup> приведен экспресс-метод определения механических свойств, основанный на их расчете по измеренным параметрам отпечатка, полученного при измерении твердости по Виккерсу. Для изготовления конструкций нефтехимического комплекса обычно используются легированные теплоустойчивые и нержавеющие стали (например, 15X5M, 12X18H10T, 10X17H13M2T и др.), которые обеспечивают работу оборудования при высоких давлениях и температурах в условиях коррозионно-активной среды. Условия эксплуатации магистральных трубопроводов значительно отличаются от условий работы оборудования нефтехимического комплекса, также значительно отличается и материальное исполнение. В связи с этим необходима адаптация существующего метода к новому объекту, что позволит развить представления о взаимосвязях между геометрическими параметрами пирамидального отпечатка с механическими свойствами материала конструкций объектов трубопроводного транспорта и создаст условия, в случае подтверждения наличия устойчивой корреляции между твердостью, параметрами отпечатка пирамидального индентера и фактическими механическими свойствами с целью использования данного метода для повышения надежности длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов.

Для адаптации метода к новому объекту исследований из длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов вырезались «катушки», из металла которых изготавливались образцы для проведения испытаний механических свойств металла труб (предела прочности  $\sigma_6$ , твердости по Виккерсу  $HV$ , относительного удлинения  $\delta_5$  и относительного сужения  $\psi$ , ударной вязкости  $KCU$ ), а также размеров полученных отпечатков (диагонали  $D$  и ширины  $S$ ) при измерении твердости по Виккерсу.

<sup>1</sup> Крыленко А.В. Обеспечение безопасной работы нефтеперерабатывающего оборудования на основе контроля деградации структуры и изменения механических свойств материала конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. – Новополоцк: ПГУ, 2008. – 237 л.

Взаимосвязи между параметрами пирамидального отпечатка и механическими свойствами металла труб уточнялись методами статистической обработки экспериментальных данных с использованием программного комплекса Mathcad 15.0. Выборку экспериментальных данных аппроксимировали непрерывными функциями, которые представляли собой поверхности, заданные многомерными полиномами второй степени. С помощью многомерного регрессионного анализа устанавливались зависимости  $\sigma_b = f(HV, S)$  и  $\delta_s = f(D, S)$ . Для более простых и надежных уравнений линейной регрессии применялся метод замены переменных как анализ взаимосвязей отношений  $(\sigma_b/HV)$  и  $(\delta_s/D)$  для функций размера диагонали  $S$ . Также с помощью линейных уравнений определялась взаимосвязь между  $\psi$  и  $S$ .

Решение линейной регрессии проводилось в соответствии со следующим алгоритмом.

Исходные экспериментальные данные задавали векторами  $X_i$  и  $Y_i$  и определяли их количество  $n$ :

$$n := \text{rows}(\text{data}). \quad (1)$$

С помощью вызова встроенных функций Mathcad определяли числовые статистические характеристики векторов выборки<sup>2</sup>: среднее  $\text{mean}(\text{data})$  и медианное  $\text{median}(\text{data})$  значения экспериментальных данных, их дисперсию  $\text{var}(\text{data})$  и среднеквадратическое отклонение  $\text{stdev}(\text{data})$ .

С помощью стандартных функций Mathcad определяли параметры линейной регрессии: свободный коэффициент регрессии  $b_0$  и угловой коэффициент регрессии  $b_1$  исходя из условия минимизации суммы квадратов ошибок<sup>2</sup>:

$$b_0 := \text{intercept}(X, Y), \quad (2)$$

$$b_1 := \text{slope}(X, Y). \quad (3)$$

Рассчитывали коэффициенты корреляции, регрессии и ковариации с помощью следующих стандартных функций Mathcad<sup>2</sup>:

$$\text{corr}(X, Y), \quad (4)$$

$$R^2 = \text{corr}(X, Y)^2, \quad (5)$$

$$\text{cvar}(X, Y). \quad (6)$$

Определяли среднеквадратическое отклонение, угловой и свободный коэффициенты регрессии с заданным уровнем значимости  $\alpha$ , равным 0,05, соответствующее 95% надежности [1]. Для этого в программном комплексе Mathcad<sup>2</sup> задавались формулы (7) и (8) соответственно:

$$\text{slope\_err} = \frac{\text{stderr}(x, y)}{\sqrt{\sum (x - \text{mean}(x))^2}}, \quad (7)$$

$$\text{int\_err} = \text{stderr}(x, y) \cdot \sqrt{\frac{1}{\text{length}(x)} + \frac{\text{mean}(x)^2}{\sum (x - \text{mean}(x))^2}}. \quad (8)$$

Определяли значения доверительных интервалов экспериментальных данных, используя стандартную функцию Mathcad  $\text{confm}^2$  и функцию  $\text{confy}^2$  для доверительных интервалов их средних значений:

$$\text{confm}(x_0) := t \cdot \text{stderr}(x, y) \cdot \sqrt{\frac{1}{\text{length}(x)} + \frac{(x_0 - \text{mean}(x))^2}{\sum (x - \text{mean}(x))^2}}, \quad (9)$$

$$\text{confy}(x_0) := t \cdot \text{stderr}(x, y) \cdot \sqrt{\frac{1}{\text{length}(x)} + \frac{(x_0 - \text{mean}(x))^2}{\sum (x - \text{mean}(x))^2}}. \quad (10)$$

<sup>2</sup> Потапова Н.Н., Забродина О.М., Богомоллова О.А. Статистическая обработка данных в MathCAD [Электронный ресурс]: методические указания к лабораторной работе: учеб. электрон. изд. сетевого распространения. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2014. – URL: [https://vgasu.ru/attachments/potapova\\_01.pdf](https://vgasu.ru/attachments/potapova_01.pdf) (data dostupa: 08.12.2023).



Решение многомерной полиномиальной регрессии производилось в программном комплексе Mathcad 15.0 с помощью комбинации встроенной функции  $regress^3$

$$R := regress(M, V, n) \tag{11}$$

и полиномиальной интерполяции

$$f(x, y) := interp \left[ R, M, V, \begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix} \right], \tag{12}$$

где  $M$  – матрица двух независимых переменных  $Y_i$  и  $Z_i$ ;  $V$  – вектор зависимой переменной  $X_i$ ;  $n$  – степень полиномиальной регрессионной функции, принятая равной 2.

Строили регрессионную поверхность таким образом, чтобы минимизировать отклонения от нее значений экспериментальных точек<sup>3</sup>:

$$F := CreateMesh(f, min(Y), max(Y), min(Z), max(Z), 12, 12). \tag{13}$$

Для определения значений коэффициентов мономиальных членов полинома использовали совместно стандартные функции Mathcad  $Nterms$  и  $COrder(Nvar, deg)$ <sup>3</sup>:

$$Nterms(nvar, deg) := (nvar + deg)! / (deg! \cdot nvar!), \tag{14}$$

$$I := COrder(Nvars, deg), \tag{15}$$

$$coeffs := submatrix(R, 3, rows(R)-1, 0, 0), \tag{16}$$

где  $Nvars$  – количество переменных полинома;  $deg$  – степень полиномиальной функции.

Вид полиномиальной функции определялся с использованием суммы<sup>3</sup>

$$poly(y, z) := \sum_{i=0}^{last(coeffs)} (coeffs_i \cdot y^{l_{i,0}} \cdot z^{l_{i,1}}), \tag{17}$$

для нахождения коэффициентов полинома использована подпрограмма<sup>4</sup>:

```

Step(v,Nvar,deg):=
  for i ∈ 0..deg if Nvar=1
    vi,0 ← vi,0 + 1
  for i ∈ 0..Nvar-1 if deg=1
    vi,i ← vi,i + 1
  otherwise
    inc ← Nterms(Nvar,deg-1)
    for i ∈ 0..inc-1
      vi,Nvar-1 ← vi,Nvar-1 + 1
      v ← stack(Step(submatrix(v,0,inc-1,0,cols(v)-1),Nvar,deg-1)
        Step(submatrix(v,inc,rows(v)-1,0,cols(v)-1),Nvar-1,deg))
    v
COrder(Nvar,deg):=
  vNterms(Nvar,deg)-1,Nvar-1 ← 0
  Step(v,Nvar,deg)
    
```

Меру прямолинейной связи между переменными  $x$ - $y$ ,  $x$ - $z$  и  $y$ - $z$  оценивали коэффициентами парной корреляции Пирсона с использованием следующих формул [1]:

$$r_{xy} = \frac{\mu_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y}, \tag{18}$$

$$r_{xz} = \frac{\mu_{xz}}{\sigma_x \cdot \sigma_z}, \tag{19}$$

$$r_{yz} = \frac{\mu_{yz}}{\sigma_y \cdot \sigma_z}, \tag{20}$$

<sup>3</sup> Потапова Н.Н., Забродина О.М., Богомолова О.А. Статистическая обработка данных в MathCAD [Электронный ресурс]: методические указания к лабораторной работе: учеб. электрон. изд. сетевого распространения. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2014. – URL: [https://vgasu.ru/attachments/potapova\\_01.pdf](https://vgasu.ru/attachments/potapova_01.pdf) (data dostupa: 08.12.2023).

<sup>4</sup> Крыленко А.В. Обеспечение безопасной работы нефтеперерабатывающего оборудования на основе контроля деградации структуры и изменения механических свойств материала конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. – Новополюк: ПГУ, 2008. – 237 л.

где  $\mu_{xy}$ ,  $\mu_{xz}$  и  $\mu_{yz}$  – относительное стандартное отклонение (коэффициент ковариации) между величинами  $x-y$ ,  $x-z$  и  $y-z$ ;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  – среднеквадратическое отклонение величин  $x$ ,  $y$  и  $z$ .

Для расчета частных коэффициентов корреляции, отражающих взаимосвязи между двумя параметрами, когда все остальные исключены из рассматриваемого множества, рассчитывались по формулам [1]

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz} \cdot r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2) \cdot (1 - r_{yz}^2)}}, \quad (21)$$

$$r_{xz,y} = \frac{r_{xz} - r_{xy} \cdot r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xy}^2) \cdot (1 - r_{yz}^2)}}. \quad (22)$$

Значимость частных коэффициентов корреляции оценивалась с помощью  $t$ -критерия Стьюдента, значение которого определялось по формуле [1]

$$t_\phi = \frac{r_{xy,z}}{\sqrt{1 - r_{xy,z}^2}} \cdot \sqrt{n - l - 2}, \quad (23)$$

где  $n$  – количество экспериментальных данных;  $l$  – количество фиксированных переменных.

Рассчитанное значение  $t_\phi$  сравнивалось с табличным  $t_{кр}$  [1]. При этом, если рассчитанное значение  $t$ -критерия превышало табличное значение  $t_{кр}$ , то между двумя переменными существует корреляционная связь при постоянном значении третьей переменной, включенной в модель регрессии.

Определялось значение доверительного интервала рассчитанных частных коэффициентов корреляции с помощью  $z$ -преобразования Фишера

$$z - t_\phi \cdot \sqrt{\frac{l}{n - l - 3}} \leq z \leq z + t_\phi \cdot \sqrt{\frac{l}{n - l - 3}}. \quad (24)$$

По формуле [1] рассчитывалось значение множественного коэффициента корреляции, который определяет степень взаимосвязи между зависимой переменной  $x$  и независимыми переменными  $y$  и  $z$ :

$$r_{x-yz} = \sqrt{\frac{r_{xy}^2 + r_{xz}^2 - 2r_{xy} \cdot r_{xz} \cdot r_{yz}}{1 - r_{yz}^2}}. \quad (25)$$

Значимость множественного коэффициента корреляции оценивалась с помощью  $F$ -критерия Фишера [1]:

$$F_\phi [m, n - (m + 1)] = \frac{[n - (m + 1)] \cdot r_{x-yz}^2}{2 \cdot (1 - r_{x-yz}^2)}. \quad (26)$$

Фактическое расчетное значение  $F$ -критерия сравнивалось с табличным значением  $F_{кр}$  при заданном уровне значимости, принятом равным  $\alpha = 0,05$ . Множественный коэффициент корреляции признавался значимым на уровне  $\alpha$  в случае, если фактическое значение  $F_\phi$  превышало табличное  $F_{кр}$ .

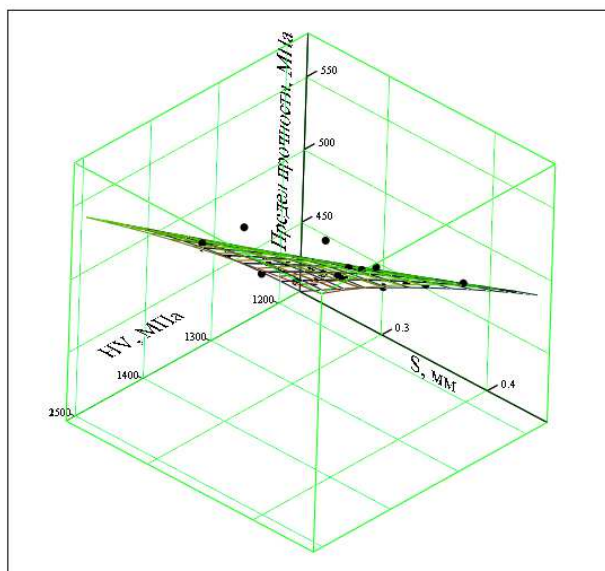
*Определение предела прочности материала неразрушающим методом.* При помощи представленного выше алгоритма описана взаимосвязь между пределом прочности  $\sigma_b$  металла магистральных трубопроводов, изготовленных из стали 20 и 09Г2С, и параметрами, получаемыми при измерении твердости по Виккерсу, которая представляет собой полиномиальную функцию

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_b = \sum_{i=1}^{i=6} (K_i \cdot HV^{l_{i,1}} \cdot S^{l_{i,2}}), \text{ МПа,} \\ \sigma_b = \sum_{i=1}^{i=6} \left( K_i \cdot \left( \frac{370,88}{D^2} \right)^{l_{i,1}} \cdot S^{l_{i,2}} \right), \text{ МПа,} \end{array} \right. \quad (27)$$

где  $i$  – порядковый номер соответствующего показателя степени или коэффициента;  $K_i$  – коэффициенты полинома;  $I_{i,1}$  – показатель степени при  $HV$ ;  $I_{i,2}$  – показатель степени при  $S$ .

Представленные в формуле (27) коэффициенты и показатели степени имеют следующие значения:  $K_1 = -0,696$ ;  $K_2 = -313,888$ ;  $K_3 = 1406$ ;  $K_4 = -847,252$ ;  $K_5 = 1,271$ ;  $K_6 = -2,598 \times 10^{-4}$ ;  $I_{1,1} = 1$ ;  $I_{2,1} = 0$ ;  $I_{3,1} = 0$ ;  $I_{4,1} = 0$ ;  $I_{5,1} = 1$ ;  $I_{6,1} = 2$ ;  $I_{1,2} = 1$ ;  $I_{2,2} = 2$ ;  $I_{3,2} = 1$ ;  $I_{4,2} = 0$ ;  $I_{5,2} = 0$ ;  $I_{6,2} = 0$ .

Графическое отображение регрессии экспериментальных данных  $\sigma_{вi}$ ,  $HV_i$ ,  $S_i$  для магистральных трубопроводов, изготовленных из сталей 20 и 09Г2С, представляет собой полиномиальную поверхность, представленную на рисунке 1.



F. (HV, S,  $\sigma$ )

Рисунок 1. – Полиномиальная поверхность регрессии экспериментальных данных  $\sigma_{вi}$ ,  $HV_i$ ,  $S_i$

Рассчитанные значения парных коэффициентов корреляции Пирсона между экспериментальными значениями параметров  $\sigma_{в}$ ,  $HV$  и  $S$  приведены в таблице.

Таблица. – Значения парных коэффициентов корреляции между  $\sigma_{в}$ ,  $HV$  и  $S$

Факторный признак	Значения коэффициентов корреляции		
	$\sigma_{в}$	$HV$	$S$
$S$	0,781	0,501	1,0
$HV$	0,909	1,0	0,501
$\sigma_{в}$	1,0	0,909	0,781

Данные в таблице показывают, что значение твердости  $HV$  оказывает большее влияние по сравнению с  $S$  на  $\sigma_{в}$ , т.к. парный коэффициент корреляции для  $\sigma_{в}$  и  $HV$  больше, чем для  $\sigma_{в}$  и  $S$ . Значение парного коэффициента корреляции между  $HV$  и  $S$  свидетельствует о том, что корреляцию между этими величинами можно оценить как среднюю. При этом взаимосвязь между  $\sigma_{в}$  и  $S$  более тесная, чем между  $HV$  и  $S$ . Частные коэффициенты корреляции  $r_{\sigma_{в}HV,S} = 0,957$  и  $r_{\sigma_{в}S,HV} = 0,902$ , демонстрирующие связь между  $\sigma_{в}$  и  $HV$ , при постоянном  $S$  больше, чем парные коэффициенты корреляции, определяющие связь между  $\sigma_{в}$  и  $S$  при постоянном  $HV$ , равные 0,909 и 0,781 соответственно. Это объясняется исключением влияния третьей переменной при определении тесноты взаимосвязей с помощью частных коэффициентов корреляции.

Определим значения  $t$ -критерия Стьюдента, подставив соответствующие значения в формулу (23), что позволит провести проверку статистической гипотезы отличия частных коэффициентов корреляции от нуля:

$$t_{\phi 1} = \frac{r_{\sigma_{в}HV,S}}{\sqrt{1 - r_{\sigma_{в}HV,S}^2}} \cdot \sqrt{n - l - 2} = \frac{0,957}{\sqrt{1 - 0,957^2}} \cdot \sqrt{24 - 2 - 2} = 14,754;$$

$$t_{\phi 1} = \frac{r_{\sigma_{в}S,HV}}{\sqrt{1 - r_{\sigma_{в}S,HV}^2}} \cdot \sqrt{n - l - 2} = \frac{0,902}{\sqrt{1 - 0,902^2}} \cdot \sqrt{24 - 2 - 2} = 9,343.$$

Рассчитанные значения  $t$ -критерия попали в критическую область, т.е. они превышают табличное значение коэффициента Стьюдента  $t_{кр} = 2,021$  для уровня значимости 0,05 [1]. Это говорит о значимости частных коэффициентов корреляции.

Определим множественный коэффициент корреляции между  $\sigma_b$ ,  $HV$  и  $S$  по формуле (25):

$$r_{\sigma_b-HVS} = \sqrt{\frac{0,909^2 + 0,781^2 - 2 \cdot 0,909 \cdot 0,781 \cdot 0,501}{1 - 0,501^2}} = 0,984.$$

Для проверки значимости множественного коэффициента корреляции было определено значение критерия Фишера по формуле (26):

$$F_{\Phi}[m, n - (m + 1)] = \frac{[n - (m + 1)] \cdot r_{\sigma_b-HVS}^2}{2 \cdot (1 - r_{\sigma_b-HVS}^2)} = \frac{[24 - (2 + 1)] \cdot 0,984^2}{2 \cdot (1 - 0,984^2)} = 320,271.$$

Рассчитанное значение критерия Фишера превышает критическое значение  $F_{кр} = 3,2317$  для уровня значимости  $\alpha = 0,05$ , поэтому наличие устойчивой корреляции между  $\sigma_b$ ,  $HV$  и  $S$  является статистически значимым. Это говорит о совместном влиянии значений  $HV$  и  $S$  на величину  $\sigma_b$ .

С помощью замены переменных установлена линейная зависимость между отношением  $\sigma_b/HV$  и  $S$ , которая для исследованных сталей магистральных трубопроводов (20 и 09Г2С) представлена формулой

$$\begin{cases} \frac{\sigma_b}{HV} = 0,318 + 0,183 \cdot S, \text{ МПа;} \\ \left(\frac{\sigma_b}{\frac{370,688}{D^2}}\right) = 0,318 + 0,183 \cdot S, \text{ МПа.} \end{cases} \quad (28)$$

Найден коэффициент корреляции для данной зависимости  $r = 0,892$ . Для проверки статистической гипотезы отличия частных коэффициентов корреляции от нуля определим значения  $t$ -критерия Стьюдента, воспользовавшись формулой (23):

$$T_{\text{расч.}} = \frac{r \cdot \sqrt{n - 2}}{\sqrt{1 - r^2}} = \frac{0,892 \cdot \sqrt{24 - 2}}{\sqrt{1 - 0,892^2}} = 9,256.$$

Рассчитанное значение  $t$ -критерия Стьюдента больше критического  $t_{ам} = 2,021$  [1], поэтому можно констатировать, что существует устойчивая корреляция между отношением  $\sigma_b/HV$  и  $S$  на уровне значимости  $\alpha = 0,05$ .

Тесная связь между отношением  $\sigma_b/HV$  и  $S$  визуальнo отображена на рисунке 2, где представлена построенная линия регрессии с нанесенными экспериментальными точками, а также значениями ошибок в виде вертикальных линий, соединяющих линию регрессии с экспериментальными точками.

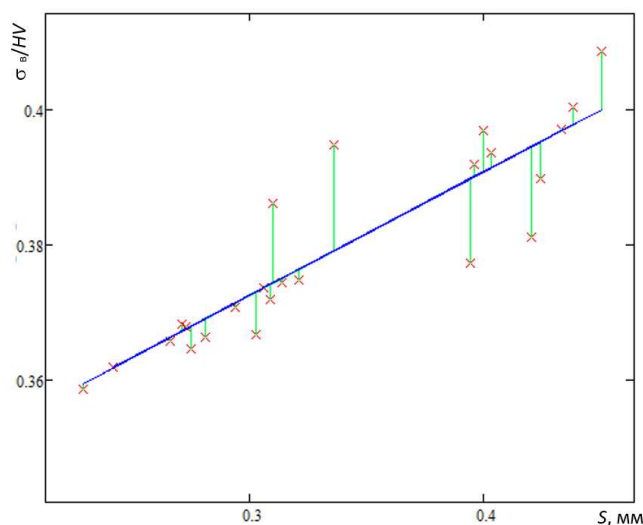
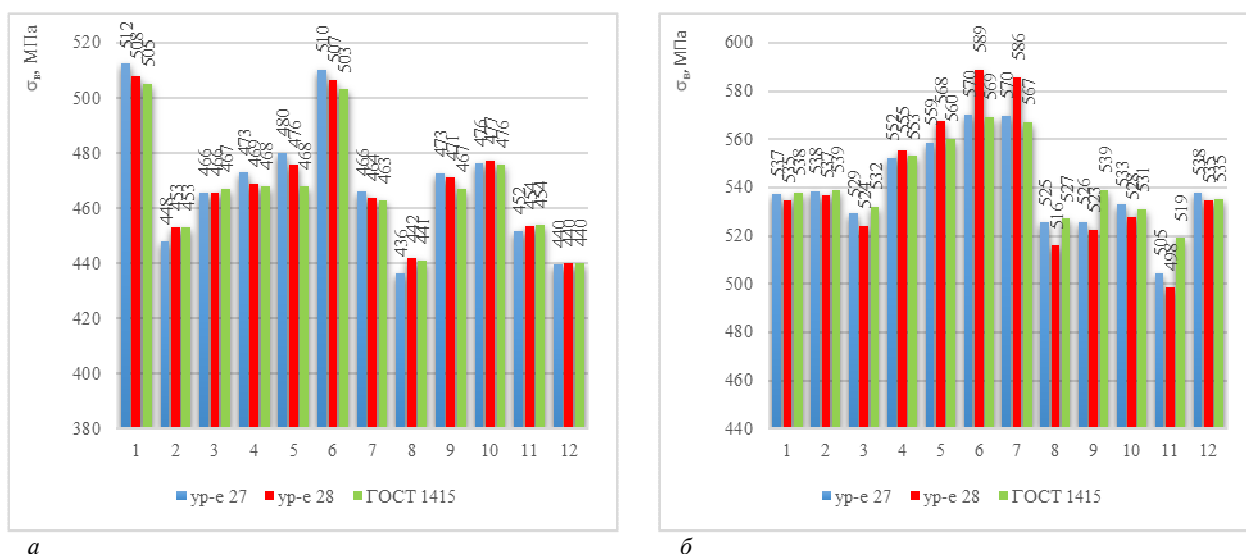


Рисунок 2. – Линейная регрессия экспериментальных данных  $\sigma_b/HV_i = S_i$  для сталей 20 и 09Г2С

Сравнение полученных экспериментальным путем и расчетных значений значений предела прочности труб магистральных трубопроводов представлено на рисунке 3.

Наилучшая сходимость расчетных и экспериментальных значений получается при использовании полиномиальной многомерной регрессии для стали 09Г2С и линейной регрессии для стали 20. При этом отклонение расчетных значений не превышает 4,0%.



а – сталь 20; б – сталь 09Г2С

**Рисунок 3. – Сравнение значений предела прочности материала труб магистральных трубопроводов, рассчитанных по формулам (27), (28) и определенных экспериментально по ГОСТ 1497**

*Определение относительного удлинения материала неразрушающим методом.* Взаимосвязь между относительным удлинением  $\delta_5$  металла труб магистральных трубопроводов и параметрами пирамидального отпечатка, полученного при измерении твердости по Виккерсу, уточнялась путем решения регрессии экспериментальных данных. Проводился расчет как полиномиальной регрессии данных, так и линейной регрессии между отношением  $\delta_5/D$  и  $S$  в соответствии с описанным выше алгоритмом. При проведении расчетов было выявлено, что коэффициент корреляции для всей выборки экспериментальных данных равен 0,329, что свидетельствует о слабой корреляционной связи. Высокая степень корреляции выявлена при решении полиномиальной регрессии по отдельным маркам сталей. Полиномиальная функция, описывающая взаимосвязи между параметрами пирамидального отпечатка и  $\delta_5$  для металла магистральных трубопроводов, представлена в виде формулы

$$\delta_5 = \sum_{i=1}^{i=6} (K_i \cdot D^{I_{i,1}} \cdot S^{I_{i,2}}), \tag{29}$$

где  $i$  – порядковый номер соответствующего показателя степени или коэффициента;  $K_i$  – коэффициенты полинома;  $I_{i,1}$  – показатель степени при  $D$ ;  $I_{i,2}$  – показатель степени при  $S$ .

Представленные в формуле (29) коэффициенты и показатели степени имеют следующие значения:

для стали 20  $K_1 = 0,309$ ;  $K_2 = 294,832$ ;  $K_3 = -363,313$ ;  $K_4 = 338,45$ ;  $K_5 = -0,105$ ;  $K_6 = 1,423 \times 10^{-4}$ ;  $I_{1,1} = 1$ ;  $I_{2,1} = 0$ ;  $I_{3,1} = 0$ ;  $I_{4,1} = 0$ ;  $I_{5,1} = 1$ ;  $I_{6,1} = 2$ ;  $I_{1,2} = 1$ ;  $I_{2,2} = 2$ ;  $I_{3,2} = 1$ ;  $I_{4,2} = 0$ ;  $I_{5,2} = 0$ ;  $I_{6,2} = 0$ ;

для стали 09Г2С  $K_1 = 0,333$ ;  $K_2 = 837,504$ ;  $K_3 = -990,093$ ;  $K_4 = 170,35$ ;  $K_5 = 0,54$ ;  $K_6 = -1,563 \times 10^{-4}$ ;  $I_{1,1} = 1$ ;  $I_{2,1} = 0$ ;  $I_{3,1} = 0$ ;  $I_{4,1} = 0$ ;  $I_{5,1} = 1$ ;  $I_{6,1} = 2$ ;  $I_{1,2} = 1$ ;  $I_{2,2} = 2$ ;  $I_{3,2} = 1$ ;  $I_{4,2} = 0$ ;  $I_{5,2} = 0$ ;  $I_{6,2} = 0$ .

Корреляционные уравнения линейной регрессии для сталей 20 и 09Г2С соответственно имеют вид:

$$\delta_5 = D \cdot (1,273 + (-0,277) \cdot S), \tag{30}$$

$$\delta_5 = D \cdot (0,593 + 0,813 \cdot S). \tag{31}$$

Множественные коэффициенты корреляции между  $\delta_5$ ,  $D$  и  $S$  составили: для стали 20  $r_{\delta_5-D} = 0,961$ , для стали 09Г2С –  $r_{\delta_5-D} = 0,931$ . Определены значения парных коэффициентов корреляции связей  $\delta_5-D$  и  $\delta_5-S$ , равные 0,997 и 0,773 для стали 20 и 0,904 и 0,967 для стали 09Г2С. Парные коэффициенты корреляции между самими факторными признаками ( $D$  и  $S$ ) для стали 20 составили 0,752, для стали 09Г2С – 0,851. Полученные результаты не позволяют сделать однозначные выводы о преимущественном влиянии факторных признаков  $D$  и  $S$  на  $\delta_5$  для сталей магистральных трубопроводов.

Сопоставление результатов, полученных расчетным путем, с экспериментальными данными показывает, что отклонения не превышают 10%. Максимальные отклонения при использовании в расчетах уравнений полиномиальной регрессии для стали 20 составили 1,7%, для стали 09Г2С – 8,1%. Максимальные отклонения для стали 20 при использовании в расчетах уравнений линейной регрессии 1,8%, для стали 09Г2С – 7,0%.

Расчетные значения критерия Фишера ( $F_{\phi} = 443,21$  для стали 20 и  $F_{\phi} = 54,132$  для стали 09Г2С) для полиномиальной регрессии и коэффициента Стьюдента ( $T_{расч.} = 4,037$  для стали 20 и  $T_{расч.} = 9,285$  для стали 09Г2С) для линейной регрессии превышают критические значения  $F_{кр} = 5,7861$  и  $t_{ам} = 2,228$ . Поэтому корреляционная связь между  $\delta_5$ ,  $D$  и  $S$ , а также отношением  $\delta_5/D$  и  $S$  статистически значима для магистральных трубопроводов, изготовленных из стали 20 и 09Г2С.

*Определение относительного сужения материала неразрушающим методом.* В результате проведенного регрессионного анализа установлено, что зависимость между относительным сужением  $\psi$  сталей и шириной пирамидального отпечатка  $S$  для металла труб магистральных трубопроводов является линейной. По итогу проведенных расчетов значение коэффициента корреляции показывает статистически значимую взаимосвязь между  $\psi$  и  $S$  только при рассмотрении экспериментальных данных отдельно по каждому из материалов. Значения коэффициентов корреляции  $r_{\psi-S}$  составили 0,961 для стали 20 и 0,974 для стали 09Г2С. Определены значения углового и свободного коэффициентов линейной регрессии экспериментальных данных, представленные в формулах (32) и (33) для сталей 20 и 09Г2С соответственно:

$$\psi = 0,03 + 1,411 \cdot S, \quad (32)$$

$$\psi = -0,082 + 1,266 \cdot S. \quad (33)$$

Отклонение определенных расчетным путем и экспериментальных значений, полученных по ГОСТ 1497, находится в пределах 3%. При этом корреляционная взаимосвязь между  $\psi$  и  $S$  является статистически значимой, т.к. расчетные значения  $t$ -критерия Стьюдента для линейной регрессии  $T_{расч.} = 6,065$  для стали 20 и  $T_{расч.} = 7,757$  для стали 09Г2С больше табличного  $t_{ам} = 2,228$  при уровне значимости 0,05.

*Определение ударной вязкости материала неразрушающим методом.* Определить значения ударной вязкости металла магистральных трубопроводов возможно расчетным путем, используя ее корреляционную взаимосвязь со значениями относительного удлинения<sup>5</sup>:

$$KCU = \gamma \cdot \frac{\Psi}{1 - \psi}, \text{ МДж/м}^2, \quad (34)$$

где  $KCU$  – ударная вязкость, МДж/м<sup>2</sup>;  $\gamma$  – коэффициент пропорциональности, определяемый в зависимости от механических свойств металла и равный 0,76–0,83 для трубных сталей;  $\psi$  – относительное сужение, отн. ед.

При этом значения относительного сужения  $\psi$  могут быть определены по параметрам пирамидального отпечатка, полученного при измерении твердости по Виккерсу, что позволяет отказаться от вырезки стандартных образцов с последующим их испытанием.

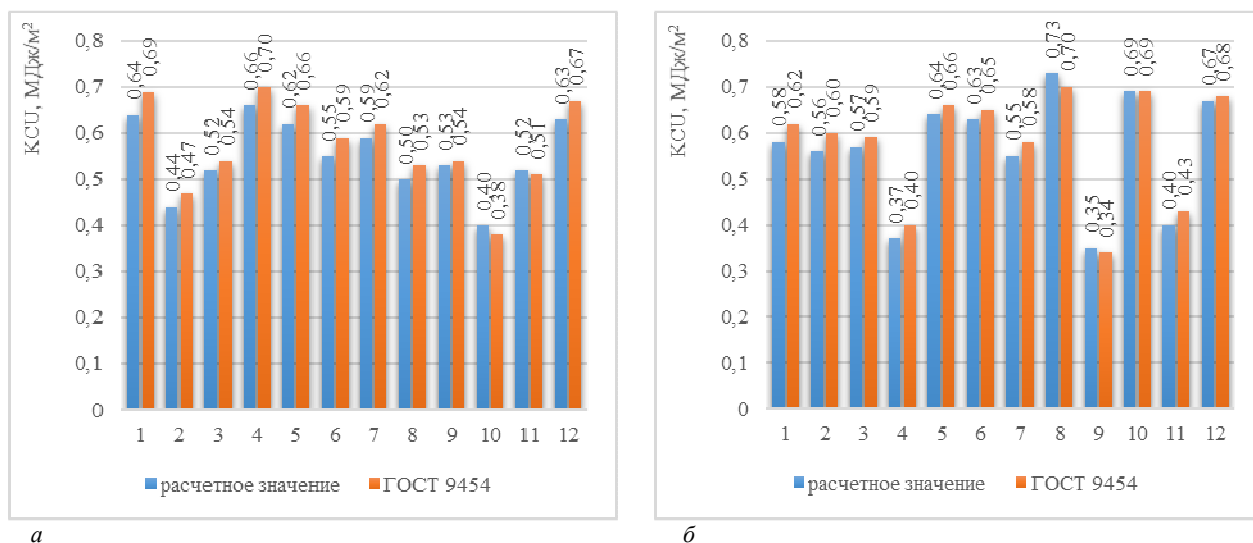
Заменив в формуле (34) относительное сужение  $\psi$  корреляционными уравнениями (32) и (33), получим формулы (35) и (36), которые позволят определять ударную вязкость материала труб магистральных трубопроводов по размерам отпечатков при измерении твердости по Виккерсу:

$$KCU = \gamma \cdot \frac{0,03 + 1,411 \cdot S}{0,97 - 1,411 \cdot S}, \quad (35)$$

$$KCU = \gamma \cdot \frac{-0,082 + 1,266 \cdot S}{1,082 - 1,266 \cdot S}. \quad (36)$$

После проведенных расчетов ясно, что наиболее близкие результаты рассчитанных значений ударной вязкости к экспериментальным данным получены при значении коэффициента пропорциональности  $\gamma = 0,76$ . Сравнение рассчитанных по уравнениям (35) (для стали 20) и (36) (для стали 09Г2С) значений ударной вязкости с экспериментальными значениями, полученными в результате испытаний в соответствии с ГОСТ 9454, представлено в виде диаграмм на рисунке 4.

<sup>5</sup> Крыленко А.В. Обеспечение безопасной работы нефтеперерабатывающего оборудования на основе контроля деградации структуры и изменения механических свойств материала конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. – Новополоцк: ПГУ, 2008. – 237 л.



а – сталь 20; б – сталь 09Г2С

**Рисунок 4. – Сравнение значений ударной вязкости материала труб магистральных трубопроводов, рассчитанных по формулам (35), (36) и определенных экспериментально по ГОСТ 9454**

Разница между расчетными и экспериментальными значениями не превышает 8%, что позволяет проводить оценку ударной вязкости неразрушающим способом непосредственно на магистральном трубопроводе.

**Закключение.** Полученные корреляционные уравнения позволяют математическим путем определить значения параметров механических свойств труб магистральных трубопроводов на основании определения твердости по Виккерсу и измерения значений размеров пирамидального отпечатка. В полевых условиях данные измерения могут быть проведены с использованием переносных твердомеров и микроскопов. Предлагаемый неразрушающий метод показывает достаточную точность для его применения в качестве экспресс-метода оценки механических свойств металла труб в процессе эксплуатации магистральных трубопроводов, что даст возможность отказаться от дорогостоящих работ, связанных с вырезкой образцов для проведения механических испытаний, а также повысит безопасность эксплуатации объектов трубопроводного транспорта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Миркин Б.Г. Введение в анализ данных: учебник и практикум. – М.: Юрайт, 2023. – 174 с.

#### REFERENCES

1. Mirkin, B.G. (2023). Vvedenie v analiz dannykh: uchebnik i praktikum. Moscow: Yurait. (In Russ.)

Поступила 12.03.2024

### NON-DESTRUCTIVE METHOD FOR DETERMINING THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF METAL OF MAIN PIPELINES

A. SNARSKY

(Belarusian National Technical University, Minsk)

A. YANUSHONAK

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

*The paper presents a method of non-destructive testing of main pipelines, based on the possibility of indirectly determining the basic mechanical properties of metal using a non-destructive method. Correlation equations were obtained for the relationship between Vickers hardness values and the measured dimensions of the pyramidal indent obtained during hardness testing with the mechanical properties of the metal of main pipeline pipes. The results of statistical processing of experimental data of the studied relationships for main pipeline pipes made of steel 20 and steel 09G2S are presented.*

**Keywords:** main pipelines, non-destructive testing, mechanical properties, hardness.

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

<b>Попок Н.Н., Фрик А.С.</b> Анализ преобразователей термоэлектрических для измерения температуры в резиносмесителях .....	2
<b>Попок Н.Н., Балыш А.С.</b> Бессварные герметичные соединения трубопроводов малых диаметров и импульсных линий трубных проводов .....	8
<b>Пилипенко С.В.</b> Параметры мгновенного очага деформации при обратном рабочем ходе клетки станов холодной пильгерной прокатки труб .....	14
<b>Рынкевич С.А.</b> Классификация дефектов передач мобильных машин .....	19
<b>Семенченко М.В.</b> Технология диффузионного насыщения и термической обработки проволоки путем электроконтактного циклического нагрева .....	25

### ТРАНСПОРТ

<b>Капский Д.В., Ходоскин Д.П.</b> Совершенствование метода расчета потенциальной опасности в конфликтной зоне для попутного транспортного потока посредством уточнения коэффициентов приведения по тяжести ДТП .....	30
<b>Капский Д.В., Богданович С.В.</b> Интеграция методов когнитивного анализа в систему оценки безопасности дорожной инфраструктуры .....	36
<b>Лю Юйвэй</b> Исследование условий движения маршрутного пассажирского транспорта в городе Хух-Хото, КНР .....	50
<b>Малеронок В.В., Потапов В.А., Романёнок С.Н.</b> Расчетно-графический способ проверки и тарировки тензометрических датчиков аэродинамических весов .....	57
<b>Володарец Н.В.</b> Совершенствование методики определения технического уровня транспортного средства .....	62
<b>Мойся Д.Л.</b> Определение маневренности и анализ устойчивости движения модели седельного автопоезда с помощью математического моделирования .....	70
<b>Ду Сичэжоу, Лобашов А.О., Капский Д.В.</b> Определение рациональных параметров сети зарядных станций электромобилей .....	78
<b>Сушко А.А., Баханович А.Г.</b> Термин «конфликт» в системе обеспечения безопасности дорожного движения .....	86
<b>Сушко А.А., Баханович А.Г.</b> Средства перемещения пешехода, участвующего в дорожном движении .....	92
<b>Фруцкий В.А., Семенченко М.В.</b> Технология восстановления работоспособности корпусных деталей двигателей .....	97

### ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

<b>Фозилов С.Ф., Зоирова А.И., Фозилов Х.С., Туробжонов С.М.</b> Получение высших жирных спиртов на основе низкомолекулярного полиэтилена и анализ их смазывающих свойств для дизельных топлив .....	102
<b>Фозилов С.Ф., Фатоев И.И., Касимов А.С., Зоирова А.И., Бурая И.В.</b> Влияние высокодисперсного целлита на прочностные и диффузионно-сорбционные свойства полиолефинов .....	109
<b>Емельянова В.А., Ермак А.А., Корнякова А.В.</b> Влияние термической обработки на свойства избыточного активного ила .....	116
<b>Гришин П.Ф.</b> Кинетика стадии окислительно-адсорбционной очистки депарафинизированного гидрокрекингového масла активной глиной методом перколяции .....	123
<b>Воронин А.Н., Кондратюк А.Д., Бословяк С.В.</b> Определение зависимости мощности магистрального насосного агрегата от объема технологической смеси нефтепродуктов при их транспортировании методом последовательной перекачки прямым контактированием .....	129
<b>Снарский А.С., Янушонок А.Н.</b> Неразрушающий метод определения механических характеристик металла труб магистрального трубопровода .....	135